



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

**ANÁLISIS DE LA CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL Y SEMI EMPÍRICA DE LA
EFICIENCIA EN ENERGÍA DE TRES DETECTORES DE CENTELLEO DE YODURO
DE SODIO DEL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNMSM Y UNFV**

**Línea de investigación:
Física Nuclear y Ambiental**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

Autor

Sanchez Di Negro, Jean Luc

Asesor

Avila Lopez, Juan Arcadio

ORCID: 0000-0002-1429-9117

Jurado

Guzmán Calcina, Carmen Sandra

Velesvilla Velezví, Twiggy Miosotty

Lostaunau Melgarejo, Marco Jacinto

Lima - Perú

2025

RECONOCIMIENTO - NO COMERCIAL - SIN OBRA DERIVADA
(CC BY-NC-ND)



Análisis de la calibración experimental y semi empírica de la eficiencia en energía de tres detectores de centelleo de Yoduro de Sodio del Laboratorio de Física de la UNMSM y UNFV

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

ricabib.cab.cnea.gov.ar

Fuente de Internet

3%

2

doaj.org

Fuente de Internet

2%

3

Eduardo Villarreyes, Galo Patiño, Ana Luna, Oscar Baltuano, Luis Angulo. "Caracterización de tres centelladores de 1.5"x1.5", 2"x2" y 3"x3" para la puesta a punto de una cadena para espectroscopía gamma", Revista de Investigación de Física, 2023

Publicación

1%

4

manualzz.com

Fuente de Internet

1%

5

hmong.es

Fuente de Internet

1%

6

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

7

scholarshare.temple.edu

Fuente de Internet

1%

8

academia-lab.com

Fuente de Internet

1%

9

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ANÁLISIS DE LA CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL Y SEMI EMPÍRICA DE LA
EFICIENCIA EN ENERGÍA DE TRES DETECTORES DE CENTELLEO DE
YODURO DE SODIO DEL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNMSM Y UNFV

Línea de investigación:

Física Nuclear y Ambiental

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

Autor:

Sanchez Di Negro, Jean Luc

Asesores:

Avila Lopez, Juan Arcadio

ORCID: 0000-0002-1429-9117

Villarreyes Peña, Eduardo Gonzalo

ORCID: 0000-0001-7364-5342

Jurado:

Guzmán Calcina, Carmen Sandra

Velesvilla Velezví, Twiggy Miosotty

Lostanau Melgarejo, Marco Jacinto

Lima - Perú

2025

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a los profesores asesores de este trabajo de tesis y al gran aporte brindado por el grupo de investigación INFISA-UNMSM.

ÍNDICE

RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Descripción y formulación del problema	14
1.2 Antecedentes	14
1.3 Objetivos	16
1.3.1 General	16
1.3.2 Específicos.....	16
1.4 Justificación.....	16
1.5 Hipótesis.....	17
1.5.1 Hipótesis general	17
1.5.2 Hipótesis secundarias.....	17

II. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	18
2.1.1 Decaimiento radiactivo.....	18
2.1.2 Radiación electromagnética ionizante.....	18
2.1.3 Actividad, ecuación de decaimiento y periodo de semidesintegración.....	18
2.1.4 Rayos gamma.....	20
2.1.5 Efecto fotoeléctrico.....	20
2.1.6 Efecto compton.....	20
2.1.7 Creación de pares.....	21
2.1.8 Núcleo radiactivo.....	22
2.1.9 Desintegración radiactiva.....	22
2.1.10 Detector de centelleo.....	23
2.1.11 Fotomultiplicador.....	24
2.1.12 Analizador multicanal (MCA).....	25
2.1.13 Resolución del detector.....	26

2.1.14	Tiempo muerto, tiempo vivo y tiempo real.....	28
2.1.15	Cálculo del tiempo muerto.....	28
2.1.16	Eficiencia en la detección de rayos gamma.....	30
2.1.17	Error absoluto, error relativo y error relativo porcentual.....	31
III.	MÉTODO.....	32
3.1	Tipo de investigación.....	32
3.2	Ámbito temporal y espacial.....	32
3.3	Variables.....	32
3.3.1	Variables independientes.....	32
3.3.2	Variables dependientes.....	32
3.4	Población y muestra.....	32
3.4.1	Población.....	32
3.4.2	Muestra.....	32
3.5	Instrumentos.....	33
3.5.1	Fuentes radiactivas.....	33

3.5.2	Detectores de centelleo de NaI(Tl)	35
3.5.3	Software UCS-30 y MC ² Analyzer	37
3.5.4	Programa GENIE2000	39
3.5.5	Software Efficiency Transfer for Nuclide Activity Measurements - ETNA	41
3.6	Procedimientos	42
3.6.1	Fuente radiactiva de referencia	42
3.6.2	Puesta a punto del espectrómetro gamma	43
3.6.3	Toma de datos de las fuentes radiactivas variando su distancia	46
3.6.4	Actividad final de las fuentes radiactivas.....	48
3.6.5	Cálculo de las eficiencias experimentales	50
3.6.6	Transferencia de eficiencia.....	52
3.7	Análisis de datos	55
IV.	RESULTADOS	56
4.1	Curvas de calibración	56
4.2	Tiempo muerto	58

4.3	Tiempo real, Tiempo no disponible para la toma de datos y tiempo vivo	58
4.4	Centroide del fotopico, Ancho a media altura (FWHM) y Número de cuentas (N_n).....	61
4.5	Resolución vs Energías	67
4.6	Eficiencias experimentales	68
4.7	Transferencia de eficiencia y error relativo porcentual.....	75
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
VI.	CONCLUSIONES	86
VII.	RECOMENDACIONES	88
VIII.	REFERENCIAS	89
IX.	ANEXOS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Datos técnicos de las fuentes utilizadas - INFISA.	33
Tabla 2	Datos técnicos de las fuentes utilizadas - UNFV.	34
Tabla 3	Datos técnicos de los equipos de espectroscopia gamma	36
Tabla 4	Datos considerados y calculados para el detector 1,5"x1,5"	49
Tabla 5	Datos considerados y calculados para el detector 2"x2".	49
Tabla 6	Datos considerados y calculados para el detector 3"x3".	50
Tabla 7	Datos considerados para el cálculo de eficiencia.	50
Tabla 8	Datos experimentales del tiempo vivo, Tiempo no disponible para la toma de datos y tiempo real para el Na-22.	59
Tabla 9	Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 1,5"x1,5"..	64
Tabla 10	Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 2"x2". ..	65
Tabla 11	Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 3"x3". ..	66
Tabla 12	Datos experimentales de las resoluciones	67
Tabla 13	Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 1,5"x1,5".	69
Tabla 14	Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 2"x2". . .	71
Tabla 15	Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 3"x3". . .	73
Tabla 16	Datos simulados mediante transferencia eficiencia para el detector con cristal 1,5"x1,5".	75

Tabla 17	Datos simulados mediante transferencia de eficiencia para el detector con cristal 2"x2"	77
Tabla 18	Datos simulados mediante transferencia de eficiencia para el detector con cristal 3"x3"	78
Tabla 19	Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 1,5"x1,5"	80
Tabla 20	Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 2"x2"	81
Tabla 21	Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 3"x3"	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Fuentes Radiactivas	22
Figura 2	Decaimiento radiactivo del Co-60	23
Figura 3	Detectores de centelleo.	24
Figura 4	Esquema de un fotomultiplicador	24
Figura 5	Diagrama de bloque funcional MCA tradicional.	25
Figura 6	Fotopico donde se indica su ancho a media altura (FWHM)	26
Figura 7	Comparación de resolución entre distintos tipos de detectores para una fuente de Antimonio-122 y Antimonio-124.	27
Figura 8	Ilustración de los dos modelos de tiempo muerto.	29
Figura 9	Fuentes radiactivas certificadas UNMSM	34
Figura 10	Fuentes radiactivas certificadas UNFV	35
Figura 11	Detectores de centelleo 3"x3", 2"x2" y 1,5"x1,5" respectivamente	36
Figura 12	Interfaz del software UCS-30, se muestra el espectro del Cs-137.	37
Figura 13	Interfaz del software MC ² Analyzer, se muestra el espectro del Co-60. . .	38
Figura 14	Interfaz del software GENIE2000, se muestra el espectro del Ba-133. . .	39
Figura 15	Software GENIE2000, se muestra el espectro del Am-241.	40

Figura 16	Interfaz del software ETNA	41
Figura 17	Software ETNA - propiedades geométricas	42
Figura 18	Espectro de la fuente radiactiva Ra-226	43
Figura 19	Visualización de los 5 espectros (Am-241, Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 3"x3" después de la puesta a punto.	44
Figura 20	Visualización de los 4 espectros (Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 1,5"x1,5" después de la puesta a punto.	44
Figura 21	Visualización de los 5 espectros (Am-241, Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 2"x2" después de la puesta a punto.	45
Figura 22	Visualización de la radiación de fondo ambiental en el laboratorio UNFV.	46
Figura 23	Visualización de la variación de la distancia en el detector 2"x2"	47
Figura 24	Visualización de la variación de la distancia en el detector 1,5"x1,5"	47
Figura 25	Visualización de la variación de la distancia en el detector 3"x3"	48
Figura 26	Disposiciones de las regiones para el fotopico.	52
Figura 27	Especificaciones técnicas del detector 3"x3".	53
Figura 28	Propiedades geométricas del detector - ETNA	53

Figura 29	Ingreso de las eficiencias experimentales - ETNA	54
Figura 30	Calibración de energías del espectro total 1,5"x1,5" utilizando GENIE2000.	56
Figura 31	Calibración de energías del espectro total 2"x2" utilizando GENIE2000.	57
Figura 32	Calibración de energías del espectro total 3"x3" utilizando GENIE2000.	57
Figura 33	Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 3"x3".	59
Figura 34	Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 2"x2".	60
Figura 35	Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 1,5"x1,5".	60
Figura 36	Espectro del Am-241 a 0,25cm del detector con cristal 3"x3" y el ROI del fotopico.	61
Figura 37	Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 1,5"x1,5" y el ROI del fotopico.	62
Figura 38	Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 2"x2" y el ROI del fotopico.	62

Figura 39	Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 3"x3" y el ROI del fotopico.	63
Figura 40	Espectro del Ba-133 a 1cm del detector con cristal 1,5"x1,5" y el ROI del fotopico.	63
Figura 41	Gráfica resolución (%) vs energía (keV)	68
Figura 42	Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 13	70
Figura 43	Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 13, variando las distancias. . .	70
Figura 44	Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 14	72
Figura 45	Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 14, variando las distancias. . .	72
Figura 46	Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 15	74
Figura 47	Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 15, variando las distancias. . .	74
Figura 48	Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 16	76
Figura 49	Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 17	78
Figura 50	Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 18	79
Figura 51	Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 19 . . .	81
Figura 52	Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 20 . . .	82
Figura 53	Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 21 . . .	83
Figura 54	Comparación grafica de eficiencias en el detector 2"x2" a 1 cm de las tablas 14 y 17	83

RESUMEN

Los equipos de detección de radiación gamma que utilizan centelladores tienen una gran relevancia en diversos campos de la investigación y aplicación de la radiación gamma, como en el campo de la física nuclear, impactos medioambientales, protección radiológica y en los diferentes tipos de industria. La presente tesis tuvo como objetivo utilizar los detectores de centelleo con cristales inorgánicos de Yoduro de sodio (NaI) de dimensiones 1,5"x1,5" (REXON), 2"x2"(BICRON) y 3"x3"(BICRON) ubicados en el laboratorio de radiaciones de la UNFV y del grupo INFISA - UNMSM para analizar y comparar la calibración por energías con 5 fuentes radiactivas (Am-241, Ba-133, Cs-137, Co-60 y Na-22) certificadas, la eficiencia y se realizó la transferencia de eficiencia utilizando el software ETNA usando un multicanal de 1024 canales para los tres modelos de detectores. Los resultados mostraron cada curva de calibración asociada al detector, sus eficiencias y que las resoluciones para el detector de 1,5"x1,5" van desde 4,91% hasta 8,86%, para el detector de 2"x2" van desde 5,13% hasta 19,30% y para el detector de 3"x3" van desde 5,26% hasta 22,62%. Se concluye que el detector de 1,5"x1,5" tiene una mejor resolución. Además, una mayor eficiencia tiene el detector 3"x3" y la transferencia de eficiencia se puede utilizar para algunas fuentes radiactivas como el Co-60 y Cs-137 debido a su aceptable porcentaje de error.

Palabras Clave: espectroscopia gamma, centelladores, NaI, resolución y eficiencia de centelladores, calibración de centelladores en energía.

ABSTRACT

Gamma radiation detection equipment using scintillators is highly relevant in various fields of gamma radiation research and application, including nuclear physics, environmental impacts, radiation protection, and various industrial sectors. The objective of this thesis was to use the 1,5"x1,5" (REXON), 2"x2" (BICRON), and 3"x3" (BICRON) inorganic sodium iodide (NaI) crystal scintillation detectors located in the radiation laboratory of the UNFV and the INFISA-UNMSM group to analyze and compare the energy calibration with five certified radioactive sources (Am-241, Ba-133, Cs-137, Co-60, and Na-22). Efficiency was also analyzed and transferred using ETNA software, utilizing a 1024-channel multichannel detector for the three detector models. The results showed each calibration curve associated with the detector, its efficiencies, and that the resolutions for the 1,5"x1,5" detector ranged from 4,91% to 8,86%, for the 2"x2" detector, from 5,13% to 19,30%, and for the 3"x3" detector, from 5,26% to 22,62%. It is concluded that the 1,5"x1,5" detector has better resolution. Furthermore, the 3"x3" detector has higher efficiency, and the efficiency transfer can be used for some radioactive sources such as Co-60 and Cs-137 due to its acceptable error rate.

Keywords: gamma spectroscopy, scintillators, NaI, scintillator resolution and efficiency, energy calibration of scintillators.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción y formulación del problema

Para el estudio, y el análisis de la radiación gamma, se recurre a la técnica llamada espectroscopia gamma donde son utilizados principalmente los detectores semiconductores de germanio hiperpuro (HPGe) y detectores de centelleo con cristales inorgánicos de Yoduro de sodio (NaI), siendo este último ventajoso por su bajo costo y su alta eficiencia. La problemática es analizar y comparar la calibración por energía y eficiencia utilizando detectores de Yoduro de sodio con un cristal de 1,5"x1,5", 2"x2" y 3"x3" para determinar el comportamiento de su resolución y eficiencia de bajas a altas energías mediante fuentes radiactivas puntuales calibradas.

Resolviéndose el problema: ¿Cómo se comporta la eficiencia y la calibración en energía en los detectores de yoduro de sodio de 1,5"x1,5", 2"x2" y 3"x3" respecto a sus dimensiones?

1.2 Antecedentes

El descubrimiento de los rayos gamma fue en el año 1900 por Paul Villard cuando estudiaba la radiación emitida por el Radio. Estos rayos tenían un poder de penetración mayor. Sin embargo, Villard no consideró darle un nombre diferenciado de los rayos alfa y beta (L'Annunziata, 2007).

En 1903, Ernest Rutherford reconoció que la radiación de Villard era de un tipo fundamentalmente diferente de los rayos previamente nombrados, quien llamó a los rayos de Villard "rayos gamma" (Rutherford, 1903). Rutherford inicialmente creyó que podrían ser partículas beta extremadamente rápidas, pero el hecho de que no fueran desviadas por un campo magnético indicaba que no tenían carga. Luego en 1914, se observó que los rayos gamma se reflejaban en las superficies de los cristales, esto demostró que eran radiación electromagnética.

Rutherford y su colega Edward Andrade llevaron a cabo mediciones de las longitudes de onda de los rayos gamma del radio, hallando que eran comparables a los rayos X, aunque con longitudes de onda más cortas y, por ende, con una mayor frecuencia (Fowler, 2024). Los rayos gamma se generan durante el proceso de desintegración gamma, que suele ocurrir tras otras formas de desintegración, como la desintegración α o β . El núcleo hijo que se forma generalmente queda en un estado excitado y, eventualmente, puede regresar a un nivel de energía más bajo, emitiendo un fotón de rayos gamma en lo que se conoce como decaimiento gamma. Además, las transiciones que involucran fluorescencia gamma nuclear constituyen un área de estudio en la física nuclear conocida como espectroscopia gamma (Tanarro, 1970).

Este campo se dedica al análisis de las transiciones energéticas en los núcleos atómicos, que están asociadas con la absorción o emisión de rayos gamma. Por esta razón, se han realizado numerosos estudios sobre el espectro de radiación gamma utilizando detectores de NaI(Tl) y HPGe.

Estudios previos, como los realizados por El Hamli et al. (2022), han analizado la influencia del tamaño del cristal en parámetros espectrométricos como la resolución y la eficiencia. Estos autores reportaron para un detector de 1,5"×1,5" resoluciones entre 14% y 4,5%. Para el detector de 2"×2", los valores reportados por Casanovas et al. (2013) oscilaron entre 9% y 5,2%. En cuanto a la eficiencia, Pilakouta et al. (2018) obtuvieron eficiencias entre 0,15 y 0,038.

Además, se han abordado herramientas de simulación como el software ETNA permiten realizar transferencias de eficiencia con márgenes de error aceptables en detectores de HPGe (Lepy et al., 2001), aunque su aplicabilidad en detectores de NaI(Tl) requiere validación experimental, tal como se aborda en este trabajo.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Analizar experimental y semiempíricamente la calibración en energía y la eficiencia de tres detectores de centelleo de Yoduro de Sodio (NaI(Tl)) de dimensiones 1,5"×1,5", 2"×2" y 3"×3".

1.3.2 Específicos

- Obtener las curvas de calibración en energía para los tres detectores de centelleo (1,5"×1,5", 2"×2" y 3"×3") utilizando fuentes radiactivas certificadas.

- Evaluar semiempíricamente la calibración de los detectores mediante el software ETNA.

- Evaluar y comparar las mediciones de los valores nominales de energía respecto a los valores hallados experimentalmente, garantizando que los errores de las mediciones se encuentren dentro de los márgenes permitidos.

- Comparar experimentalmente las eficiencias de los detectores centelladores de NaI(Tl) de 1,5"×1,5", 2"×2" y 3"×3".

1.4 Justificación

El presente trabajo de tesis está dirigida al análisis de los fotopicos de 5 fuentes radiactivas puntuales utilizando el programa de análisis espectrométrico GENIE2000 y a la interpretación de la transferencia de eficiencia mediante software ETNA en detectores de NaI(Tl) con distintos tamaños de cristal centellador. La razón para realizar esta investigación es contrastar que tipo de detector es el más adecuado para hacer la transferencia de eficiencia, que tipo de fuente y por ende su energía está dentro de los márgenes permitidos, lo que aceleraría procesos de toma de data. Además, permite caracterizar los detectores — puesta a

punto de la cadena gamma - para uso de investigación ya que poseen relevancia en el estudio y aplicaciones de las radiaciones en física nuclear, medidas de radiación medioambiental, protección radiológica, etc.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

La eficiencia de detección de los detectores de Yoduro de Sodio (NaI(Tl)) depende de las dimensiones del cristal centellador, siendo mayor en cristales de mayor tamaño debido a una mayor probabilidad de interacción de los fotones gamma.

1.5.2 Hipótesis secundarias

- El software ETNA permite evaluar la eficiencia experimental de los detectores de NaI(Tl) con un margen de error aceptable, aunque puede presentar discrepancias significativas.
- La curva de calibración en energía obtenida mediante el software GENIE2000 proporciona valores con un margen aceptable respecto a los valores nominales de las fuentes radiactivas utilizadas.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1 *Decaimiento radiactivo*

El decaimiento radiactivo es un proceso espontáneo mediante el cual un núcleo atómico inestable se transforma en uno más estable a través de la emisión de partículas y/o radiación electromagnética, liberando energía en este proceso. Los principales mecanismos de decaimiento radiactivo incluyen la desintegración alfa, beta y gamma (Condori, 2019).

2.1.2 *Radiación electromagnética ionizante*

La radiación electromagnética ionizante es aquella capaz de ionizar átomos debido a su alta energía, lo que se traduce en longitudes de onda cortas. Entre este tipo de radiación se encuentra la radiación gamma.

Sin embargo, no es el único tipo de fotones que puede generarse a partir de un decaimiento radiactivo. También se pueden producir fotones a través de la aniquilación de la materia, el Bremsstrahlung de partículas cargadas, reacciones nucleares (Prompt Gammas) o los Rayos X característicos (Gilmore, 2008).

2.1.3 *Actividad, ecuación de decaimiento y periodo de semidesintegración*

Se define como la cantidad de desintegraciones que ocurren por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional (SI), la unidad de medida para esta actividad es el Bequerel (Bq), que representa una desintegración por segundo. Por otro lado, el Curio (Ci), sistema cegesimal, equivale a $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (Gilmore, 2008).

La razón de decaimiento está directamente relacionada con la cantidad de átomos del radionúclido presente. Así, podemos afirmar que la actividad A es proporcional al número de átomos N del radionúclido:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.1)9$$

Donde λ es la constante de decaimiento, cuya inversa ($\tau = \frac{1}{\lambda}$) es el tiempo de vida media.

El tiempo en el que la actividad se reduce a la mitad se conoce como periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.2)$$

La resolución de la ecuación 2.1 nos conduce a la siguiente expresión:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

A partir de lo expuesto, podemos afirmar que $A = \lambda N$, por lo tanto, la ecuación resultante es la siguiente:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

2.1.4 *Rayos gamma*

Un rayo gamma es una forma de radiación electromagnética altamente penetrante, que se origina a partir de la desintegración radiactiva de los núcleos atómicos. Se caracteriza por sus ondas electromagnéticas de longitud de onda extremadamente corta y su interacción con la materia se produce principalmente de tres maneras: a través del efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares (Krneta Nikolic´ et al., 2018).

La radiación gamma se origina a partir de las transiciones entre dos niveles de energía en los núcleos atómicos. Este fenómeno representa un proceso de desexcitación del núcleo de un átomo, y a diferencia de la radiación alfa y beta, no altera la composición del núcleo, pues el número de protones y neutrones se mantiene constante (Tanarro, 1970).

2.1.5 *Efecto fotoeléctrico*

Se trata del proceso en el que un fotón incidente es completamente absorbido por un átomo al interactuar con él. En este proceso, la energía del fotón (E_γ) se transfiere por completo a un electrón del átomo. Este electrón, conocido como fotoelectrón, logra escapar del átomo con una energía cinética (E_e) que corresponde a la diferencia entre la energía del fotón incidente y su energía de enlace dentro del átomo (h : constante de Planck, ν : frecuencia), es decir:

$$E_e = h\nu - E_{enlace} \quad (2.5)$$

Donde la energía de enlace E_{enlace} depende de la capa atómica en la cual se encuentra ubicado (Knoll, 2010).

2.1.6 *Efecto compton*

Se trata de un tipo de interacción en la que el fotón pierde parte de su energía según el ángulo de dispersión. Esta situación puede interpretarse como una colisión inelástica entre el fotón incidente y un electrón libre, ya que la energía de enlace del electrón es inferior a la del fotón entrante. Tras la dispersión, el fotón queda con una energía menor a la inicial,

transfiriendo el exceso de energía al electrón en forma de energía cinética (Gilmore, 2008).

La energía transmitida al electrón (E_k) depende de la energía del fotón incidente y del ángulo de dispersión θ del fotón dispersado, dada la ecuación:

$$E_k = E_\gamma \left[1 - \frac{1}{1 + E_\gamma(1 - \cos \theta / m_0 c^2)} \right] \quad (2.6)$$

De esta expresión se puede concluir que la energía mínima del electrón se alcanza cuando el ángulo es de 0° , mientras que la energía máxima se presenta a 180° .

Además, los electrones generados a través del efecto Compton darán lugar a una región continua conocida como el continuo Compton (Compton continuum). Esta región abarca desde energías bajas hasta un límite superior, denominado borde Compton, que corresponde a los electrones resultantes de una dispersión del fotón a 180° (Knoll, 2010).

2.1.7 Creación de pares

Es un proceso en el que la energía de un fotón se transforma al interactuar con el núcleo, resultando en la aparición de un par de partículas: un electrón y un positrón. Para que esto ocurra, es necesario que el fotón posea, como mínimo, una energía de 1,022 MeV. Si la energía del fotón excede este umbral mínimo, el exceso se distribuye en forma de energía cinética. De este modo, la energía cinética total (E_{KT}) se calculará como sigue (Knoll, 2010):

$$E_{KT} = E_\gamma - 1,022 MeV \quad (2.7)$$

2.1.8 *Núcleo radiactivo*

Es un núcleo que presenta un exceso de energía nuclear, lo cual lo vuelve inestable. Esta energía en exceso puede liberarse, habitualmente, de tres maneras: mediante la emisión de radiación gamma, o bien a través de la emisión de partículas alfa o beta. Durante estos procesos, se afirma que el radionúclido experimenta una desintegración radiactiva (Loveland et al., 2017).

Figura 1

Fuentes Radiactivas



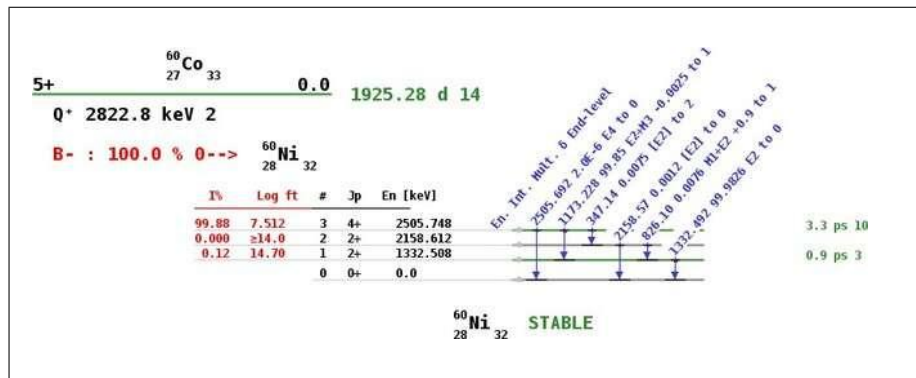
Nota. Se muestran el Ba-133, Cs-137, Na-22 y Co-60. Tomado de Villarreyes et al. (2023).

2.1.9 *Desintegración radiactiva*

Es un proceso natural mediante el cual un núcleo atómico inestable libera partículas o radiación gamma con el fin de alcanzar una configuración más estable. Los tres tipos más comunes de desintegración son la desintegración alfa, beta y gamma. A continuación, se presenta el esquema de desintegración del Co-60.

Figura 2

Decaimiento radiactivo del Co-60



Nota. Se muestra el diagrama del Co-60. Tomado de International Atomic Energy Agency (IAEA, s. f.).

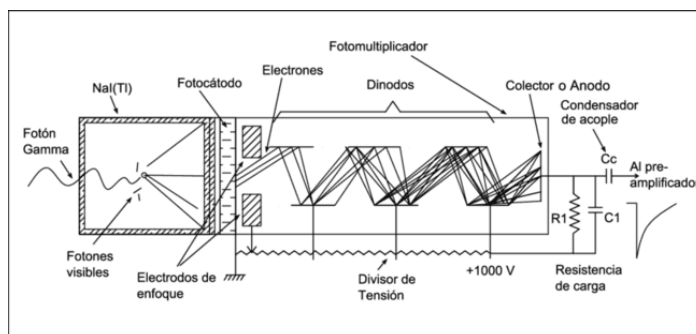
2.1.10 *Detector de centelleo*

En las mediciones radiactivas, el detector de centelleo es un dispositivo empleado para identificar partículas ionizantes o radiación electromagnética, como los rayos gamma y los rayos X, mediante un fenómeno conocido como "centelleo". Este fenómeno se manifiesta a través de destellos de luz que se producen cuando una partícula cargada o un fotón interactúa con materiales específicos denominados "centelladores". Entre sus características más destacadas se encuentran su alta eficiencia en la detección y su rápida respuesta. El sistema está compuesto por un fotomultiplicador y un cristal de Na(Tl) que ofrece gran transparencia. La amplitud relativa de los picos y su distribución se ven influenciadas por la radiación incidente y las dimensiones del cristal.

Cuando el cristal es de mayor tamaño, el fotopico se hace más evidente en comparación con el resto de la distribución. Esto se debe a que un cristal más grande tiene la capacidad de absorber la energía de un mayor número de fotones en comparación con uno pequeño, facilitando así un mayor número de interacciones, tales como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton o la creación de pares (Tanarro, 1970).

Figura 3*Detectores de centelleo**Nota.* Adaptado de Villarreyes et al. (2023).**2.1.11 Fotomultiplicador**

Se trata de una célula fotoeléctrica de alta sensibilidad, que cuenta principalmente con un fotocátodo capaz de liberar electrones al ser expuesto a la luz. Estos electrones son luego acelerados por una diferencia de potencial adecuada y chocan sucesivamente contra una serie de electrodos conocidos como dinodos (Tanarro, 1970).

Figura 4*Esquema de un fotomultiplicador**Nota.* Tomado de Prada et al. (2020).

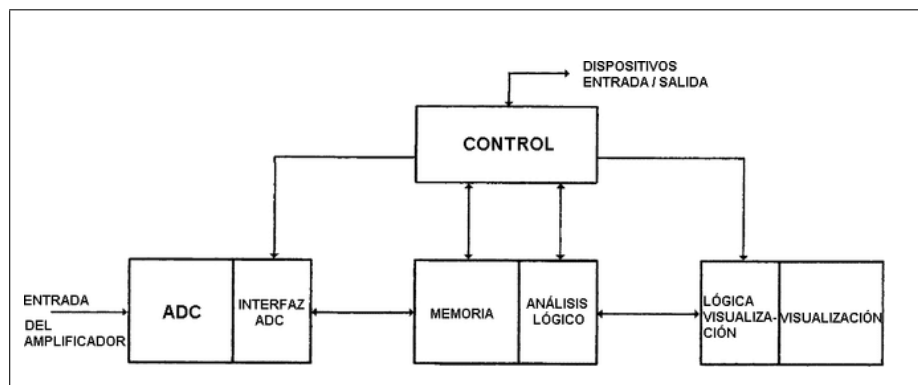
2.1.12 Analizador multicanal (MCA)

Es un instrumento diseñado para medir distribuciones de señales de entrada constituidas por pulsos. Funciona en dos modalidades distintas: el modo de análisis de altura de pulso (PHA) y el modo de escalado multicanal (MCS).

En el modo PHA, los pulsos de entrada se clasifican en canales de acuerdo a su amplitud, mientras que en el modo MCS, la clasificación se basa en el momento en que cada pulso llega. El analizador de espectros de múltiples canales (MCA) permite visualizar las distribuciones generadas y, además, generalmente tiene la capacidad de enviar los datos a una impresora o computadora para realizar un análisis más exhaustivo posteriormente (The multichannel analyzer, s. f.).

Figura 5

Diagrama de bloque funcional MCA tradicional



Nota. Tomado de Gilmore (2008).

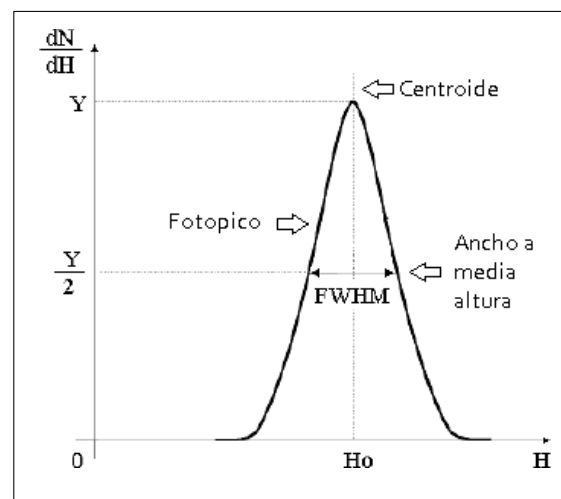
2.1.13 Resolución del detector

Es la capacidad para exhibir dos picos de energía de rayos gamma de un espectro de forma consecutiva. Cuanto más estrechos y definidos sean estos picos, mayor será la resolución del detector. Esto, a su vez, mejora la habilidad para distinguir y medir las energías de un radionúclido específico.

Generalmente, la resolución se expresa como el Ancho a Media Altura (FWHM, por sus siglas en inglés) de un pico en un espectro gamma, medido en kilo-electrón voltios (keV). En algunos casos, también se expresa en términos porcentuales, calculando el FWHM en relación al centroide de energía (E_0) y multiplicado por 100 (Villarreyes et al., 2023).

Figura 6

Fotopico donde se indica su ancho a media altura (FWHM)



Nota. Tomado de Ramirez-Jimenez (2006).

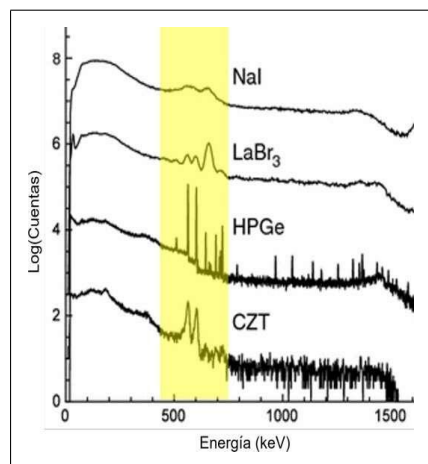
La resolución en la espectroscopia gamma tiene dos razones fundamentales que destacan su importancia:

- Permite identificar y separar picos cuyas energías son muy cercanas entre sí. Cuando la distancia entre los canales centrales de los fotopicos es igual o superior a 3 veces el ancho a mitad de altura (FWHM), los fotopicos se distinguen claramente y pueden ser analizados de manera independiente. Sin embargo, si la separación entre los canales centrales es de solo 1 FWHM, el análisis se vuelve más complicado. A pesar de este desafío, los programas de análisis espectrométrico actuales son capaces de discriminar entre los picos y proceder con su análisis.

- Una mejor resolución resulta en picos más delgados, lo que significa que las cuentas se distribuyen en un menor número de canales. Esta característica es crucial cuando se trata de analizar fotopicos de baja significancia, ya que facilita la interpretación precisa de los datos (Gilmore, 2008).

Figura 7

Comparación de resolución entre distintos tipos de detectores para una fuente de Antimonio-122 y Antimonio-124



Nota. Tomado de Condori (2019).

La resolución energética de un detector de rayos gamma expresado en porcentaje (%R) suele ser inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la energía (E) de los rayos gamma que se detectan, donde C es una constante (N. Demir y Kuluöztürk, 2021).

Por ende, se tiene la siguiente relación:

$$\%R \propto \frac{C}{\sqrt{E}} \quad (2.8)$$

2.1.14 *Tiempo muerto, tiempo vivo y tiempo real*

El tiempo muerto (Dead Time) se refiere al intervalo en el que un equipo no es capaz de detectar pulsos. Cada componente electrónico contribuye de manera diferente al tiempo muerto total. Un aspecto crucial de este fenómeno proviene del conversor análogo-digital (ADC), ya que, mientras está procesando un pulso, no puede manejar otro simultáneamente (Condori, 2019).

El tiempo vivo (Life time) se refiere al intervalo durante el cual el equipo registra pulsos, mientras que el tiempo real (Real time) corresponde a la suma de estos dos (Knoll, 2010). Así, se establece la siguiente relación:

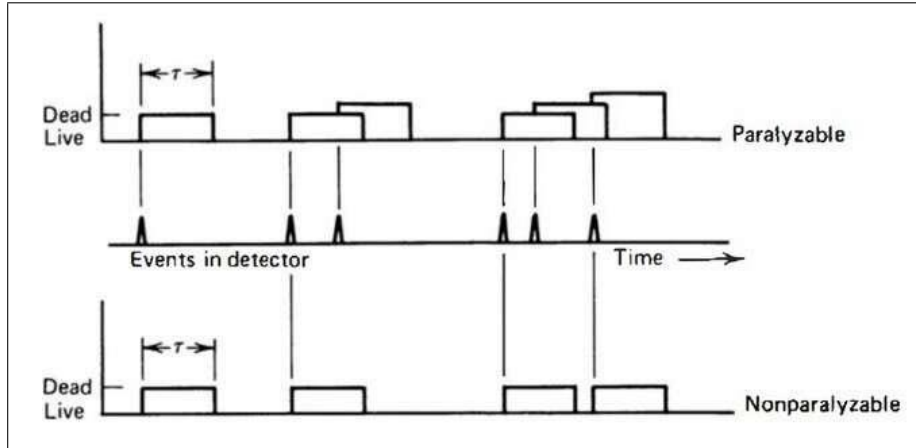
$$\text{Tiempo muerto} = \text{Tiempo real} - \text{Tiempo Vivo} \quad (2.9)$$

2.1.15 *Cálculo del tiempo muerto*

Existen dos modelos para describir el comportamiento del tiempo muerto: la respuesta **paralizable** y la respuesta **no paralizable**. En el primer modelo, mientras las partículas llegan al detector en intervalos de tiempo menores que el tiempo muerto, el sistema se "congela" durante ese período. En este estado, solo es capaz de identificar y registrar el pulso de la primera partícula que impacta, hasta que el tiempo entre dos partículas sea superior al tiempo muerto. En el segundo modelo, el sistema se "congela" durante un intervalo equivalente al tiempo muerto antes de recuperar la capacidad de distinguir otra partícula. Estos dos modelos presentan diferencias significativas cuando se opera a tasas de conteo elevadas (Knoll, 2010).

Figura 8

Ilustración de los dos modelos de tiempo muerto



Nota. Tomado de Knoll (2010).

Un método comúnmente utilizado es el de dos fuentes (**two-source method**), este enfoque se basa en la tasa de conteo de dos fuentes analizadas por separado y en su combinación. Dado que la pérdida de conteo no es lineal, la tasa obtenida al combinar las fuentes será inferior a la suma de las tasas individuales. Así, el tiempo muerto se calcula a partir de esta discrepancia. Se define n_1 , n_2 y n_{12} como las razones de conteo verdaderas (muestra más fondo) de la fuente 1, 2 y a la combinación de ambas, respectivamente. Además, sean m_1 , m_2 y m_{12} las razones de conteo observadas (sin considerar el fondo), τ el tiempo muerto y m_b la tasa de conteo de fondo observada (medida). A partir de esta información, podemos deducir lo siguiente:

$$X = m_1 m_2 - m_b m_{12} \quad (2.10)$$

$$Y = m_1 m_2 (m_{12} + m_b) - m_b m_{12} (m_1 + m_2) \quad (2.11)$$

$$Z = \frac{Y(m_1 + m_2 - m_{12} - m_b)}{X^2} \quad (2.12)$$

$$\tau = \frac{X[1 - (1 - Z)^{1/2}]}{Y} \quad (2.13)$$

Para el caso de un fondo nulo ($m_b = 0$) se considera la expresión aproximada:

$$\tau = \frac{m_1 m_2 [m_1 m_2 (m_{12} - m_1)(m_{12} - m_2)]^{1/2}}{m_1 m_2 m_{12}} \quad (2.14)$$

2.1.16 Eficiencia en la detección de rayos gamma

Se refiere a la cantidad de radiación gamma que es detectada por el centellador, también conocido como la eficiencia absoluta (ε) (Demir et al., 2008).

$$\varepsilon = \frac{\text{Número de gammas detectados}}{\text{Número de gammas emitidos por la fuente}} \quad (2.15)$$

La eficiencia absoluta de pico para una determinada energía, conocida también como eficiencia de un detector centellador (ε_e), se calcula a partir del espectro gamma. Este se obtiene al dividir el número de cuentas netas del fotopico (N_n) dividido entre la intensidad de probabilidad de emisión de energía (I), la actividad del radionúclido (A) y el tiempo de recuento de la muestra (t_r) (Villarreyes et al., 2023).

$$\varepsilon_e = \frac{N_n}{I \cdot A \cdot t_r} \quad (2.16)$$

2.1.17 *Error absoluto, error relativo y error relativo porcentual*

Se define el error absoluto ΔE , como la diferencia entre el resultado de la medida M y el verdadero valor M_0 de la magnitud a medir:

$$\Delta E = M - M_0 \quad (2.17)$$

En un sentido estricto, esta definición no se puede aplicar literalmente a las medidas físicas, ya que nunca podremos conocer con exactitud el valor de una magnitud. Por ello, se considera como M_0 el valor que más se aproxima al verdadero.

El Error Relativo E_R es el cociente entre el error absoluto ΔE y el verdadero valor.

$$E_R = \frac{\Delta E}{M_0} \quad (2.18)$$

El Error Relativo porcentual es el E_R expresado en tanto por ciento, su expresión es:

$$E_R(\%) = |E_R| \cdot 100 \quad (2.19)$$

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

Descriptiva cuantitativa, transversal y prospectivo. Se tomaron datos con la cadena de detección de radiación gamma de fuentes radiactivas calibradas y puntuales.

3.2 Ámbito temporal y espacial

La investigación se desarrolló a finales del año 2023 y durante el año 2024, con toma de datos en fechas específicas acordes a la disponibilidad de los laboratorios y equipos de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) - grupo de investigación INFISA.

3.3 Variables

3.3.1 *Variables independientes*

Actividad, energía de los rayos gama del Cs-137, Co-60, Am-241, Ba-133 y Na-22.

3.3.2 *Variables dependientes*

Espectros de los fotopícos y eficiencia del detector del NaI(Tl).

3.4 Población y muestra

3.4.1 *Población*

Se trabajó con todos los datos medidos de las fuentes radiactivas (Cs-137, Co-60, Am-241, Ba-133 y Na-22).

3.4.2 *Muestra*

No aplicable porque se trabajó con toda la población.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Fuentes radiactivas

Se usaron 5 fuentes radiactivas del grupo de investigación - INFISA de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) y 4 fuentes radiactivas del laboratorio radiaciones de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV).

Tabla 1

Datos técnicos de las fuentes utilizadas - INFISA

Fuentes radiactivas puntuales - UNMSM		
Fuentes	Fecha de fabricación	Actividad inicial
Am-241	Agosto 2006	370 000 Bq (10 μ Ci)
Ba-133	Setiembre 2018	1 μ Ci
Co-60	Setiembre 2018	1 μ Ci
Cs-137	Octubre 2018	0,25 μ Ci
Na-22	Setiembre 2018	1 μ Ci

Tabla 2

Datos técnicos de las fuentes utilizadas - UNFV

Fuentes radiactivas puntuales - UNFV		
Fuentes	Fecha de fabricación	Actividad inicial
Ba-133	Diciembre 2018	1 μCi
Co-60	Noviembre 2018	1 μCi
Cs-137	Diciembre 2018	0,25 μCi
Na-22	Noviembre 2018	1 μCi

Figura 9

Fuentes radiactivas certificadas UNMSM



Nota. Realizado por el autor.

Figura 10

Fuentes radiactivas certificadas UNFV



Nota. Realizado por el autor.

3.5.2 Detectores de centelleo de NaI(Tl)

Se utilizaron 3 detectores de Yoduro de sodio (NaI(Tl)). El detector con tamaño cristal 1,5"x1,5" esta ubicado en el laboratorio de radiaciones UNFV, mientras que los otros dos están ubicados en el laboratorio INFISA - UNMSM. Se detalla las especificaciones en la siguiente tabla.

Datos técnicos de los equipos de espectroscopia gamma

Detectores yoduro de sodio [NaI(Tl)]			
Especificaciones técnicas	1,5"x1,5"	2"x2"	3"x3"
Marca	REXON	BICRON	BICRON
Modelo	NaI 1,5 px 1,5/1,5 IV	2M2/2-XB	3M3/3
Serie	#170508-10	60007-03507-I	ES-294
Procedencia	USA	INDIA	USA
Cristal	1,5" (3,8 cm)	2" (5,08 cm)	3" (7,62 cm)
Voltaje de funcionamiento	750 V	600 V	600 V

Figura 11

Detectores de centelleo 3"x3", 2"x2" y 1,5"x1,5" respectivamente



Nota. Realizado por el autor.

3.5.3 Software UCS-30 y MC²Analyzer

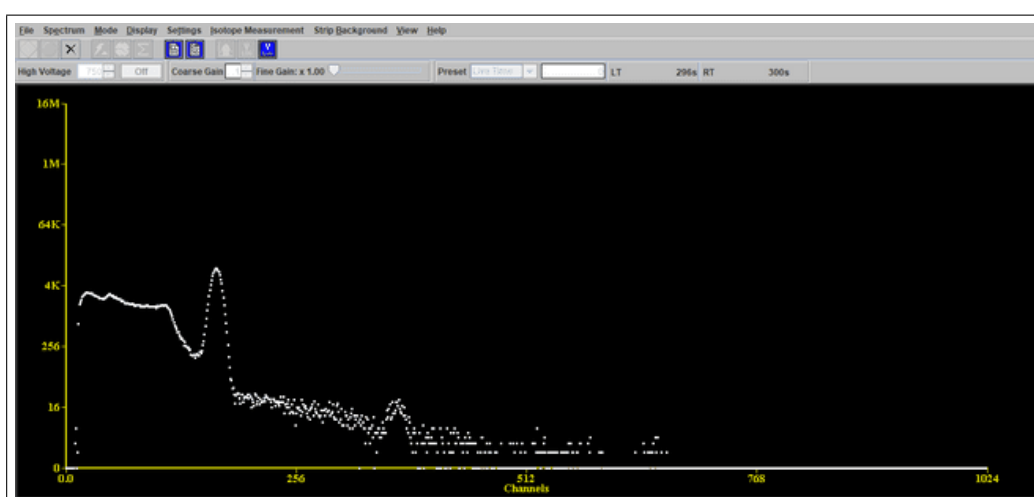
Los detectores de radiación nuclear son capaces de generar pulsos electrónicos que contienen información sobre la radiación nuclear que interactuó con ellos.

El UCS-30 produce una visualización en vivo de alta resolución y en tiempo real de datos espectrales con gráficos de PC estándar que se ejecutan en Windows (2000 y superior).

El software ofrece control total de todas las funciones, incluidas las preestablecidas en tiempo real y regiones de interés (ROI), junto con cálculos de centroide, área bruta y neta. El control del amplificador de hardware, alto voltaje, ADC y discriminadores de entrada también se realiza a través de botones de función para una calibración y operación sencillas. Para la identificación de picos, el cursor se puede calibrar para leer directamente en unidades de energía, utilizando un sistema lineal de 2 puntos o calibración de relación cuadrática de 3 puntos para permitir la no linealidad del detector (Spectrum Techniques, s. f.).

Figura 12

Interfaz del software UCS-30, se muestra el espectro del Cs-137



Nota. Realizado por el autor.

El software Multi-Channel Analyzer (MC²Analyzer) produce una visualización en vivo de alta resolución y en tiempo real de datos espectrales y gestiona la adquisición con algoritmos de altura de pulso. De hecho, MC²Analyzer utiliza el poder de adquisición de los digitalizadores rápidos como el CAEN DT5780.

El software ofrece control total de todas las funciones, incluidas las preestablecidas en vivo/en tiempo real y regiones de interés (ROI), junto con cálculos de centroide, área bruta y neta. Para la identificación de picos, el cursor se puede calibrar para leer directamente en unidades de energía, utilizando un sistema lineal de 2 puntos o calibración de relación cuadrática utilizando como base 3 puntos, uno puede seleccionar más puntos del espectro a analizar. Sin embargo, el software adaptará el mejor ajuste a una ecuación cuadrática (MC²Analyzer User Manual, 2019).

Figura 13

Interfaz del software MC²Analyzer, se muestra el espectro del Co-60



Nota. Realizado por el autor.

3.5.4 Programa GENIE2000

En el análisis de los espectros obtenidos, se empleó el software GENIE2000. Este programa dispone de herramientas profesionales que facilitan la visualización, edición, análisis y almacenamiento de espectros.

Figura 14

Interfaz del software GENIE2000, se muestra el espectro del Ba-133



Nota. Realizado por el autor.

Las herramientas utilizadas en el presente trabajo fueron:

- *Calibrate > Energy only calibration*: Esta herramienta permite ingresar manualmente únicamente los pares de energía y canal, lo que facilita la generación de una curva de ajuste para la calibración energética.

- *Analyze > Peak locate > User specified*: Este método determina el centroide de cada pico presente en la región de búsqueda, tal como se detalla en "Ubicación de pico especificado por el usuario", y facilita la identificación de picos en función de su relevancia. Se puede visualizar en la figura 13.

-

- *Analyze > Peak area > Sum/Non-Linear LSQ Fit*: Su propósito es analizar los picos que ya han sido identificados con la herramienta *Peak locate*, llevando a cabo el cálculo del Área Neta del Pico (Net Peak Area - NPA) y evaluando la incertidumbre del canal central, el ancho completo a mitad de altura (FWHM) y el fondo continuo que se encuentra debajo del pico.

- *Analyze > Nuclide Identification*: Este análisis facilita la identificación de posibles isótopos presentes en el espectro que se encuentren dentro de la Región de Búsqueda o que coincidan con cualquiera de los límites establecidos.

La calibración de energía actual se empleará para verificar si un pico de la biblioteca se ubica dentro de dicha región. Esta información es visible en la figura 14 (Canberra, 2013).

Figura 15

Software GENIE2000, se muestra el espectro del Am-241



Nota. Realizado por el autor.

3.5.5 *Software Efficiency Transfer for Nuclide Activity Measurements - ETNA*

Es un programa desarrollado por *LABORATOIRE NATIONAL HENRI BECQUEREL* que permite calcular la eficiencia de transferencia en condiciones de medición distintas a las de calibración, así como corregir los efectos de sumas coincidentes.

El programa simula las propiedades geométricas de los detectores de radiación gamma, considerando aspectos como el tamaño del cristal, la distancia de calibración respecto a la fuente y las dimensiones de la fuente, entre otros (Lépy et al., 2004).

Figura 16

Interfaz del software ETNA

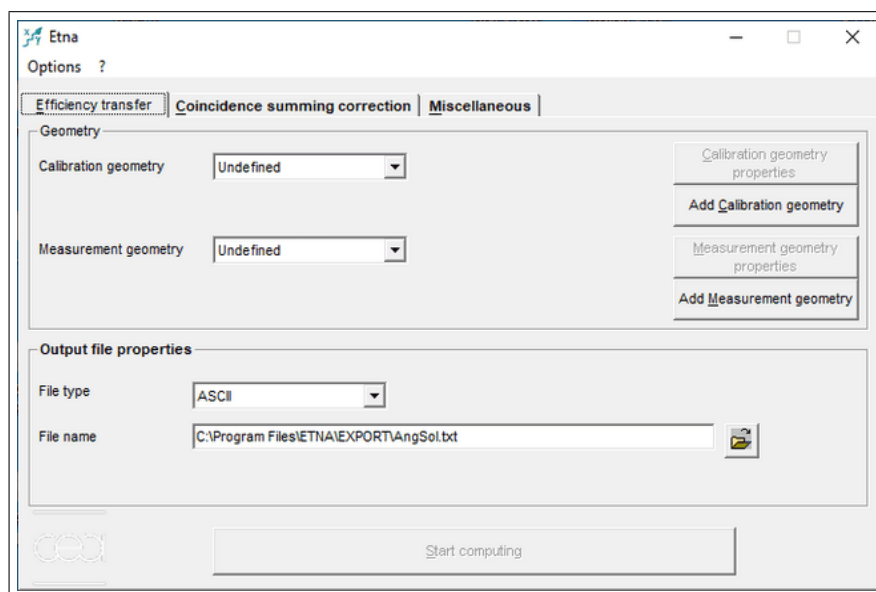
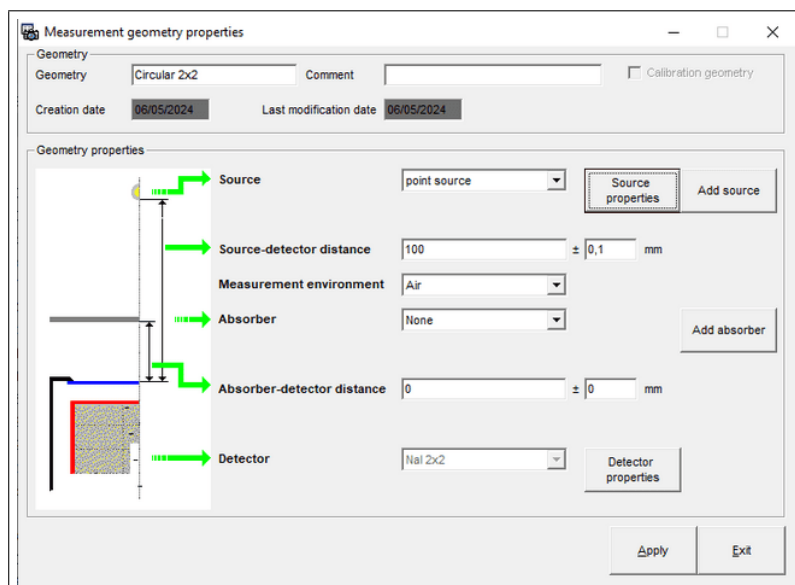


Figura 17

Software ETNA - propiedades geométricas



3.6 Procedimientos

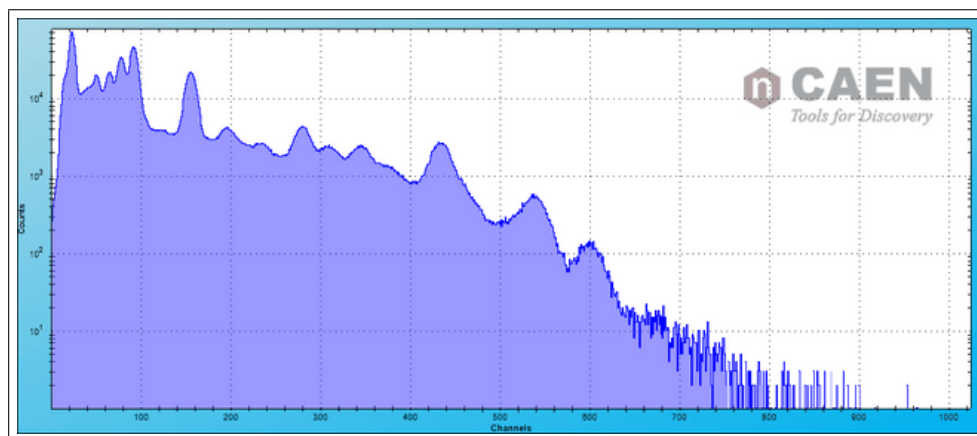
3.6.1 Fuente radiactiva de referencia

Para el proceso de poder tener una visualización del espectro desde bajas a altas energías se elige una fuente radiactiva con varios fotopicos energéticos. En este caso se utilizó el Radio (Ra-226), se procedió a ajustar los parámetros del software MC²Analyzer hasta visualizar todo el espectro.

Condiciones ambientales: 23°C ± 5°C y Humedad Relativa < 75%.

Figura 18

Espectro de la fuente radiactiva Ra-226



Nota. Se muestra el espectro para el detector 3"x3". De la misma manera se procede con los otros 2 detectores. Realizado por el autor.

3.6.2 ***Puesta a punto del espectrómetro gamma***

Para llevar a cabo el análisis de los espectros de las fuentes radiactivas, es necesaria una adecuada preparación del sistema de espectrometría. En nuestro caso, se han establecido las siguientes características operativas:

- *Calibración en energía.* Establece la conexión entre la energía y el canal del espectro, lo que posibilita la determinación de la energía de las emisiones detectadas.
- *Resolución.* Nos muestra la capacidad del sistema para diferenciar entre emisiones de diversas energías.
- *Eficiencia de detección.* Consiste en establecer la relación entre la tasa de emisión de la muestra y la tasa de detección del detector. Comprender esta relación nos permite determinar la actividad de las muestras.

Figura 19

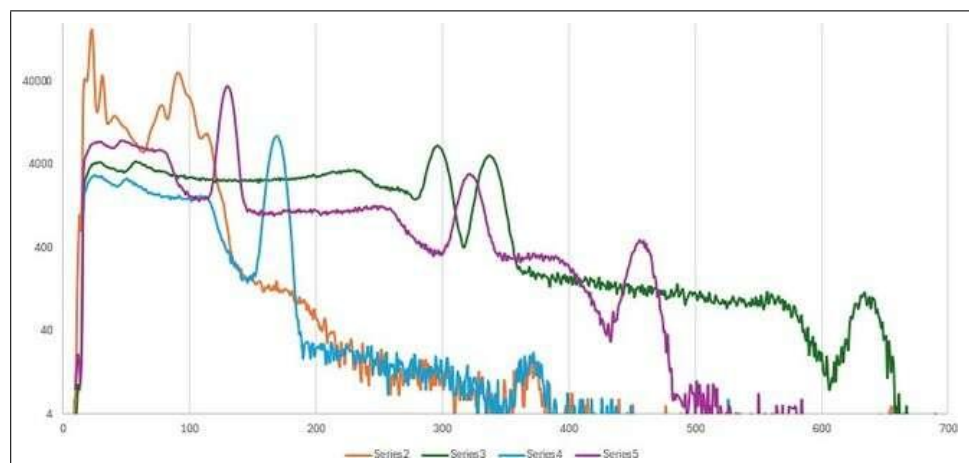
Visualización de los 5 espectros (Am-241, Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 3"x3" después de la puesta a punto



Nota. Hecho en el software MC²Analyzer. Realizado por el autor.

Figura 20

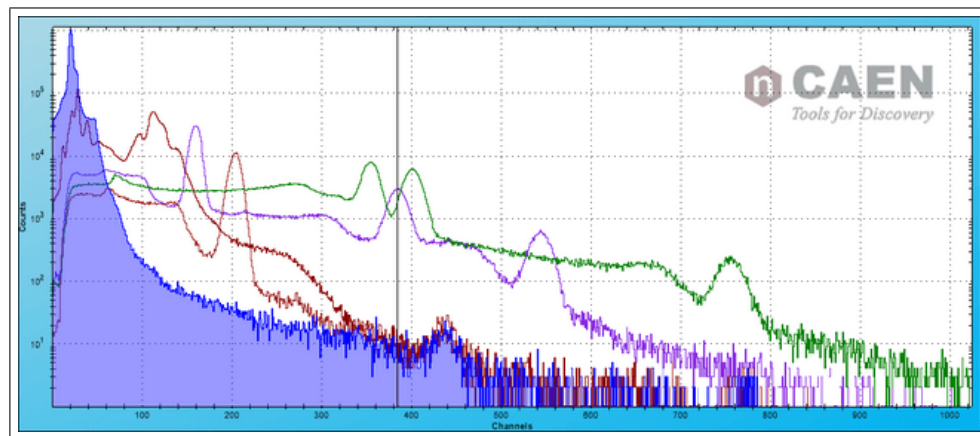
Visualización de los 4 espectros (Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 1,5"x1,5" después de la puesta a punto



Nota. Realizado por el autor en Excel.

Figura 21

Visualización de los 5 espectros (Am-241, Ba-133, Na-22, Cs-137 y Co-60) del detector 2"x2" después de la puesta a punto

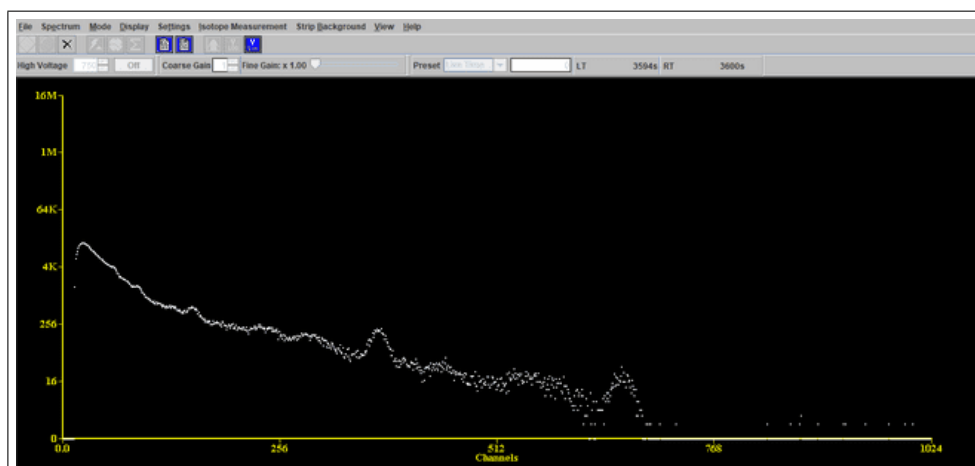


Nota. Hecho en el software MC²Analyzer. Realizado por el autor.

- *Radiación de fondo ambiental.* Es recomendable llevar a cabo la detección de radiación externa a la muestra con el objetivo de identificar posibles interferencias y descontarlas de la medición. Se presenta el fondo del laboratorio del detector de 1,5"x1,5" durante una hora el 6 de diciembre de 2023.

Figura 22

Visualización de la radiación de fondo ambiental en el laboratorio UNFV



Nota. Hecho en el software UCS-30. Realizado por el autor.

3.6.3 Toma de datos de las fuentes radiactivas variando su distancia

Para la puesta a punto del equipo de espectrometría gamma, se procedió a variar la distancia de las fuentes radiactivas con paso de 1 cm hasta los 10 cm, siendo el tiempo real (Real time - RT) 300 segundos para todos los espectros. Además, para el detector 3"x3" se realizó con un blindaje de plomo, en cambio para los otros detectores se tomó los datos sin blindaje.

Figura 23

Visualización de la variación de la distancia en el detector 2"x2"

**Figura 24**

Visualización de la variación de la distancia en el detector 1,5"x1,5"



Figura 25

Visualización de la variación de la distancia en el detector 3"x3"



3.6.4 Actividad final de las fuentes radiactivas

Se calcularon las actividades finales de todas las fuentes radiactivas utilizadas en este trabajo de tesis de acuerdo a su fecha de trabajo, se tomaron las ecuaciones dadas en 2.2 y 2.4. Además se tomaron datos del periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) de *Live Chart of Nuclides > Decay radiation* del International Atomic Energy Agency (IAEA).

Se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 4

Datos considerados y calculados para el detector 1,5"x1,5"

Datos	Ba-133	Cs-137	Na-22	Co-60
Actividad inicial (μCi)	1	0,25	1	1
$T_{1/2}$ (años)	10,5	30,08	2,6	5,27
λ (1/años)	0,066	0,023	0,0267	0,132
Tiempo Activo (años)	5,247	5,17	5,286	5,247
Actividad final (μCi)	0,7072	0,2219	0,2443	0,5015

Tabla 5

Datos considerados y calculados para el detector 2"x2"

Datos	Am-241	Ba-133	Cs-137	Na-22	Co-60
Actividad inicial (μCi)	10	1	0,25	1	1
$T_{1/2}$ (años)	432,6	10,5	30,08	2,6	5,27
λ (1/años)	0,0016	0,066	0,023	0,0267	0,132
Tiempo Activo (años)	17,572	5,475	5,406	5,575	5,49
Actividad final (μCi)	9,7224	0,6967	0,2207	0,2262	0,4857

Tabla 6

Datos considerados y calculados para el detector 3"x3"

Datos	Am-241	Ba-133	Cs-137	Na-22	Co-60
Actividad inicial (μCi)	10	1	0,25	1	1
$T_{1/2}$ (años)	432,6	10,5	30,08	2,6	5,27
λ (1/años)	0,0016	0,066	0,023	0,0267	0,132
Tiempo Activo (años)	17,22	5,4	5,053	5,514	5,14
Actividad final (μCi)	9,7278	0,7001	0,2225	0,2299	0,5086

3.6.5 Cálculo de las eficiencias experimentales

Se halló las eficiencias para cada detector, por ello es necesario conocer los parámetros expresados en la ecuación 2.16. El número de cuentas netas del fotopico (N_n) se calculó mediante GENIE2000, el tiempo real (t_r) se deriva de la toma de data y la probabilidad de emisión de energía (I) se extrajo de *Live Chart of Nuclides > Decay radiation* del International Atomic Energy Agency (IAEA).

Se detalla en los siguientes cuadros el t_r e I :

Tabla 7

Datos considerados para el cálculo de eficiencia

Datos	Am-241	Ba-133	Cs-137	Na-22	Co-60
Tiempo real (s)	300,002	300,002	300,002	300,002	300,002
I (Decimal)	0,359	0,6205	0,851	0,9994	0,9985 (1173,2keV) 0,999826 (1332,5keV)

Para el cálculo de número de cuentas netas (N_n), se toman como referencia las recomendaciones dadas en la norma 11929:2010(E) desarrollada por el comité técnico ISO/TC 85 de la International Organization for Standardization (ISO, 2010), donde se establecen los límites que deben considerarse. Líneas abajo se presenta un extracto referido a los límites.

La región B comprende todos los canales pertenecientes a la línea y tiene el contenido total, n_g , y el ancho, t_g . Si la forma de la línea se puede asumir como una curva gaussiana con el ancho total, h , a la mitad del máximo, si las fluctuaciones de la asignación de canales no pueden ser excluidos o el fondo no domina, por ejemplo, con líneas pronunciadas, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- $h \approx \text{FWHM}$

- $t_g \approx 2,5 \cdot h$

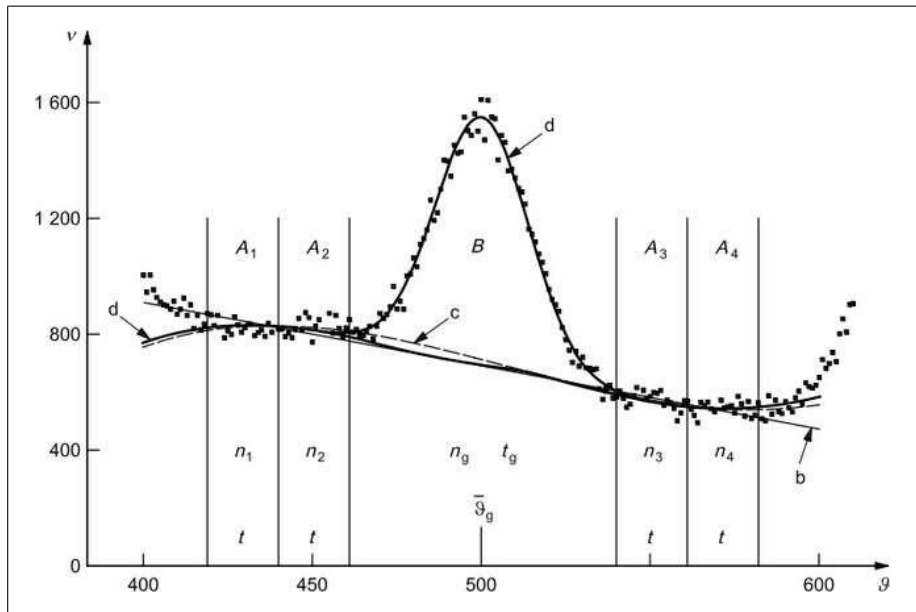
En caso de fondo dominante, la anchura más favorable:

- $t_g \approx 1,2 \cdot h$

(ISO, 2010, p. 27).

Figura 26

Disposiciones de las regiones para el fotopico



Nota: Tomado de ISO (2010, p. 28).

3.6.6 *Transferencia de eficiencia*

Hecho el cálculo de las eficiencias experimentales, se procedió mediante el software ETNA a hallar la transferencia de eficiencia, para este trabajo de tesis se tomó como eficiencia de referencia la distancia más cercana al detector (0,25cm), seguidamente se procedió con la transferencia de eficiencia desde 1 cm hasta 10 cm para hacer la comparación con las eficiencias experimentales.

Se consideró las especificaciones técnicas de los tres detectores utilizados para poder introducirlos en la sección *Calibración propiedades geométricas*. Se muestra las especificaciones para el detector NaI(Tl) de 3"x3".

Figura 27

Especificaciones técnicas del detector 3"x3"

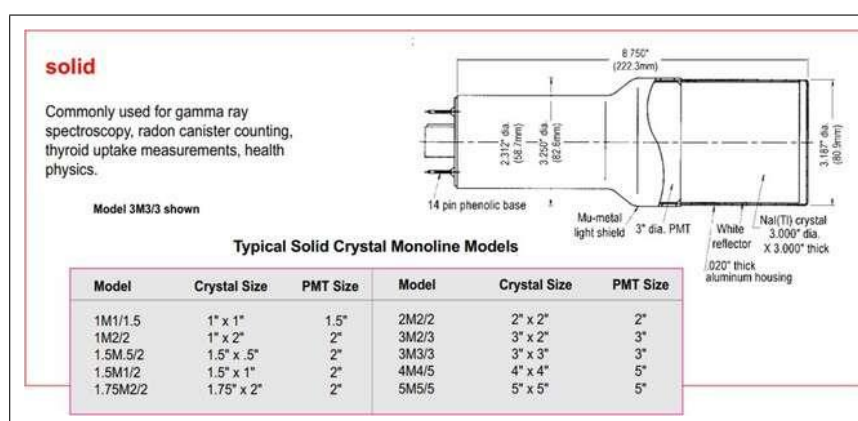


Figura 28

Propiedades geométricas del detector - ETNA

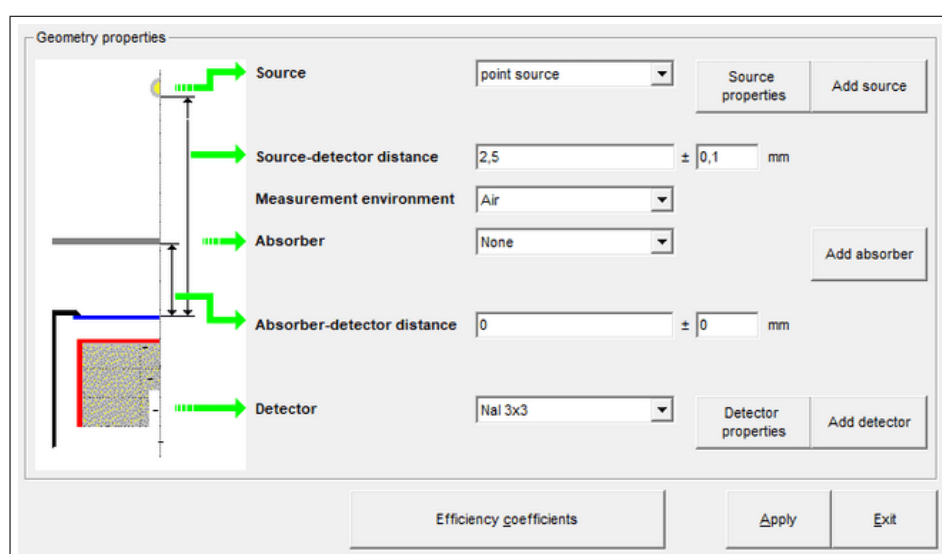


Figura 29

Ingreso de las eficiencias experimentales - ETNA

Efficiency coefficients

- Full energy peak efficiency origin

☒ Manual input ☐ Function applying ☐ Data import

Function properties

File import

Energy	Efficiency
59,5000	6,86E-02
356,0000	5,92E-02
661,6000	7,86E-02
1173,2000	1,98E-02
1274,5000	2,28E-02
1332,5000	1,85E-02

OK Exit

3.7 Análisis de datos

Los espectros gamma de diversas fuentes radiactivas, así como los tiempos muerto y vivo, fueron recolectados y procesados utilizando un software especializado. Este proceso permitió la visualización en tiempo real de los datos, de los cuales se generará una base de datos. A partir de estos espectros, se determinaron los centroides de los fotopicos, el ancho a media altura (FWHM), las curvas de calibración y el conteo respectivo a través del programa GENIE2000.

Las medidas de tiempo muerto se analizaron a través de una gráfica, luego se procedió a visualizar el comportamiento que tiene con respecto a los picos suma.

Las medidas de tiempo muerto se analizaron a través de una gráfica, luego se procedió a visualizar el comportamiento que tiene con respecto a los picos suma.

Respecto a las curvas de eficiencia, se estimó su comportamiento desde bajas a altas energías y se compararon estas tres curvas experimentales para determinar cual tiene mayor eficiencia.

Respecto a la transferencia de eficiencia se calcularon mediante el software ETNA, donde se tomaron una eficiencia origen y las especificaciones técnicas del equipo.

Por último, para la comparación de las eficiencias simuladas por transferencia y las experimentales se utilizó el porcentaje de error para determinar si tienen un margen aceptable de confiabilidad.

IV. RESULTADOS

4.1 Curvas de calibración

Se hallaron las curvas de calibración de canales en energía para cada detector arrojando lo siguiente:

Para el detector 1,5"x1,5"

$$E(keV) = -5,532 \cdot 10^{-5} \cdot Canal^2 + 3,999 \cdot Canal + 0,5436 \quad (4.1)$$

Para el detector 2"x2"

$$E(keV) = 3,662 \cdot 10^{-4} \cdot Canal^2 + 3,187 \cdot Canal - 4,365 \quad (4.2)$$

Para el detector 3"x3"

$$E(keV) = 4,111 \cdot 10^{-4} \cdot Canal^2 + 3,939 \cdot Canal - 7,588 \quad (4.3)$$

Figura 30

Calibración de energías del espectro total 1,5"x1,5" utilizando GENIE2000

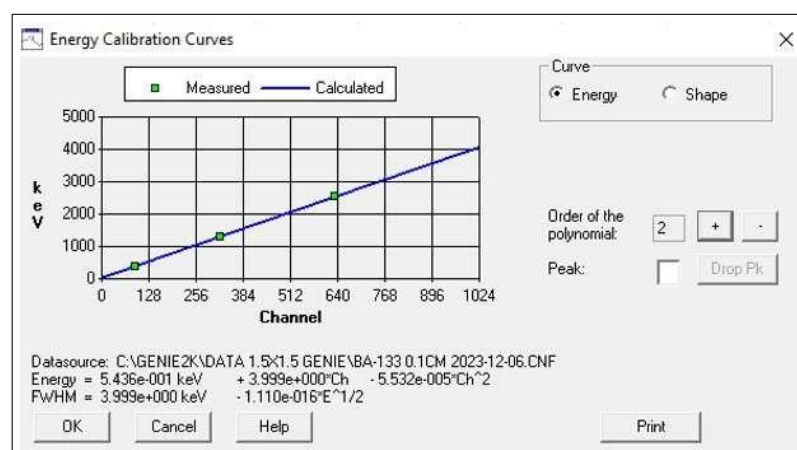
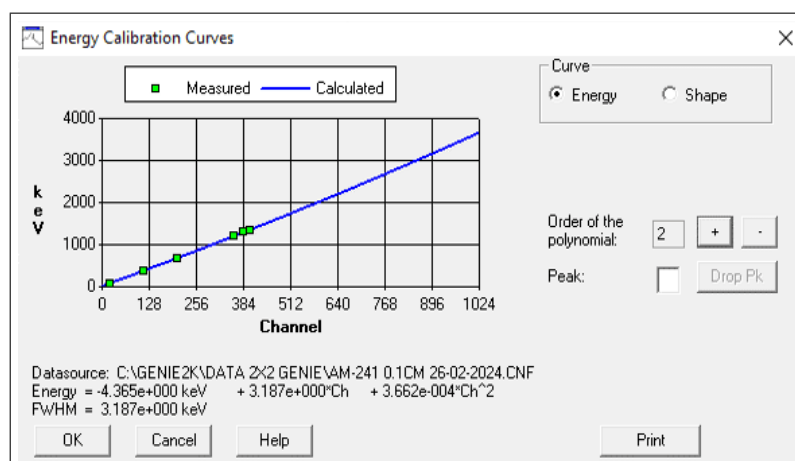
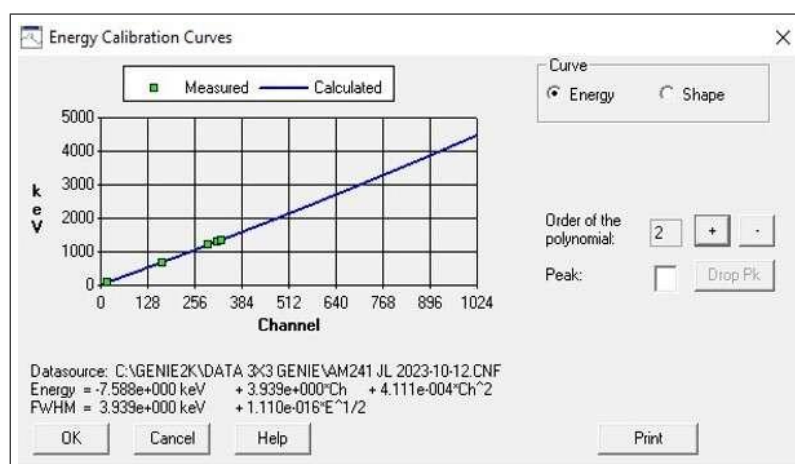


Figura 31

Calibración de energías del espectro total 2"x2" utilizando GENIE2000

**Figura 32**

Calibración de energías del espectro total 3"x3" utilizando GENIE2000



4.2 Tiempo muerto

De los datos de dos fuentes de Cs-137 se halló el tiempo muerto para el detector 3"x3". Se utilizaron las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.13 y 2.14, donde se obtuvo:

$$\tau = 1,95 \mu s$$

4.3 Tiempo real, Tiempo no disponible para la toma de datos y tiempo vivo

Se detalló los tiempos de adquisición total (tiempo real - RT), tiempos disponibles para la toma de datos (tiempo vivo - LT) y los tiempos no disponibles para la toma de datos (DT) del tiempo de adquisición total.

Además, los picos suma para los espectros disminuye al alejar las fuentes radiactivas del detector, esto influye mucho el tiempo muerto de la adquisición de datos ya que se visualiza que decrecen hasta un límite que depende de la electrónica del equipo. De los datos experimentales tenemos este reporte para el Na-22:

Tabla 8

Datos experimentales del tiempo vivo, Tiempo no disponible para la toma de datos y tiempo real para el Na-22

Distancia (cm)	Dimensiones del cristal								
	1,5"x1,5"			2"x2"			3"x3"		
	LT (s)	DT (s)	RT (s)	LT (s)	DT (s)	RT (s)	LT (s)	DT (s)	RT (s)
0,25	287,5	12,5	300	297,811	2,190	300,001	286,136	13,866	300,002
1	292,03	7,97	300	298,375	1,626	300,001	290,101	9,900	300,001
2	295,05	4,95	300	298,805	1,197	300,002	292,255	7,747	300,002
3	296,7	3,3	300	299,028	0,973	300,001	294,253	5,749	300,002
4	297,48	2,52	300	299,131	0,870	300,001	295,493	4,508	300,001
5	298,07	1,93	300	299,185	0,817	300,002	295,966	4,035	300,001
6	296,36	1,64	300	299,140	0,862	300,002	296,555	3,446	300,001
7	298,64	1,36	300	299,190	0,811	300,001	297,134	2,867	300,001
8	298,78	1,22	300	299,156	0,846	300,002	297,176	2,825	300,001
9	298,9	1,1	300	299,165	0,837	300,002	297,433	2,569	300,002
10	298,99	1,01	300	299,046	0,956	300,002	297,497	2,504	300,001

Figura 33

Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 3"x3"

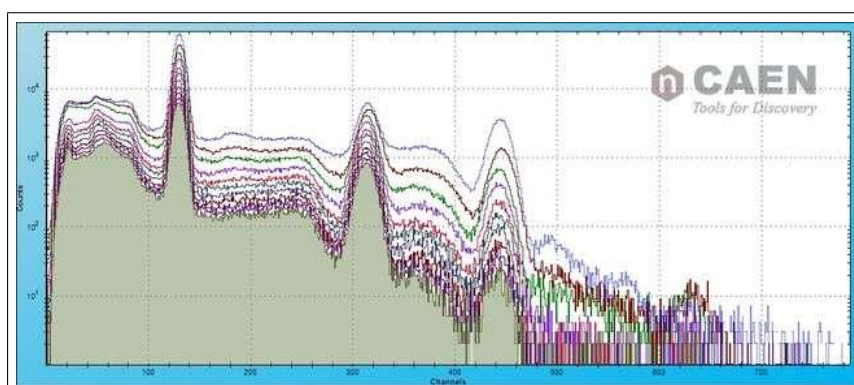
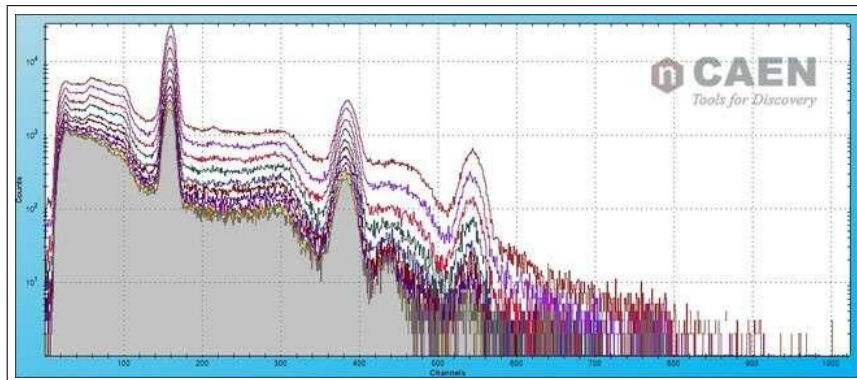
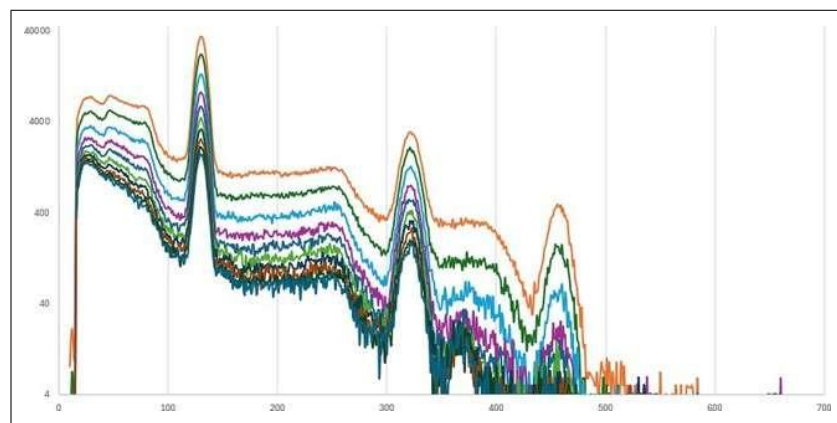


Figura 34

Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 2"x2"

**Figura 35**

Espectros variando la distancia desde 0,25cm hasta 10cm del Na-22 en el detector con cristal 1,5"x1,5"



4.4 Centroide del fotopico, Ancho a media altura (FWHM) y Número de cuentas (N_n)

Los espectros se analizaron mediante el software GENIE2000, se mostrarán algunas gráficas de los resultados, para ver con detalle todas las gráficas, vea el anexo.

Figura 36

Espectro del Am-241 a 0,25cm del detector con cristal 3"x3" y el ROI del fotopico

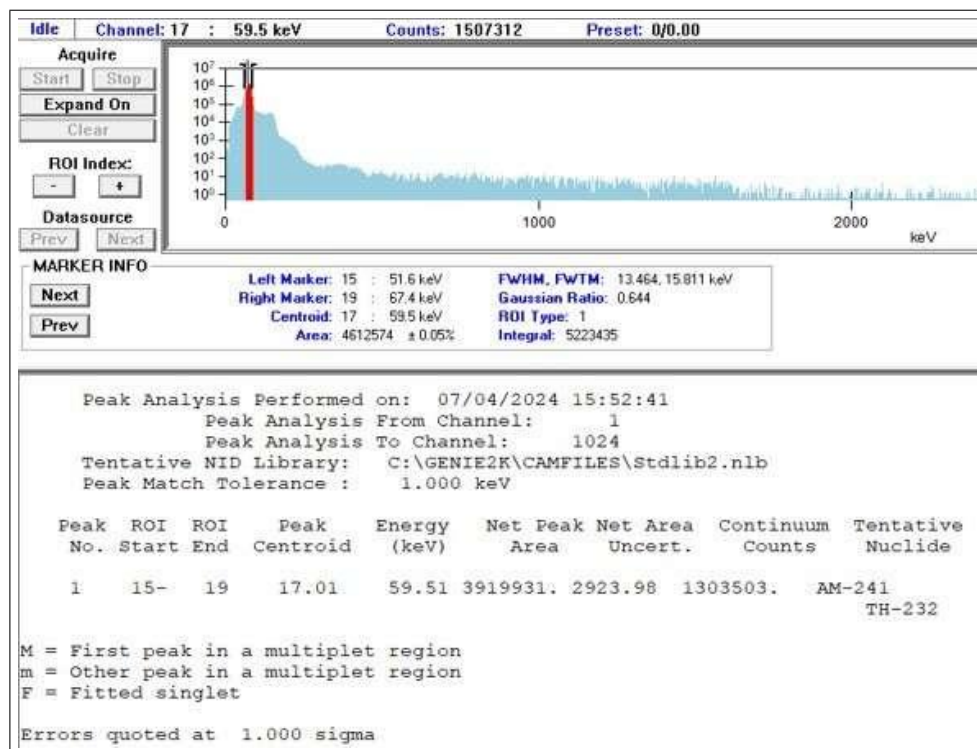


Figura 37

Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 1,5"x1,5" y el ROI del fotopico

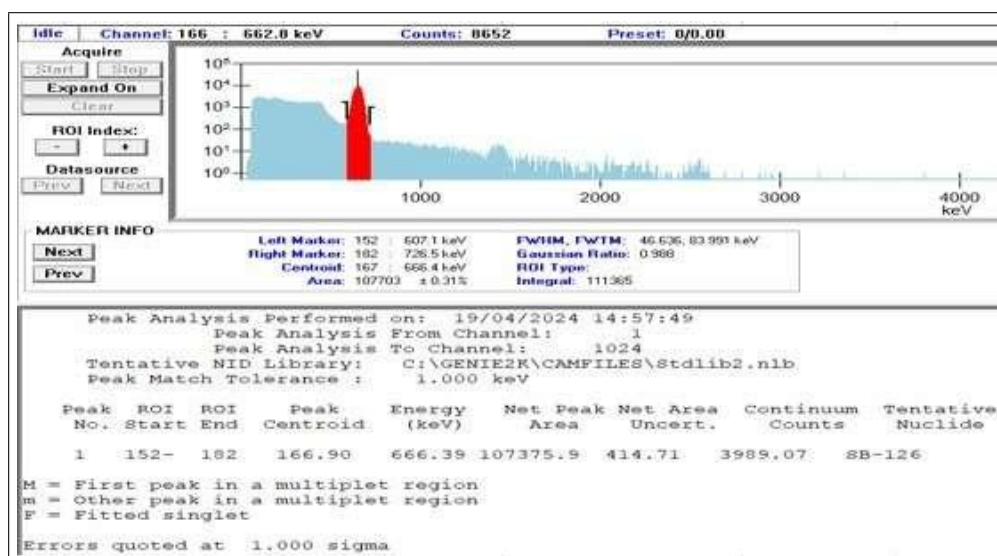


Figura 38

Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 2"x2" y el ROI del fotopico

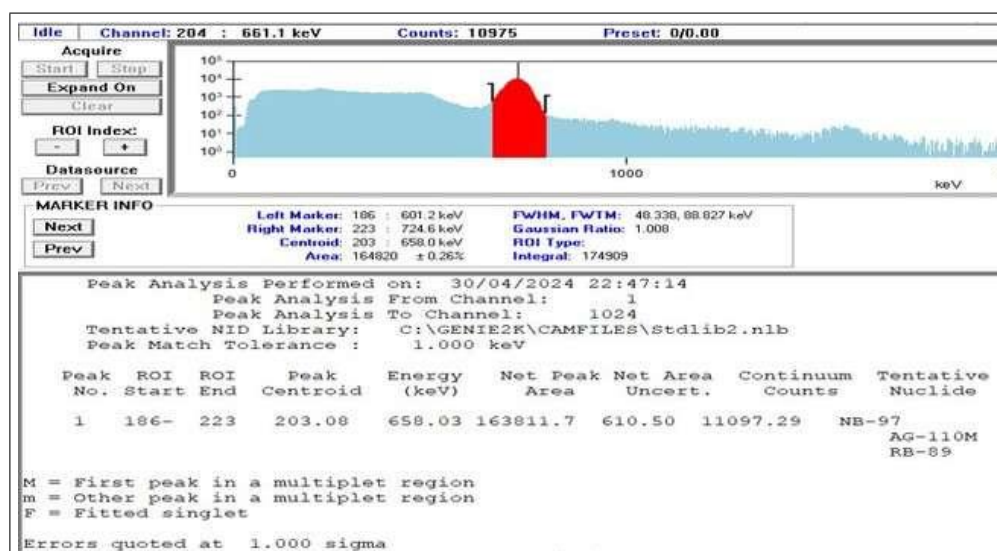


Figura 39

Espectro del Cs-137 a 0,25 cm del detector con cristal 3"x3" y el ROI del fotopico

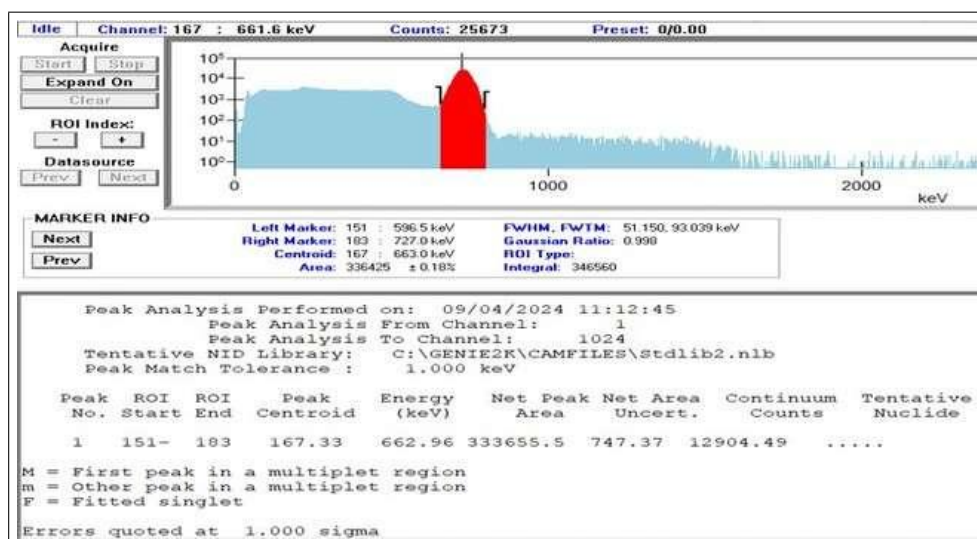
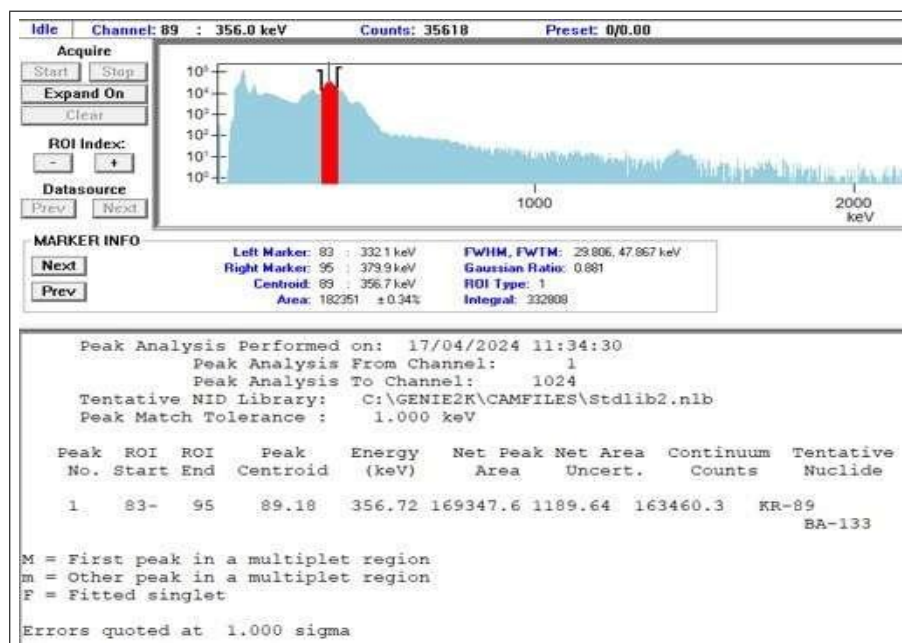


Figura 40

Espectro del Ba-133 a 1cm del detector con cristal 1,5"x1,5" y el ROI del fotopico



Se detalla en las siguientes tablas el número de cuentas netas (*Net Peak Area - N_n*) de todas las fuentes radiactivas (Villarreyes et al., 2023).

Nota. Am-241 (59,5 keV), Ba-133 (356 keV), Na-22 (1274,5 keV), Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173,2 keV y 1332,5 keV).

Tabla 9

Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 1,5"x1,5"

Distancia (cm)	Número de cuentas netas (N_n) cristal 1,5"x1,5"				
	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	259207,60	107375,90	47537,12	89183,55	82546,39
1	169347,60	63647,61	32202,09	54405,38	49854,75
2	121590,90	35108,93	20245,60	34128,93	31660,64
3	72955,64	21953,32	13119,26	20700,87	20180,53
4	50343,05	15433,54	9716,47	15388,54	13798,36
5	37562,56	10614,75	6510,01	10932,16	10112,09
6	29039,52	7986,00	5367,07	8131,71	7984,64
7	22238,34	6195,76	3794,86	6130,79	6041,26
8	18225,30	5256,53	3302,01	5710,54	4650,01
9	14618,37	3903,38	2647,19	4266,05	4052,73
10	12815,03	3421,92	2414,29	3452,34	3235,38

Tabla 10

Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 2"x2"

Distancia (cm)	Número de cuentas netas (N_n) cristal 2"x2"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	2659632	284270,1	163811,7	57304,32	106545,6	99413,09
1	2407280	225298,2	108476,4	44787,57	75863,9	76655,77
2	1725960	154952,1	65812,76	33529,85	54352,6	52646,18
3	1307737	115176,9	46265,63	25141,14	39570,25	38285,71
4	988176,30	88347,49	32193,87	17712,67	25502,05	26499,86
5	762410,30	69718,06	23757,52	13977,18	22258,52	20611,95
6	591391,30	53066,87	17841,09	10756,81	16605,20	15265,53
7	473742,70	41588,83	13963,66	8370,62	13781,03	12792,72
8	324138,9	30973,24	11193,62	6755,81	11468,42	10869,7
9	269156,00	25966,80	9277,94	6039,36	9482,51	8413,76
10	224033,50	22024,31	7593,70	5335,24	7367,98	7323,33

Tabla 11

Datos experimentales de las cuentas netas para el detector con cristal 3"x3"

Distancia (cm)	Número de cuentas netas (N_n) cristal 3"x3"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	3919931	554885,3	333655,5	96249,05	268755,2	233116,5
1	2658692	432513,2	198441,2	89798,01	195594,5	166769,7
2	1435084	341928	154748,1	72472,09	135993,2	121042,5
3	1057981	234368,2	108668,4	62106,68	98588,06	83445,27
4	815077,7	189971,1	80968,17	48361,12	72611,77	64975,53
5	659970,1	148518,4	62749,5	41441,37	56758,52	48804,63
6	509604,1	126411,8	47613,94	32593,67	45382,84	40429,98
7	344618,7	106379,8	37493,26	26700,05	38626,87	32974,45
8	276319,50	86846,44	31876,18	22554,35	30649,17	24333,31
9	231336,60	72672,40	26811,91	18518,70	24521,83	22346,11
10	194140,2	59052,09	22908,80	15946,39	21136,40	18169,38

4.5 Resolución vs Energías

Los espectros fueron analizados con GENIE2000, se procedió a modelar el comportamiento de su resolución energética en porcentaje (%) para la distancia 0,25 cm versus energía (keV) con lo manifestado en la ecuación 2.8 y se obtuvo:

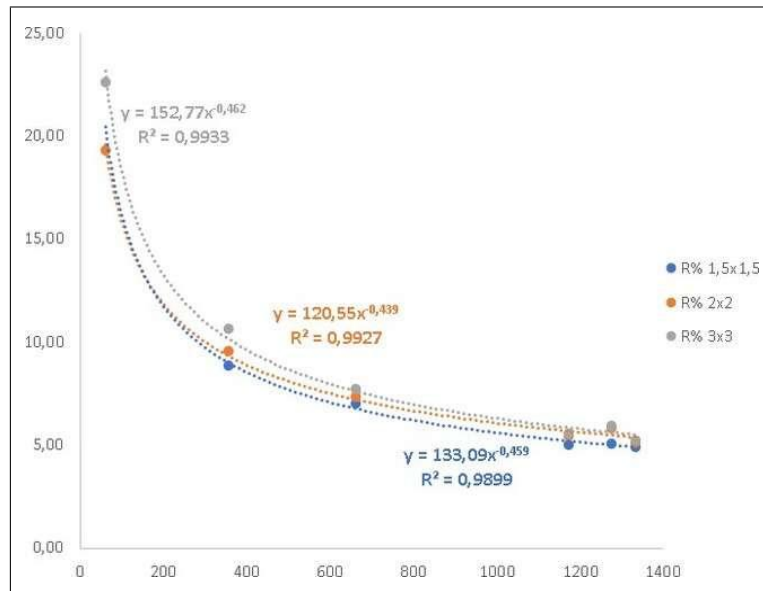
Tabla 12

Datos experimentales de las resoluciones

Energía (keV)	Resolución (%)		
	1,5"x1,5"	2"x2"	3"x3"
59,5	—	19,30	22,62
356	8,86	9,55	10,67
662	7,00	7,35	7,72
1173,2	5,03	5,45	5,58
1274,5	5,09	5,84	5,93
1332,5	4,91	5,13	5,26

Figura 41

Gráfica resolución (%) vs energía (keV)



4.6 Eficiencias experimentales

De lo expresado en la ecuación 2.16, tablas 2, 3,4 y 5, se obtienen los siguientes resultados:

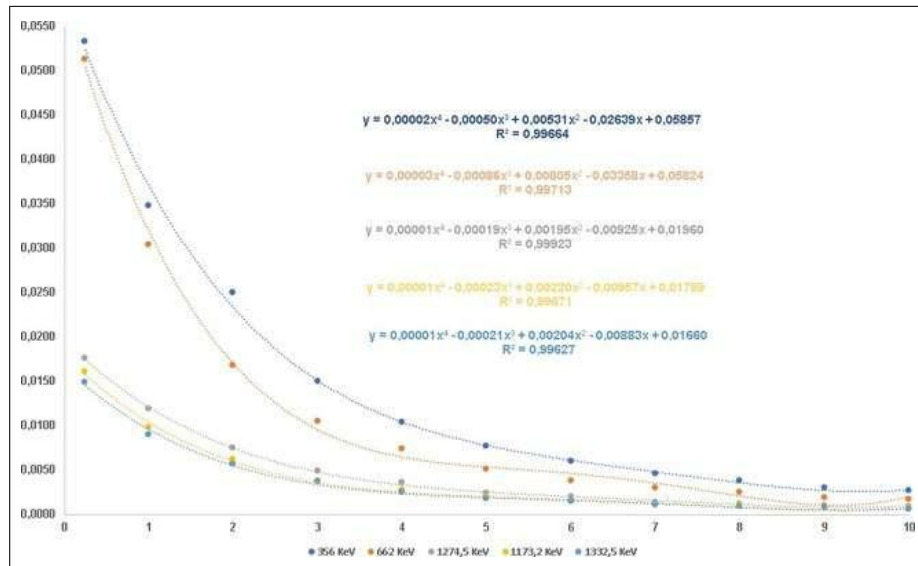
Tabla 13

Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 1,5"x1,5"

Distancia (cm)	Eficiencias (ε_e) del cristal 1,5"x1,5"				
	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	0,0532	0,0512	0,0160	0,0175	0,0148
1	0,0348	0,0304	0,0098	0,0119	0,0090
2	0,0250	0,0167	0,0061	0,0075	0,0057
3	0,0150	0,0105	0,0037	0,0048	0,0036
4	0,0103	0,0074	0,0028	0,0036	0,0025
5	0,0077	0,0051	0,0020	0,0024	0,0018
6	0,0060	0,0038	0,0015	0,0020	0,0014
7	0,0046	0,0030	0,0011	0,0014	0,0011
8	0,0037	0,0025	0,0010	0,0012	0,0008
9	0,0030	0,0019	0,0008	0,0010	0,0007
10	0,0026	0,0016	0,0006	0,0009	0,0006

Figura 42

Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 13

**Figura 43**

Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 13, variando las distancias

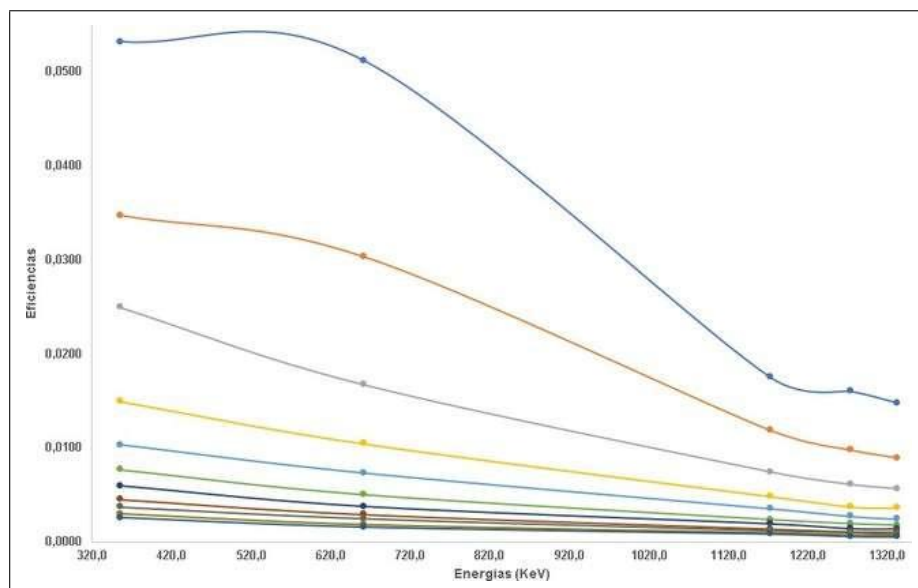


Tabla 14

Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 2"x2"

Distancia (cm)	Eficiencias (ε_e) del cristal 2"x2"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	0,0686	0,0592	0,0786	0,0198	0,0228	0,0185
1	0,0621	0,0470	0,0520	0,0141	0,0178	0,0142
2	0,0445	0,0323	0,0316	0,0101	0,0134	0,0098
3	0,0338	0,0240	0,0222	0,0074	0,0100	0,0071
4	0,0255	0,0184	0,0154	0,0047	0,0071	0,0049
5	0,0197	0,0145	0,0114	0,0041	0,0056	0,0038
6	0,0153	0,0111	0,0086	0,0031	0,0043	0,0028
7	0,0122	0,0087	0,0067	0,0026	0,0033	0,0024
8	0,0084	0,0065	0,0054	0,0021	0,0027	0,0020
9	0,0069	0,0054	0,0044	0,0018	0,0024	0,0016
10	0,0058	0,0046	0,0036	0,0014	0,0021	0,0014

Figura 44

Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 14

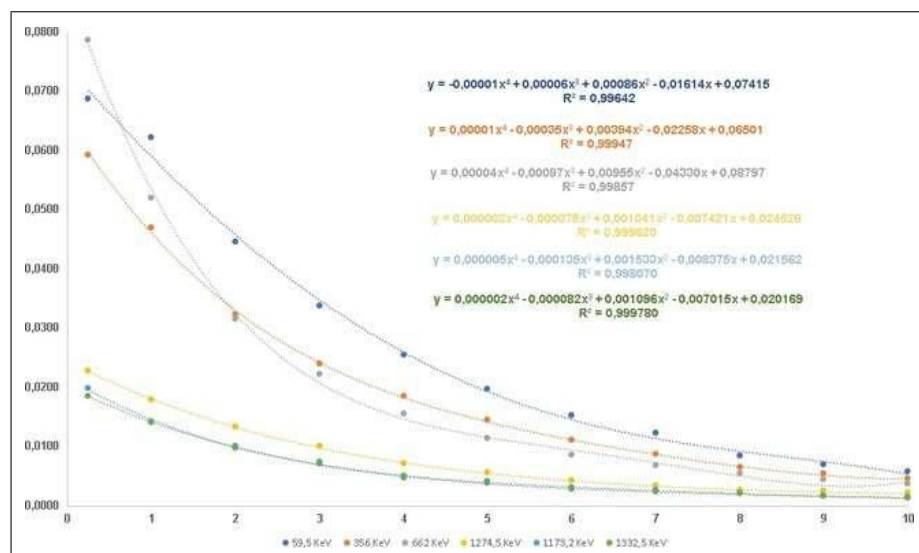


Figura 45

Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 14, variando las distancias

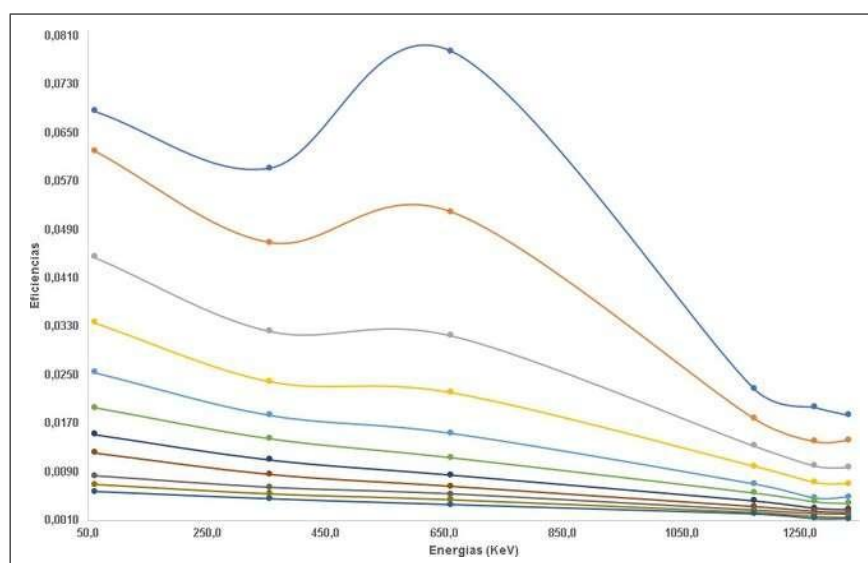


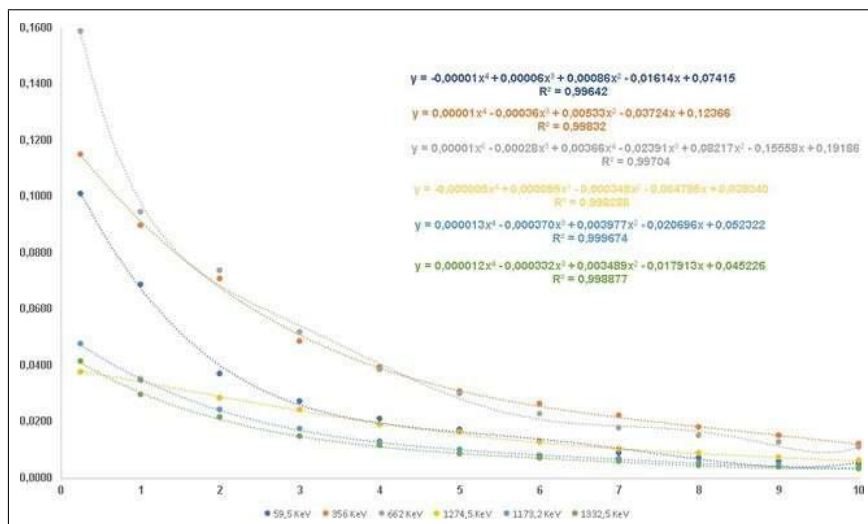
Tabla 15

Datos experimentales de las eficiencias para el detector con cristal 3"x3"

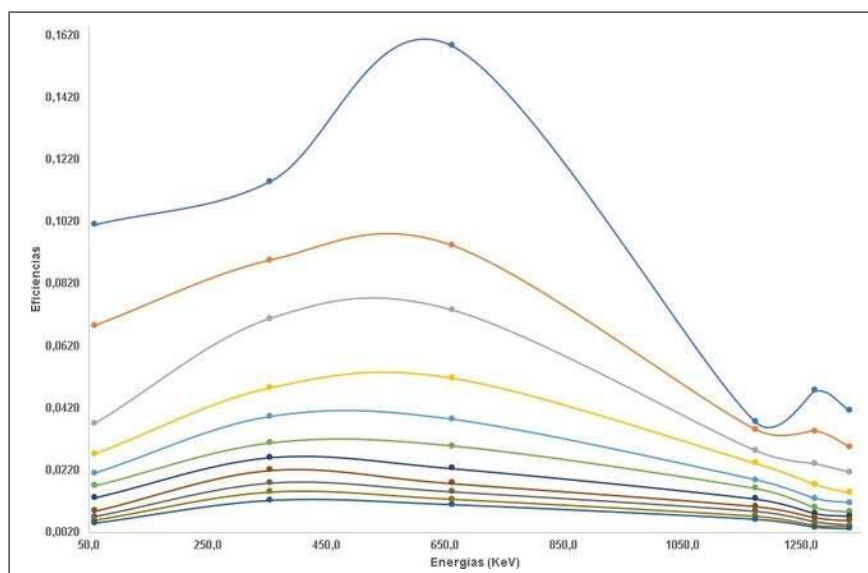
Distancia (cm)	Eficiencias (ε_e) del cristal 3"x3"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
0,25	0,1011	0,1151	0,1587	0,0477	0,0377	0,0414
1	0,0686	0,0897	0,0944	0,0347	0,0352	0,0296
2	0,0370	0,0709	0,0736	0,0241	0,0284	0,0215
3	0,0273	0,0486	0,0517	0,0175	0,0243	0,0148
4	0,0210	0,0394	0,0385	0,0129	0,0190	0,0115
5	0,0170	0,0308	0,0299	0,0101	0,0162	0,0087
6	0,0131	0,0262	0,0227	0,0081	0,0128	0,0072
7	0,0089	0,0221	0,0178	0,0069	0,0105	0,0058
8	0,0071	0,0180	0,0152	0,0054	0,0088	0,0043
9	0,0060	0,0151	0,0128	0,0043	0,0073	0,0040
10	0,0050	0,0122	0,0109	0,0037	0,0063	0,0032

Figura 46

Gráfica eficiencias vs distancias en centímetros de la tabla 15

**Figura 47**

Gráfica eficiencias vs energías de la tabla 15, variando las distancias



4.7 Transferencia de eficiencia y error relativo porcentual

Una vez obtenidos los datos experimentales, se tomó como eficiencia origen calibrado la distancia 0,25 cm. Se muestra los resultados de la transferencia mediante software ETNA.

Tabla 16

Datos simulados mediante transferencia eficiencia para el detector con cristal 1,5"x1,5"

Distancia (cm)	Transferencia de eficiencias cristal 1,5"x1,5"				
	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	0,03034	0,02931	0,01004	0,00920	0,00861
2	0,01706	0,01663	0,00572	0,00523	0,00491
3	0,01083	0,01064	0,00368	0,00336	0,00315
4	0,00745	0,00738	0,00256	0,00234	0,00220
5	0,00543	0,00541	0,00188	0,00172	0,00161
6	0,00413	0,00413	0,00144	0,00131	0,00124
7	0,00324	0,00325	0,00114	0,00104	0,00098
8	0,00261	0,00263	0,00092	0,00084	0,00079
9	0,00215	0,00217	0,00076	0,00069	0,00065
10	0,00180	0,00182	0,00064	0,00058	0,00055

Figura 48

Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 16

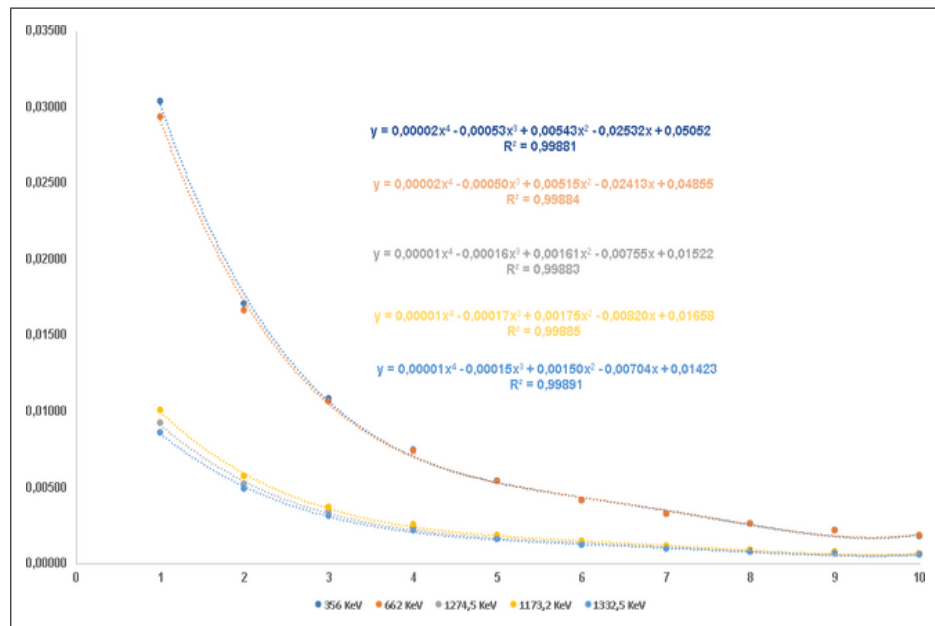


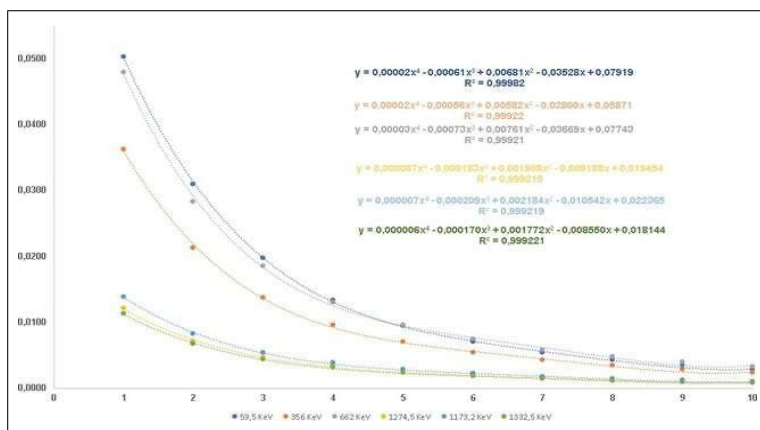
Tabla 17

Datos simulados mediante transferencia de eficiencia para el detector con cristal 2"x2"

Distancia (cm)	Transferencia de eficiencias cristal 2"x2"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	0,0503	0,0362	0,0479	0,0139	0,0121	0,0113
2	0,0310	0,0213	0,0284	0,0083	0,0072	0,0067
3	0,0198	0,0138	0,0185	0,0054	0,0047	0,0044
4	0,0133	0,0096	0,0130	0,0038	0,0033	0,0031
5	0,0095	0,0070	0,0096	0,0028	0,0025	0,0023
6	0,0070	0,0054	0,0074	0,0022	0,0019	0,0018
7	0,00537	0,00422	0,0058	0,0017	0,0015	0,0014
8	0,0042	0,0034	0,0047	0,0014	0,0012	0,0011
9	0,0034	0,0028	0,0039	0,0012	0,0010	0,0009
10	0,0028	0,0024	0,0033	0,0010	0,0009	0,0008

Figura 49

Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 17

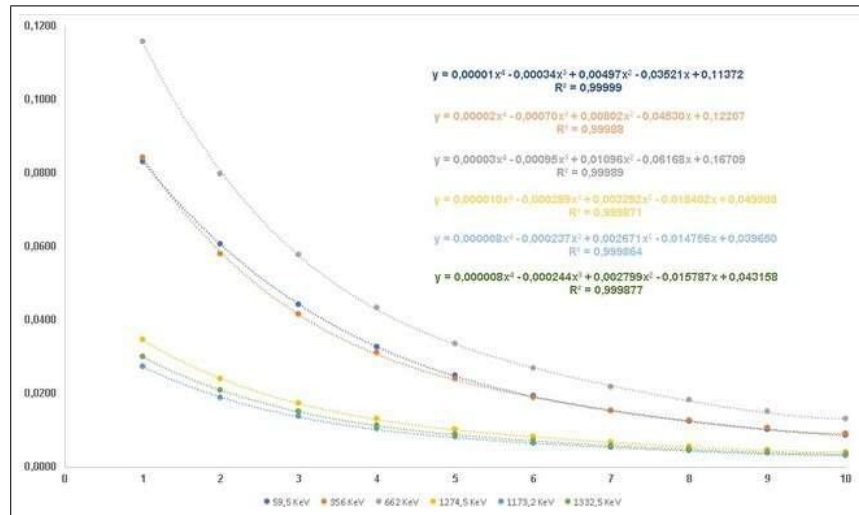
**Tabla 18**

Datos simulados mediante transferencia de eficiencia para el detector con cristal 3"x3"

Distancia (cm)	Transferencia de eficiencias cristal 3"x3"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	0,0831	0,0843	0,1157	0,0274	0,0346	0,0300
2	0,0607	0,0579	0,0798	0,0189	0,0239	0,0208
3	0,0442	0,0416	0,0577	0,0137	0,0174	0,0151
4	0,0327	0,0310	0,0433	0,0104	0,0131	0,0114
5	0,0248	0,0239	0,0336	0,0081	0,0102	0,0089
6	0,0193	0,0189	0,0268	0,0065	0,0082	0,0071
7	0,01534	0,01528	0,0218	0,0053	0,0067	0,0058
8	0,0124	0,0126	0,0181	0,0044	0,0055	0,0048
9	0,0103	0,0106	0,0152	0,0037	0,0047	0,0041
10	0,0086	0,0090	0,0130	0,0032	0,0040	0,0035

Figura 50

Gráfica eficiencias simuladas vs distancias en centímetros de la tabla 18



Del error relativo porcentual, ecuación 2.19, comparando los datos experimentales y simulados desde 1cm resulta:

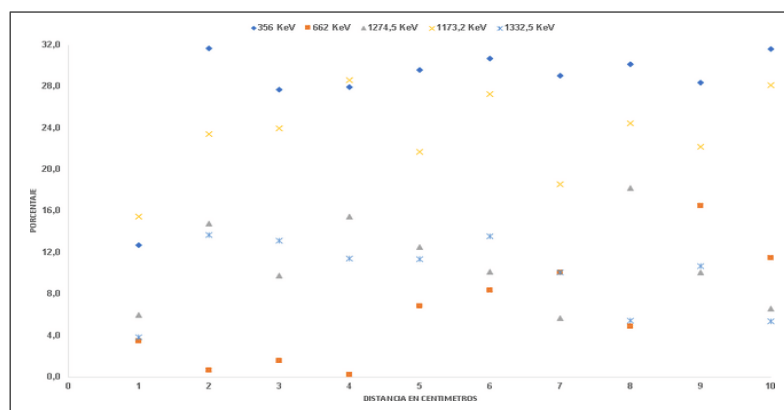
Tabla 19

Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 1,5"x1,5"

Distancia (cm)	Error relativo porcentual (E_R) cristal 1,5"x1,5"				
	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	12,7	3,5	15,5	6,0	3,9
2	31,7	0,7	23,4	14,8	13,7
3	27,7	1,6	24,0	9,8	13,1
4	27,9	0,2	28,6	15,5	11,5
5	29,6	6,8	21,7	12,5	11,4
6	30,7	8,4	27,3	10,2	13,6
7	29,0	10,1	18,6	5,7	10,1
8	30,2	4,9	24,5	18,2	5,4
9	28,4	16,5	22,2	10,1	10,7
10	31,6	11,5	28,1	6,6	5,4

Figura 51

Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 19

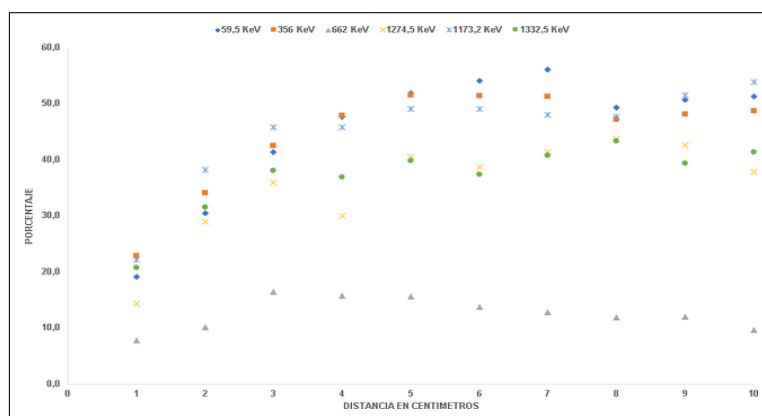
**Tabla 20**

Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 2"x2"

Distancia (cm)	Error relativo porcentual (E_R) cristal 2"x2"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	19,1	22,9	7,9	22,2	14,3	20,8
2	30,5	34,1	10,2	38,2	29,0	31,5
3	41,4	42,5	16,5	45,8	36,0	38,1
4	47,7	47,9	15,8	45,8	30,0	36,9
5	51,9	51,6	15,7	49,1	40,6	39,9
6	54,1	51,5	13,8	49,0	38,6	37,4
7	56,1	51,3	12,9	48,0	41,4	40,7
8	49,4	47,2	11,9	47,7	43,7	43,3
9	50,8	48,1	12,1	51,5	42,7	39,3
10	51,3	48,7	9,7	53,9	37,9	41,3

Figura 52

Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 20

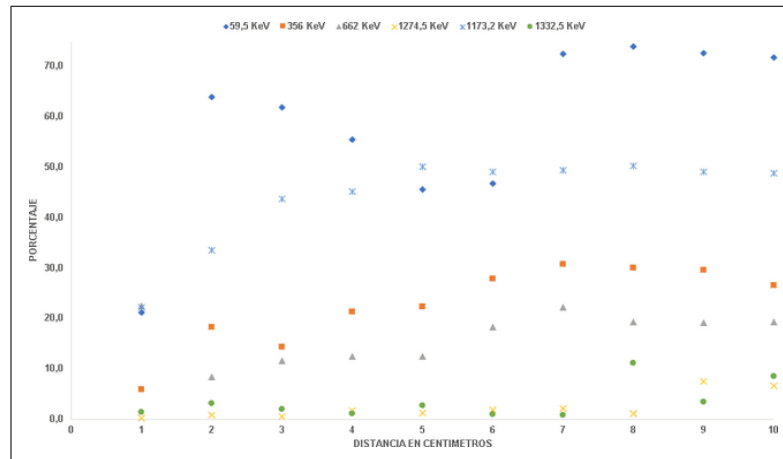
**Tabla 21**

Error relativo porcentual de la comparación experimental - simulación para el detector con cristal 3"x3"

Distancia (cm)	Error relativo porcentual (E_R) cristal 3"x3"					
	59,5 keV	356 keV	662 keV	1274,5 keV	1173,2 keV	1332,5 keV
1	21,2	6,0	22,6	22,2	0,3	1,4
2	64,0	18,3	8,4	33,5	0,9	3,1
3	62,0	14,4	11,6	43,7	0,5	2,0
4	55,5	21,3	12,4	45,1	1,7	1,1
5	45,7	22,4	12,6	50,1	1,3	2,8
6	46,8	27,9	18,3	49,1	1,9	1,0
7	72,6	30,7	22,2	49,4	2,2	0,8
8	74,0	30,0	19,4	50,2	1,2	11,2
9	72,6	29,7	19,2	49,0	7,6	3,4
10	71,7	26,5	19,3	48,8	6,7	8,6

Figura 53

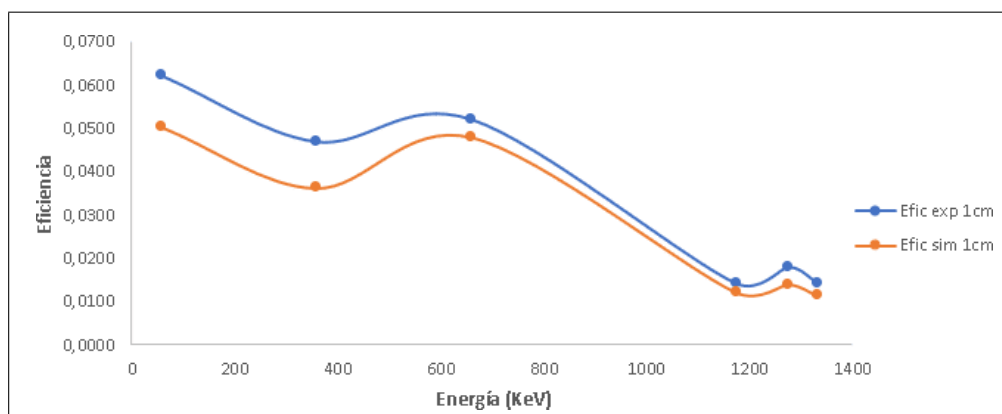
Gráfica error porcentual vs distancias en centímetros de la tabla 21



Se presenta una comparación gráfica de algunos datos del detector 2"x2" entre las eficiencias experimentales y simuladas.

Figura 54

Comparación grafica de eficiencias en el detector 2"x2" a 1 cm de las tablas 14 y 17



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta investigación, los datos obtenidos están dentro del rango comparado con los valores en el trabajo de El Hamli et al. (2022), ellos encontraron para el detector 1,5"x1,5" que la resolución va desde un 14 % hasta 4,5 %, mientras los datos de resolución presentados en esta investigación van 9 % hasta 4,9 % aproximadamente; para el de 2"x2" los datos están fuera de rango ya que ellos encontraron valores desde un 11,9 % hasta 4,8 % y el de 3"x3" de igual forma los datos están fuera, va desde un 11,2 % hasta 4,0 %.

En el caso de la eficiencia, los autores encontraron que para el 1,5"x1,5" los valores están en el rango de 0,051 hasta 0,004 que está acorde con lo encontrado en este trabajo de tesis para 0,25 cm que va desde 0,0532 hasta 0,0148; en el caso del 2"x2" los autores encontraron valores que están entre 0,064 y 0,01 que está acorde con lo encontrado en este trabajo de tesis para 0,25 cm que va desde 0,0686 hasta 0,0185, en el de 3"x3" se encontró valores fuera de rango, los autores encontraron datos que están entre 0,084 y 0,018 mientras que en este trabajo de tesis va desde 0,1011 hasta 0,0414. Por otro lado, los valores están fuera del rango con los datos obtenidos por Casanovas et al. (2013), para el centellador de 2"x2", encontraron una resolución que va desde el 9 % hasta el 5,2 %. Y finalmente nuestros valores están en el rango, con los datos obtenidos por Pilakouta et al. (2018), para la eficiencia de un 3"x3", obtuvieron valores desde 0,15 hasta 0,038.

Para la transferencia de eficiencia mediante ETNA, los resultados están en mayor parte excediendo el 10% del error relativo porcentual, como los casos para la energía 662 keV del Cs-137 la diferencia porcentual entre la eficiencia experimental y simulada va en el rango de 0,2% hasta 22,2% que contrastado con el artículo Lepy et al. (2001) va de acorde al margen de los resultados reportados, cabe recalcar que los autores analizaron en detectores de Germanio Hiperpuro mientras que el presente trabajo se hizo en detectores de NaI(Tl).

El error relativo porcentual en algunos casos tiene una tendencia a crecer con la distancia. Sin embargo, generalmente presenta saltos ascendentes y descendentes, influye el tiempo de vida de la fuente al momento de la calibración, condiciones de calibración y además ETNA realiza el cálculo para una geometría de detector de fuente cilíndrica coaxial dada y considera un detector que contiene un vacío, en contraste con toma experimental que el medio fue aire.

VI. CONCLUSIONES

6.1. Se comprueba en las gráficas que la mejor resolución la tiene el detector de 1,5"x1,5" seguido del 2"x2" y al final 3"x3". Mientras el pico sea más estrecho tendrá mejor resolución. Para las eficiencias se corrobora que para todo el rango excepto para la fuente del Am-241 que a partir de 2cm el detector 2"x2" con respecto al 3"x3" tiene una mejor eficiencia. La forma del espectro y su disposición del Am-241, además de los parámetros introducidos en el software influyen, ya que para el detector 3"x3" se visualiza que su FWHM está más próximo en canales y no engloba una mayor área.

6.2. Se corrobora además que la eficiencia del detector de tamaño cristal 1,5"x1,5" es menor en todo su rango a los detectores 2"x2" y 3"x3".

6.3. De los resultados obtenidos, en los detectores de 1,5"x1,5", 2"x2" y 3"x3" la eficiencia será mayor en el detector que tenga mayor dimensión del cristal centellador. Dado que la amplitud relativa de los picos y su distribución depende de la radiación incidente y de las dimensiones del cristal. Cuanto mayor sea las dimensiones del cristal, más se destacará el fotopico sobre el resto de la distribución (más cuentas). Se utilizaron fuentes radiactivas con cercana fecha de fabricación. La eficiencia llega a un pico máximo y comienza a descender.

6.4. Se observa que la eficiencia depende también de la actividad de las fuentes radiactivas. Ya que si escogemos una fuente con un tiempo de vida muy largo comparado con su tiempo de vida media influirá en el número de cuentas y por ende en la eficiencia. Cabe resaltar que se visualizará este efecto mejor utilizando un mismo tiempo real (RT) de recuento con las fuentes radiactivas.

6.5. En el detector 3"x3" se observó un salto abrupto en las eficiencias del Co-60 con respecto al Na-22 y es debido a que detectó más cuentas para el Co-60, ya que se puede constatar según los datos experimentales que la eficiencia del Na-22 también aumentó respecto a los otros detectores de 1,5"x1,5" y 2"x2".

6.6. Los picos suma de los espectros disminuye al alejar las fuentes radiactivas del detector, esto influye mucho en el tiempo muerto del equipo.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Se recomienda tomar los datos con un detector que contiene vacío desde la fuente al detector para evitar la interacción de la radiación con el aire y evitar la absorción que pueda haber.

7.2. Realizar las mediciones con fuentes radioactivas más activas, que no excedan su tiempo de vida media ya que con esto tendríamos picos más altos en el detector de NaI.

7.3. Utilizar la fuente radiactiva Europio-152 (Eu-152) de referencia en los tres detectores debido a sus abundantes fotopicos para poder iniciar con la puesta a punto de la cadena gamma. Para la transferencia de eficiencia mediante ETNA, se recomienda elegir otras eficiencias origen, por ejemplo 1 cm o 2 cm y analizar si existe un cambio relevante en el error relativo porcentual.

7.4. Se sugiere utilizar otros tipos de geometría, tanto de las fuentes radioactivas como de los detectores de NaI.

7.5. Se propone utilizar un detector de Germanio Hiperpuro para un mejor análisis y discriminación de los fotopicos de radiación gamma.

VIII. REFERENCIAS

- Canberra. (2013). *Genie 2000 operations manual*. Canberra Industries.
- Casanovas, R., Morant, J. y Salvadó, M. (2013). Implementation of gamma-ray spectrometry in two real-time water monitors using NaI(Tl) scintillation detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 80, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.06.003>
- Condori Alvarado, A. E. (2019). *Caracterización de eficiencia de detección de sistemas de espectrometría gamma con detector CZT compacto para uso en medicina nuclear y PET, por medio de modelado Montecarlo* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Cuyo.
- Demir, D., Un, A. y Sahin, Y. (2008). Efficiency determination for NaI(Tl) detectors in the 23 keV to 1333 keV energy range. *Instrumentation Science & Technology*, 36(3), 291–301. <https://doi.org/10.1080/10739140801944092>
- Demir, N. y Kuluöztürk, Z. N. (2021). Determination of energy resolution for a NaI(Tl) detector modeled with FLUKA code. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(11), 3759–3763. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.05.017>
- El Hamli, A., Bazza, A., Moussa, A., Hamal, M., Zerfaoui, M. y Ouchrif, M. (2022). Data and simulation studies on the influence of scintillation crystal dimensions on spectrometric parameters. *Applied Radiation and Isotopes*, 181, 110053. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110053>
- Fowler, M. (1 de mayo de 2024). *Rays and particles*. https://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/rays_and_particles.html
- Gilmore, G. (2008). *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- International Atomic Energy Agency. (s.f.). *Table of nuclides - nuclear structure and decay data*. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

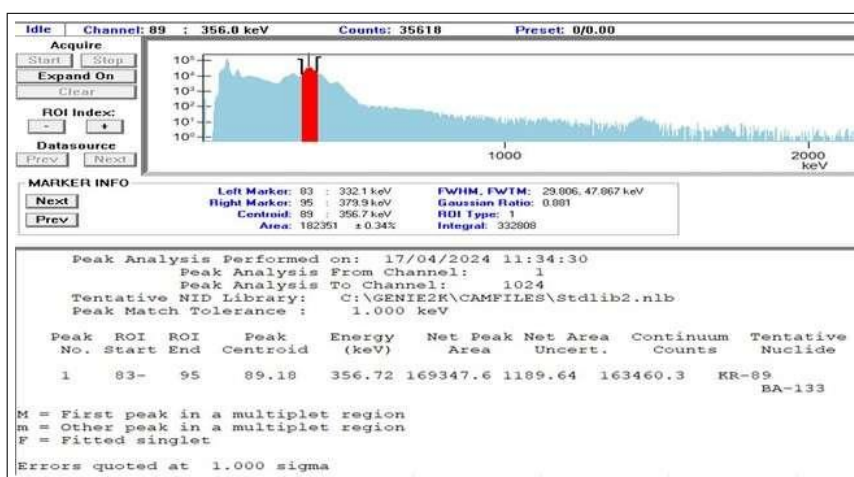
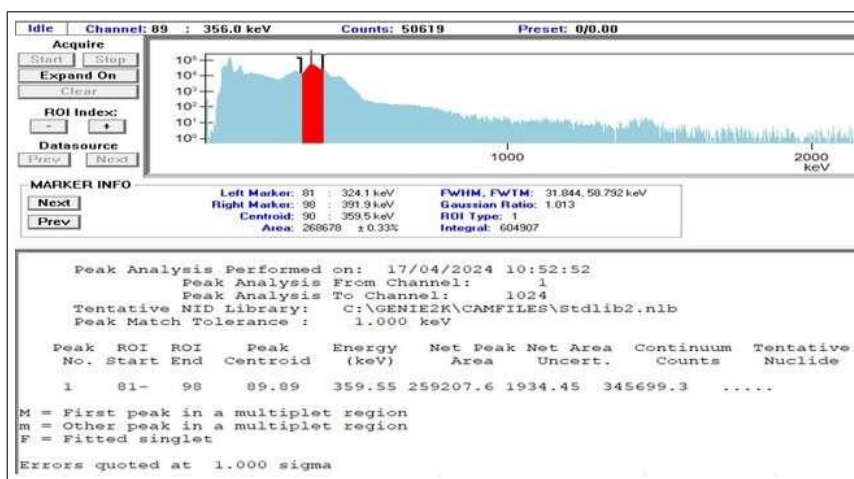
- International Organization for Standardization. (2010). ISO 11929:2010. *Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation—fundamentals and application*.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Krneta Nikolić, J., Rajačić, M., Todorović, D., Janković, M., Sarap, N., Pantelić, G. y Vukanac, I. (2018). Semiempirical efficiency calibration in semiconductor HPGe gamma-ray spectroscopy. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 5392658. <https://doi.org/10.1155/2018/5392658>
- L'Annunziata, M. F. (2007). *Radioactivity: introduction and history*. Elsevier. <https://shop.elsevier.com/books/radioactivity-introduction-and-history/f-lannunziata/978-0-444-52715-8>
- Lépy, M. C., Altitzoglou, T., Arnold, D., Bronson, F., Capote Noy, R., Décombaz, M., De Corte, F., Edelmaier, R., Herrera Peraza, E., Klemola, S., Korun, M., Kralik, M., Neder, H., Plagnard, J., Pommé, S., de Sanoit, J., Sima, O., Ugletveit, F., Van Velzen, L. y Vidmar, T. (2001). Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 55(4), 493–503. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(01\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00101-4)
- Lépy, M.-C., Bé, M.-M. y Piton, F. (2004). *ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity measurement): Software for efficiency transfer and coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry*. Bureau national de métrologie. http://www.lnhb.fr/pdf/NT_01-09A_Doc_etna_eng.pdf
- Loveland, W. D., Morrissey, D. J. y Seaborg, G. T. (2017). *Modern nuclear chemistry*. John Wiley & Sons.

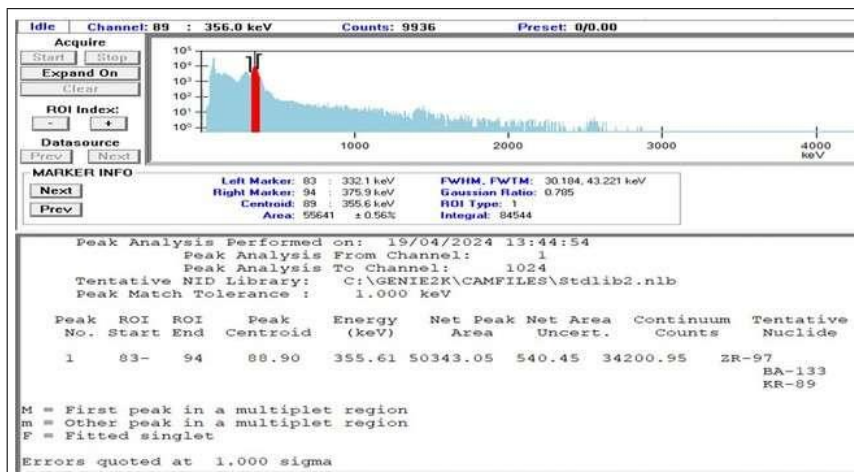
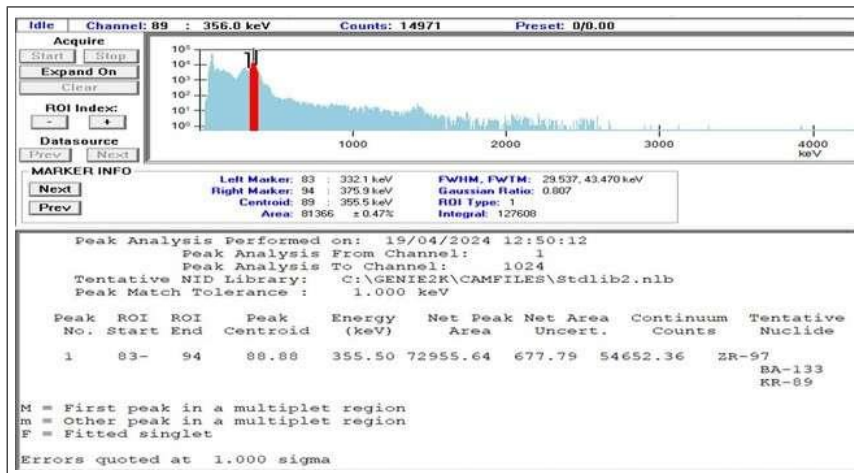
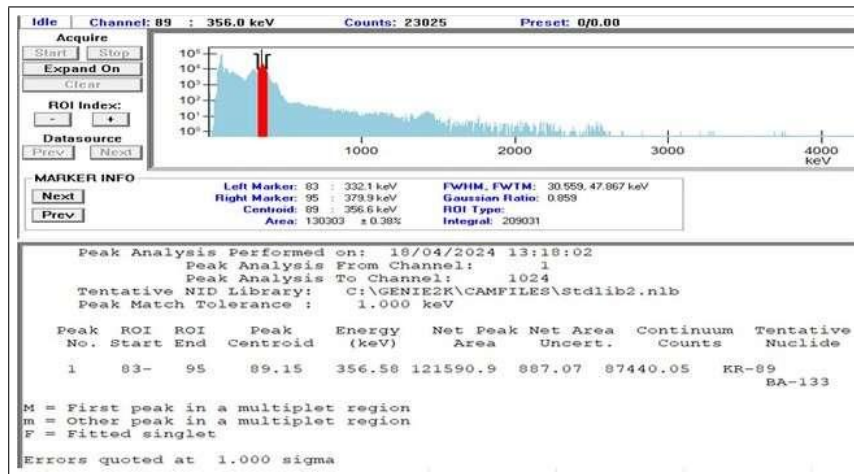
- MC²Analyzer User Manual (2019). CAEN Electronic Instrumentation. <https://seltokphotonics.com/upload/iblock/32c/32c6d2a55655a32bbd7f1c1e21051b5d.pdf>
- Pilakouta, M., Pappa, F., Patiris, D., Tsabaris, C. y Kalfas, C. (2018). A methodology for expanding the use of NaI(Tl) based spectrometry in environmental radioactivity measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 139, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.04.032>
- Prada, J., Rosales, M. y Guada, C. (2020). *Montaje y calibración de un detector de yoduro de sodio-NaI(Tl), para medir la componente electromagnética de baja energía en una cascada de partículas de radiación cósmica*. [Tesis de maestría]. Universidad de los Andes.
- Ramirez-Jimenez, F. (2006). X-ray spectroscopy with PIN diodes. *AIP Conference Proceedings*, 857, 121–133. <https://doi.org/10.1063/1.2359248>
- Rutherford, E. (1903). XV. The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(26), 177–187. <https://doi.org/10.1080/14786440309462912>
- Spectrum Techniques, LLC. (s.f.). *Universal Computer Spectrometer UCS-30*. Spectrum Techniques. www.spectrumtechniques.com/wp-content/uploads/UCS30-Manual.pdf
- Tanarro Sanz, A. (1970). *Instrumentación nuclear*. Servicio de Publicaciones de la J. E. N.
- The multichannel analyzer. (s. f.). <https://physics.uwo.ca/~jlandstr/p359/writeup/mca.pdf>
- Villarreyes, E., Patiño, G., Luna, A., Baltuano, O. y Angulo, L. (2023). Caracterización de tres centelladores de 1.5” x1. 5”, 2” x2” y 3” x3” para la puesta a punto de una cadena para espectroscopía gamma. *Revista de Investigación de Física*, 26(1), 15–20. <https://doi.org/10.15381/rif.v26i1.23902>

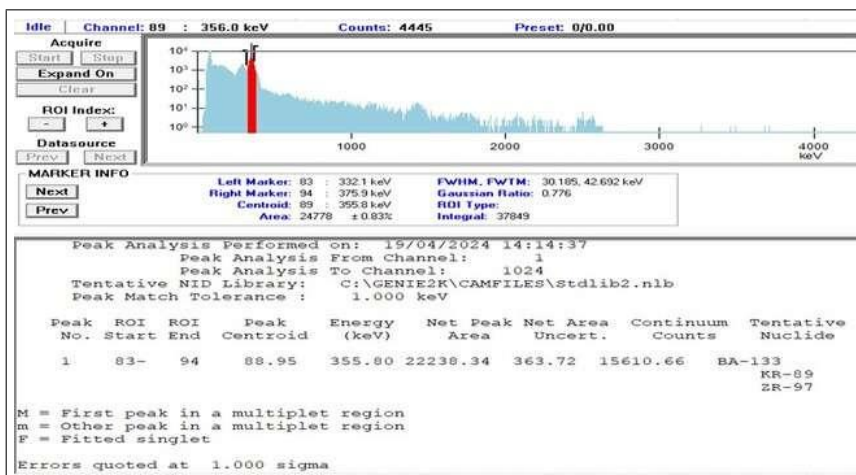
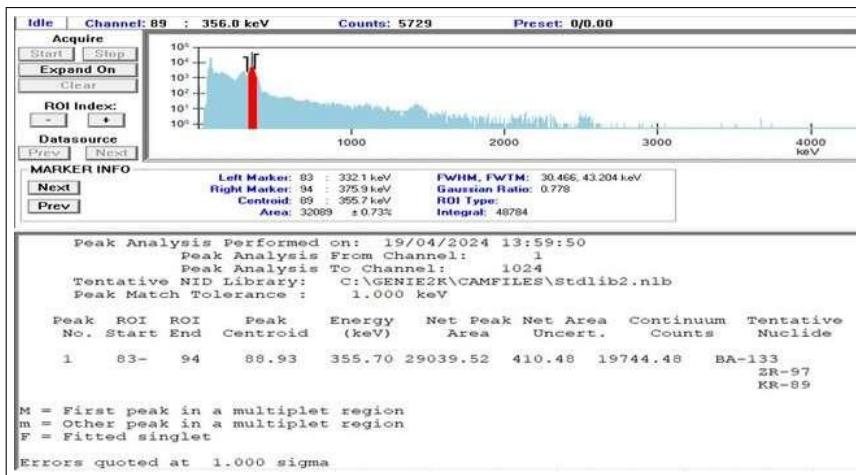
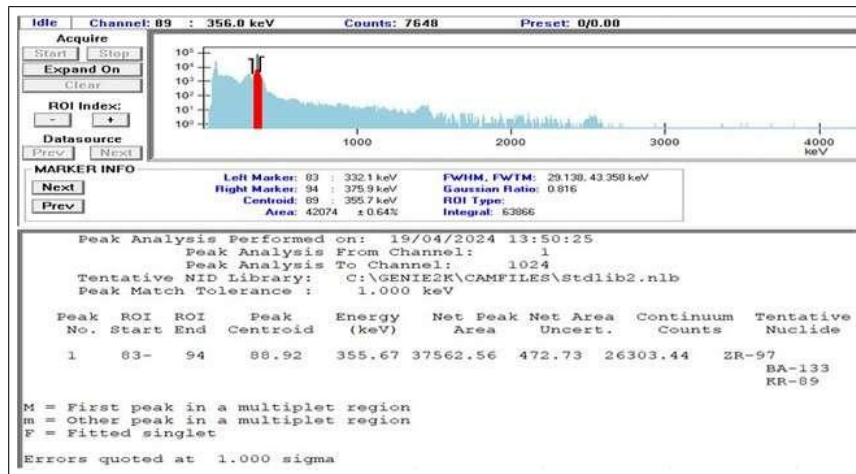
IX. ANEXOS

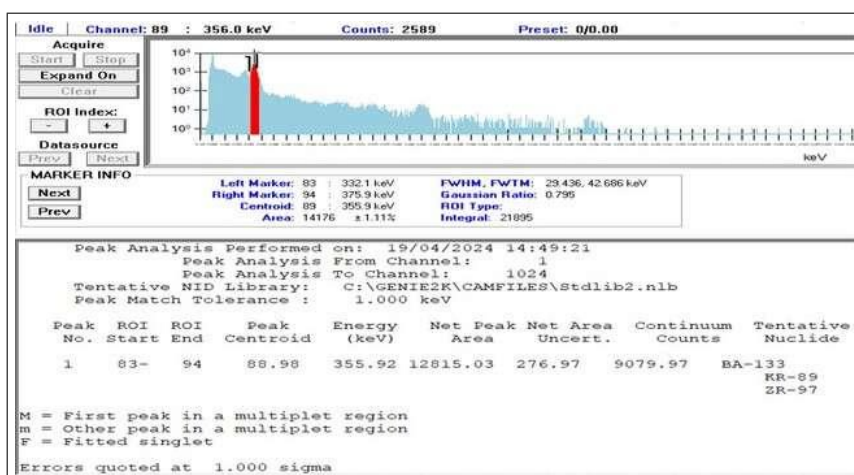
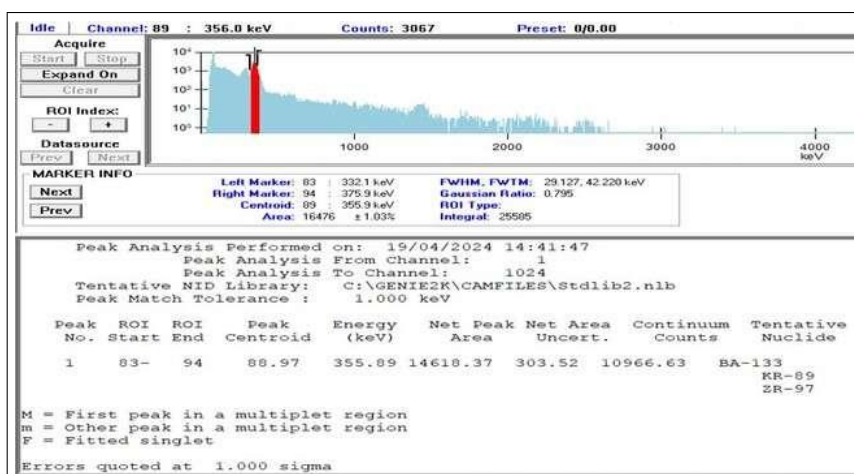
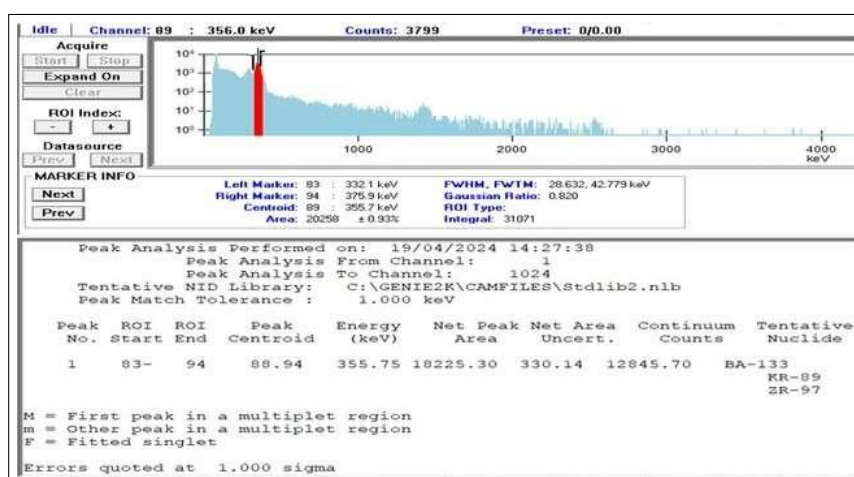
Se detalla cada espectro analizado mediante el software GENIE2000 de todas las fuentes radiactivas variando su distancia de forma descendente desde 0,25cm hasta 10cm, los datos fueron presentados en las tablas ya mencionadas en este trabajo de tesis.

DETECTOR 1,5"x1,5" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Ba-133

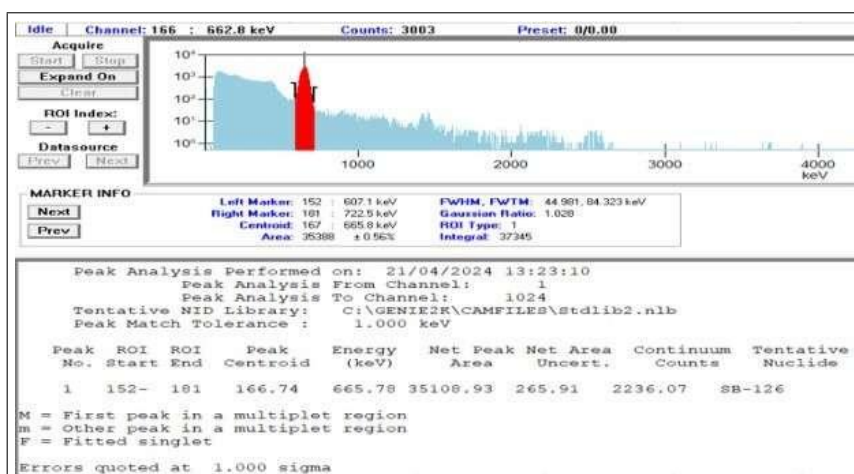
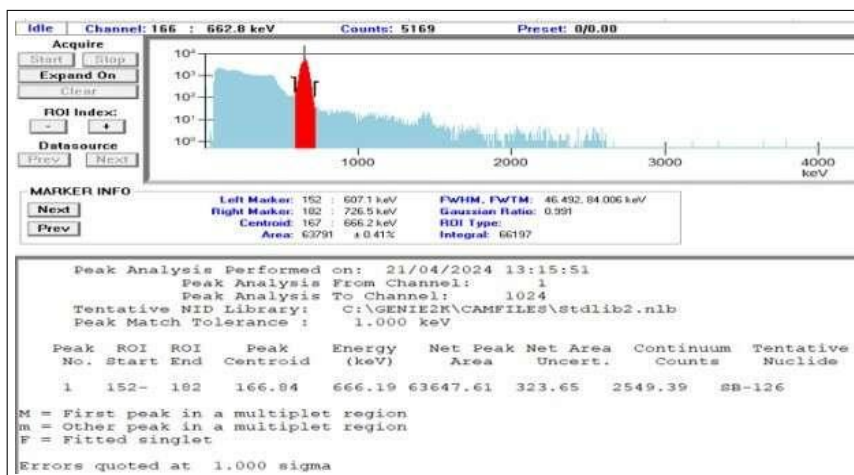
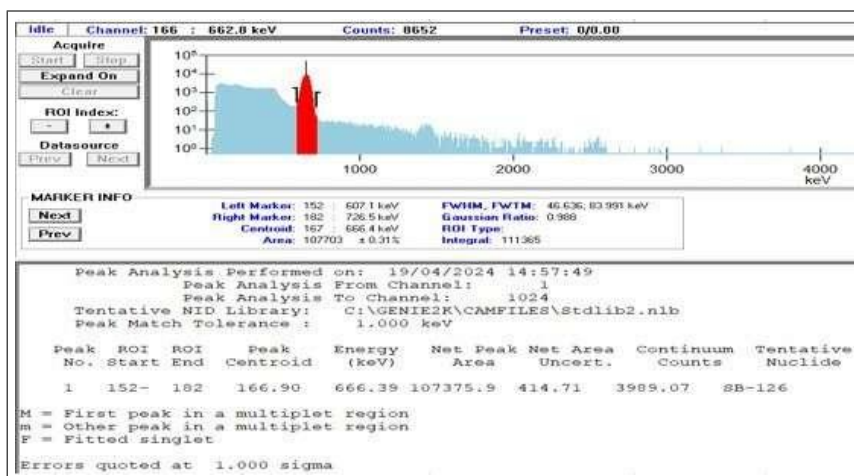


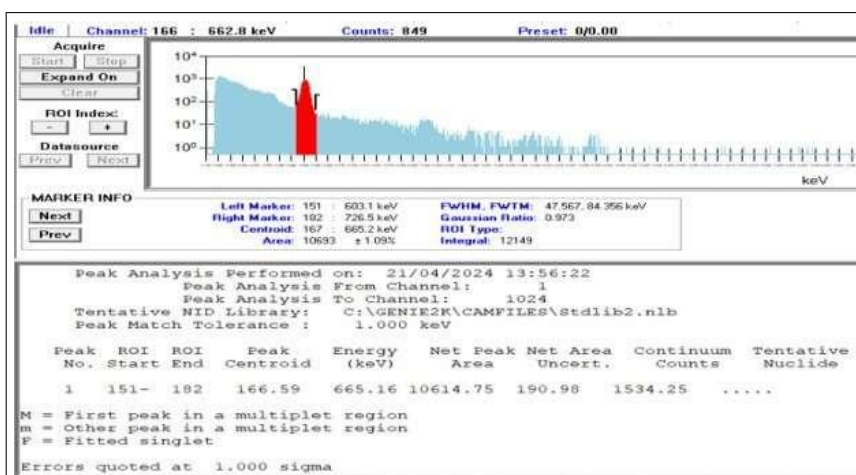
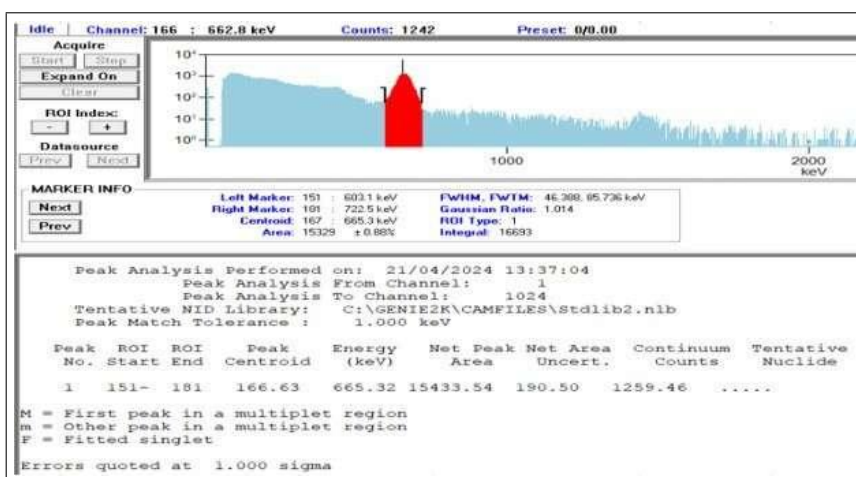
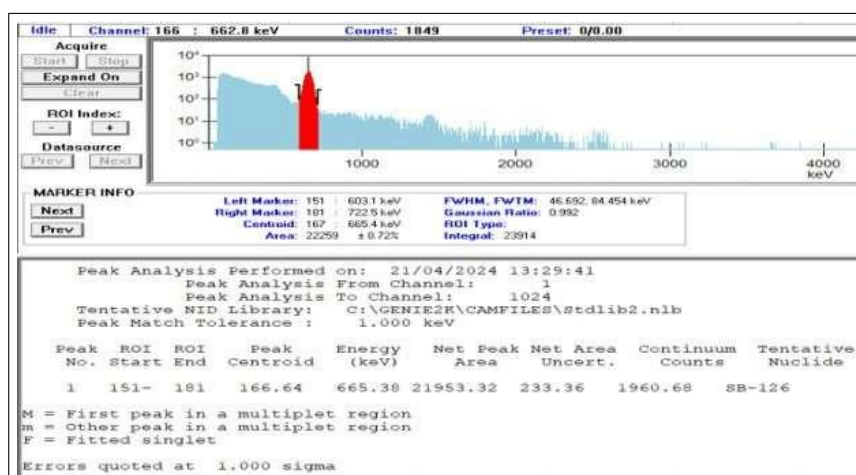


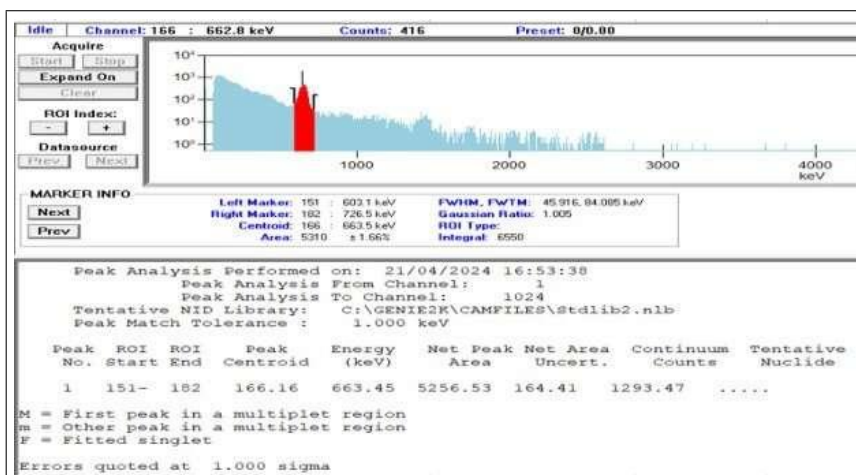
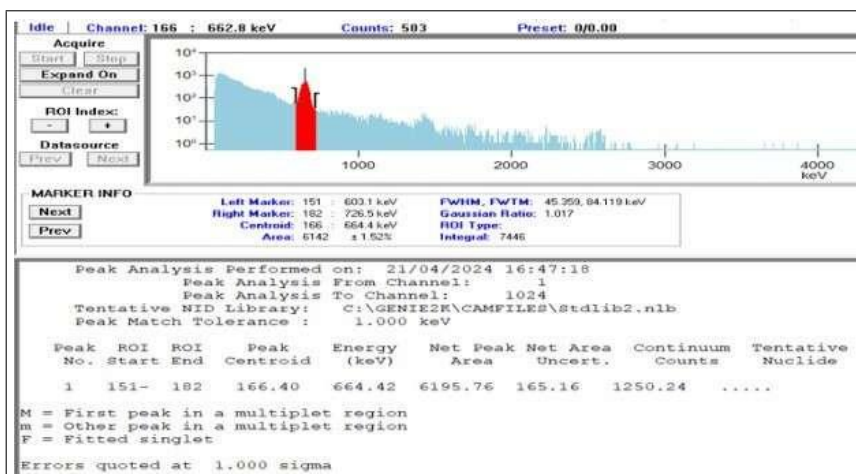
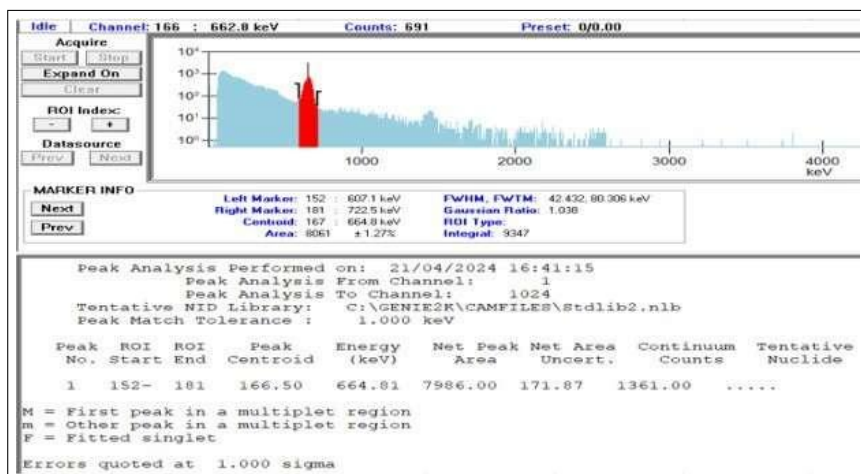


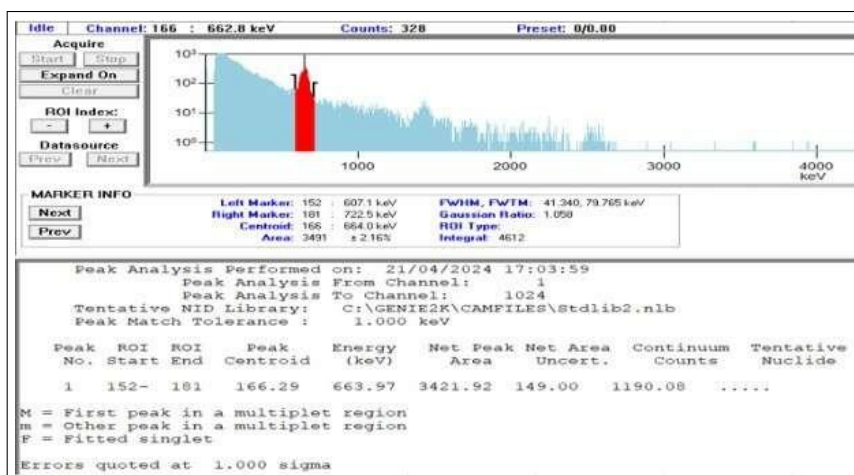
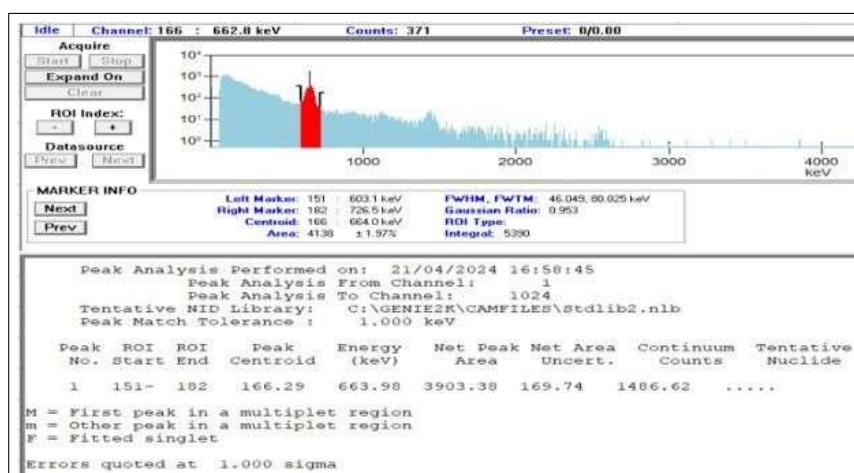


DETECTOR 1,5"x1,5" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Cs-137

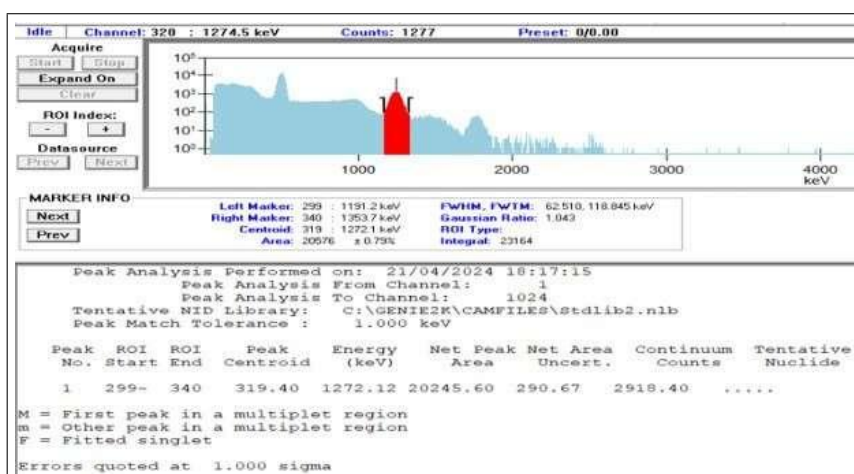
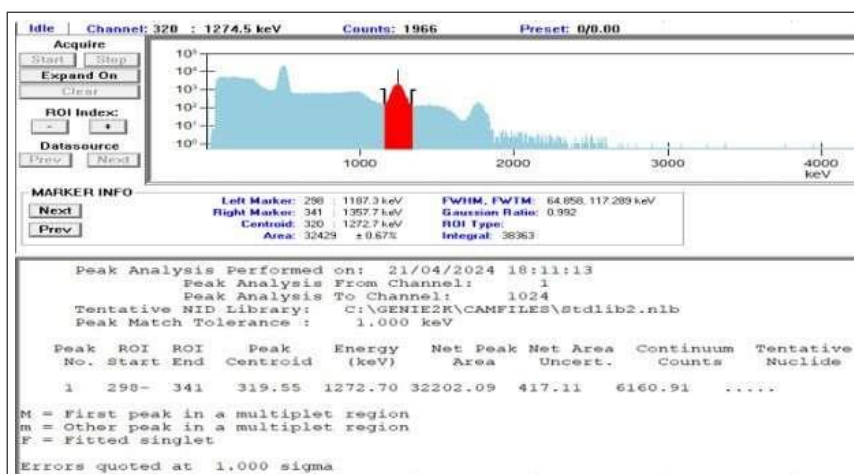


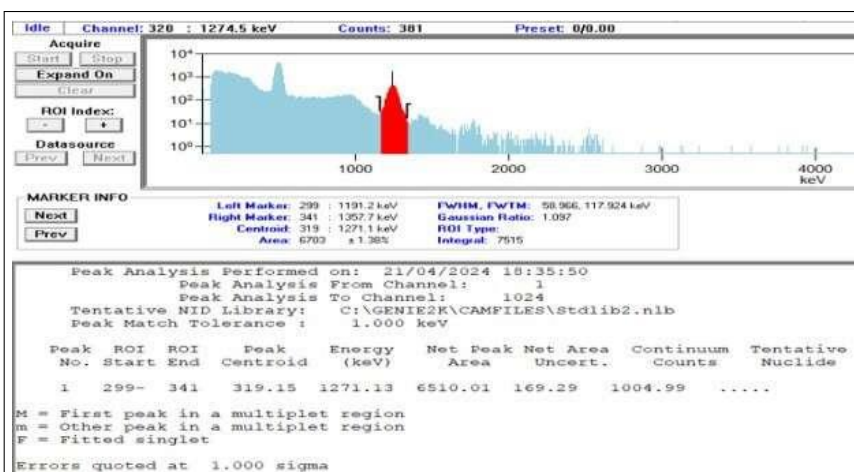
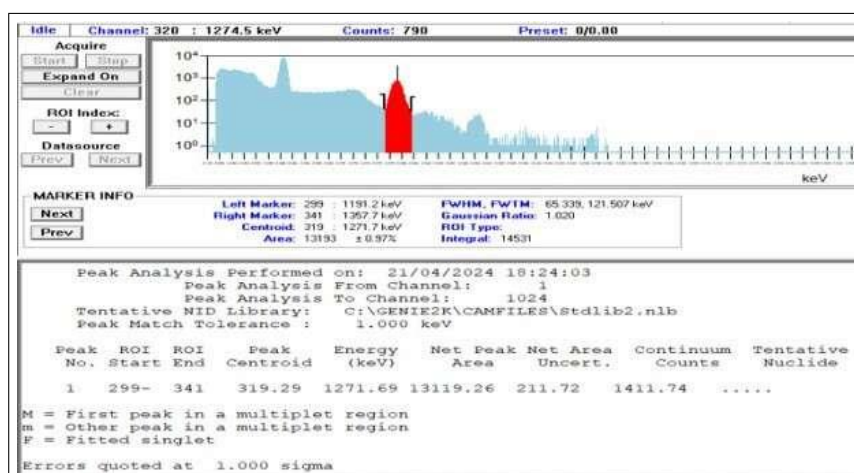


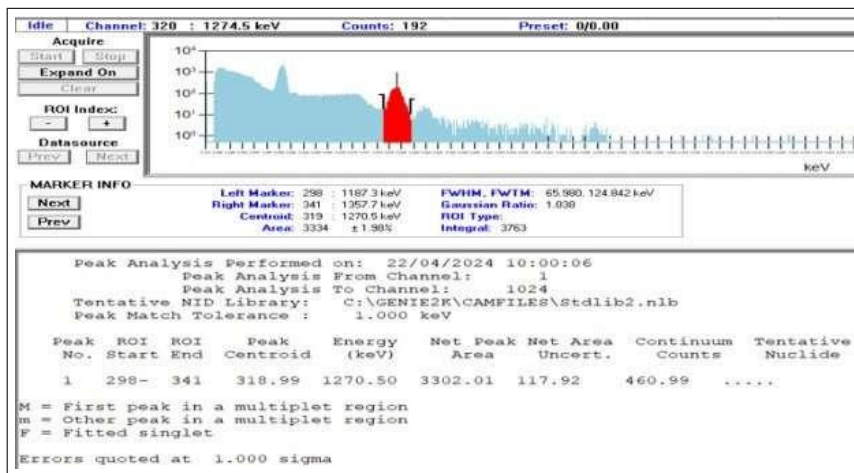
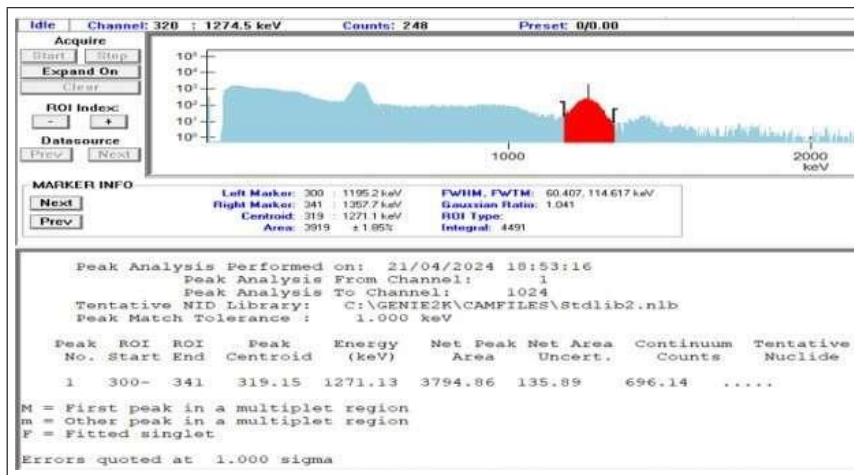
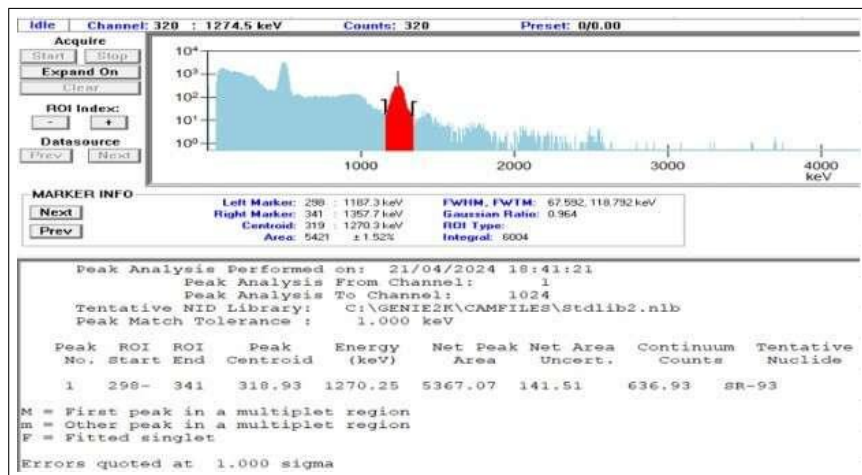


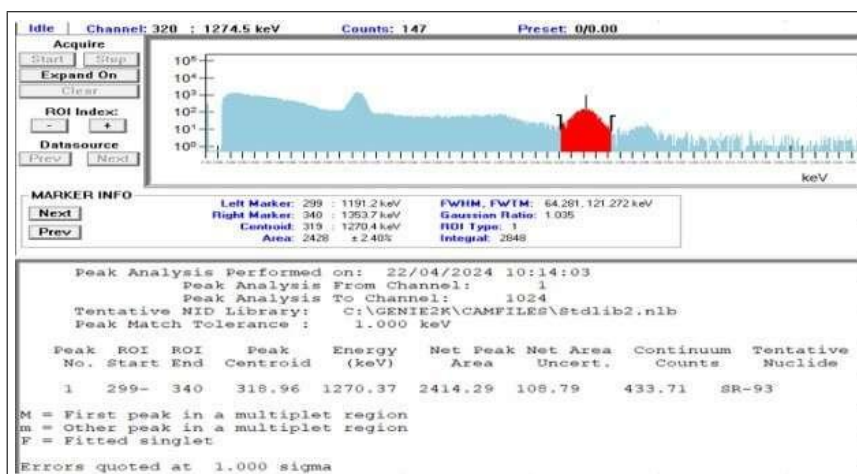
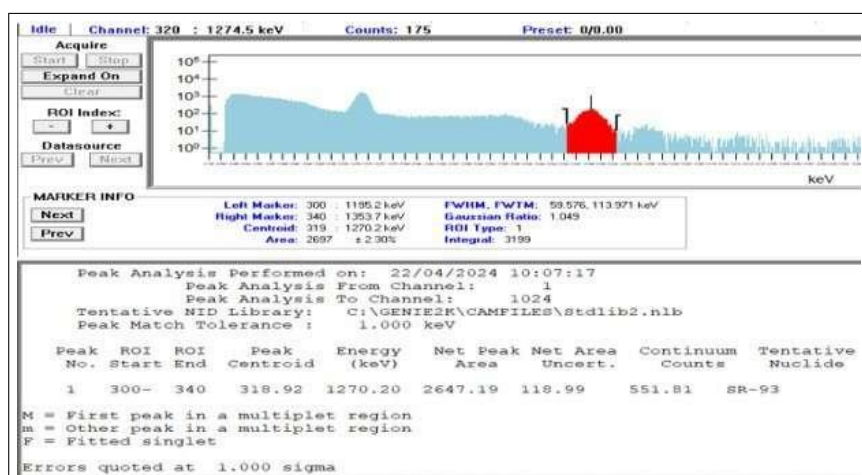


DETECTOR 1,5"x1,5" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Na-22



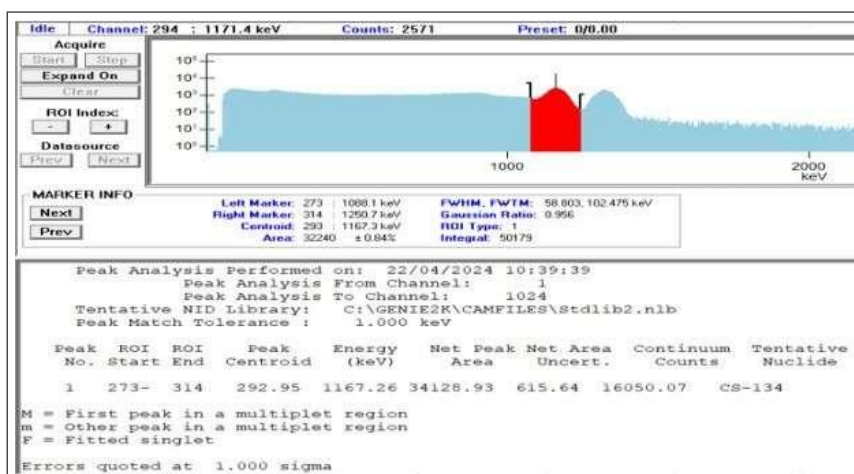
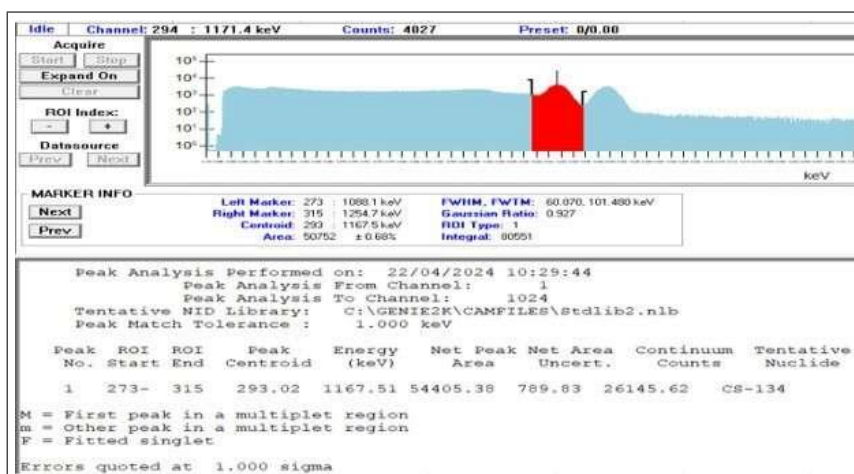
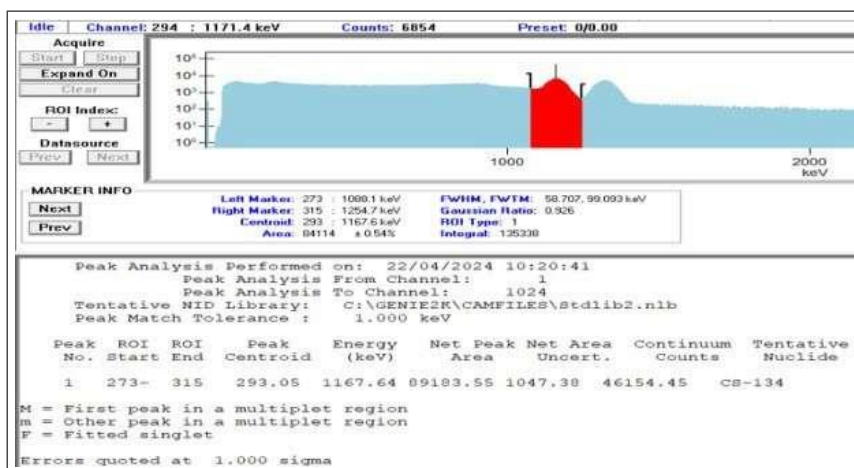


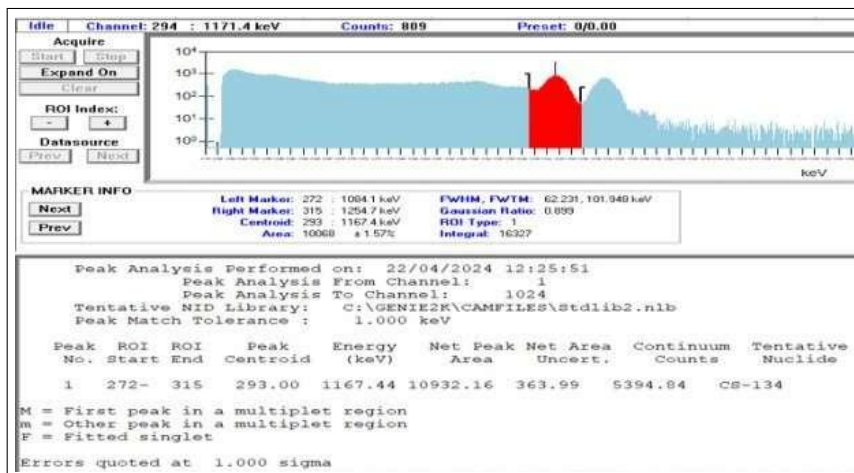
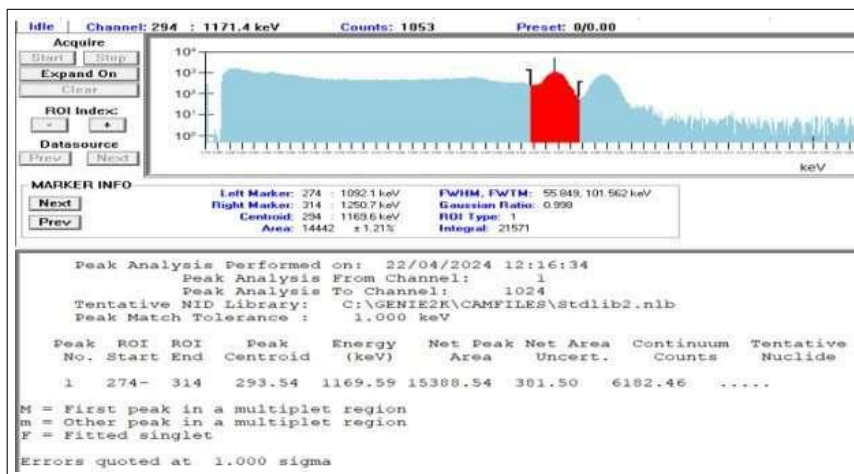
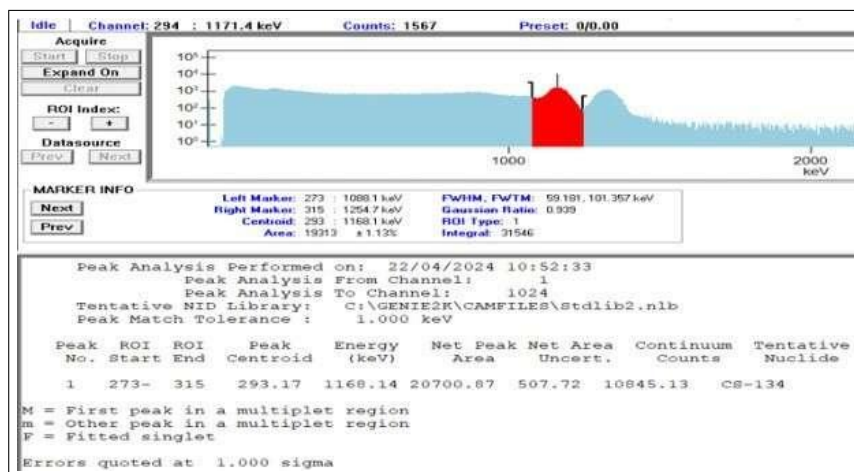


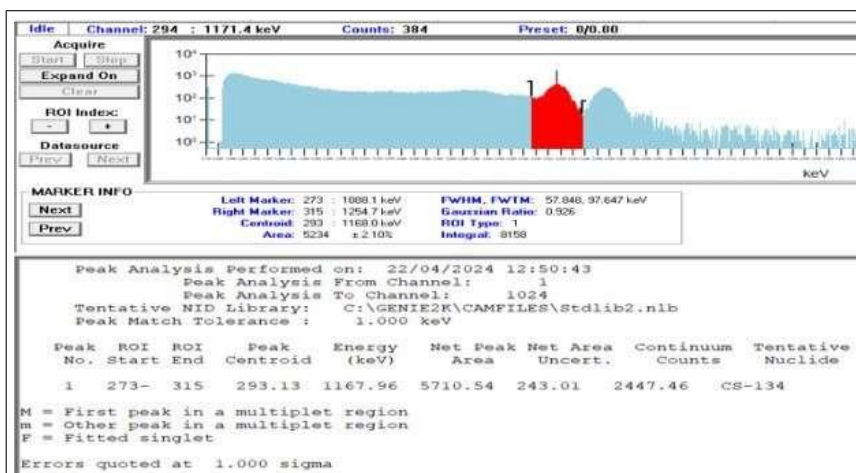
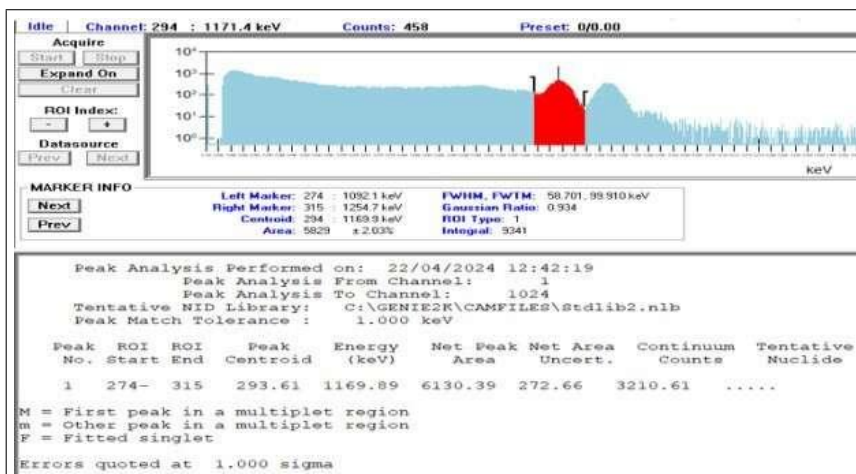
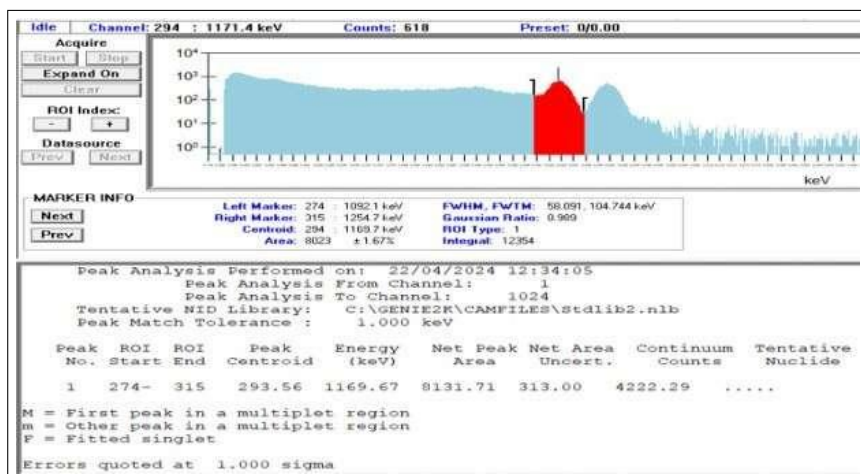


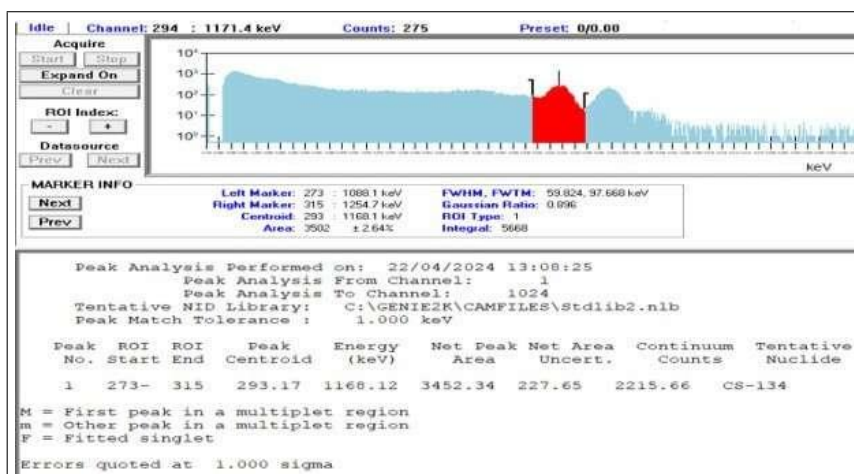
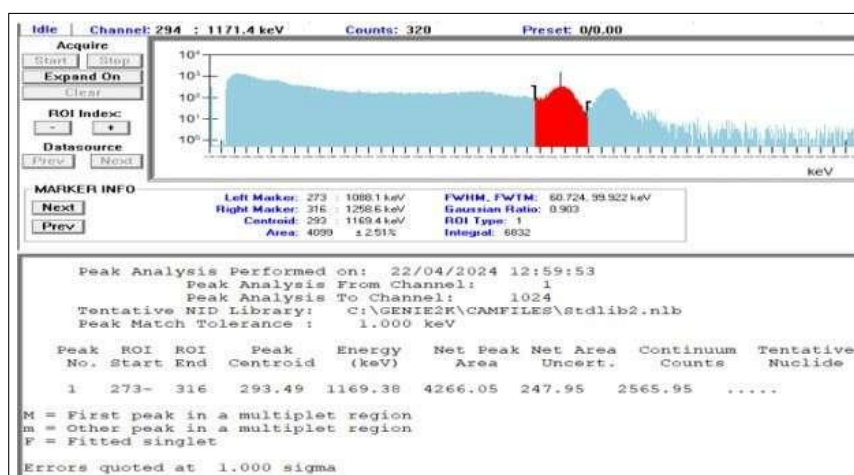
DETECTOR 1,5"x1,5" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1173,2 keV)



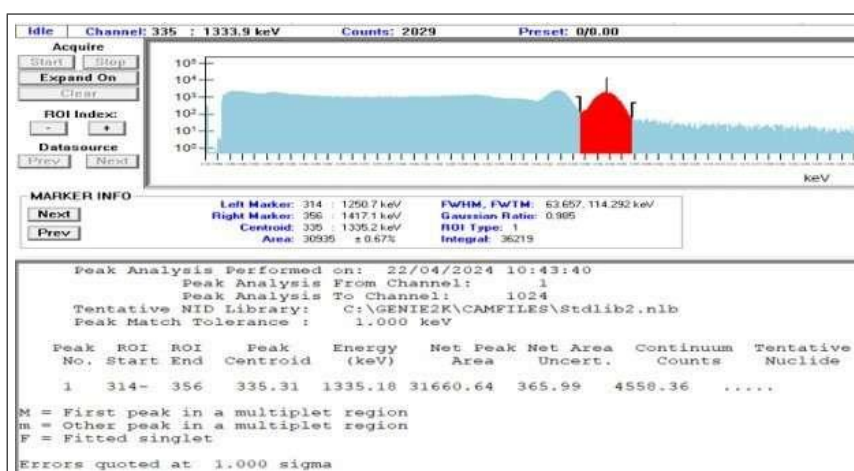
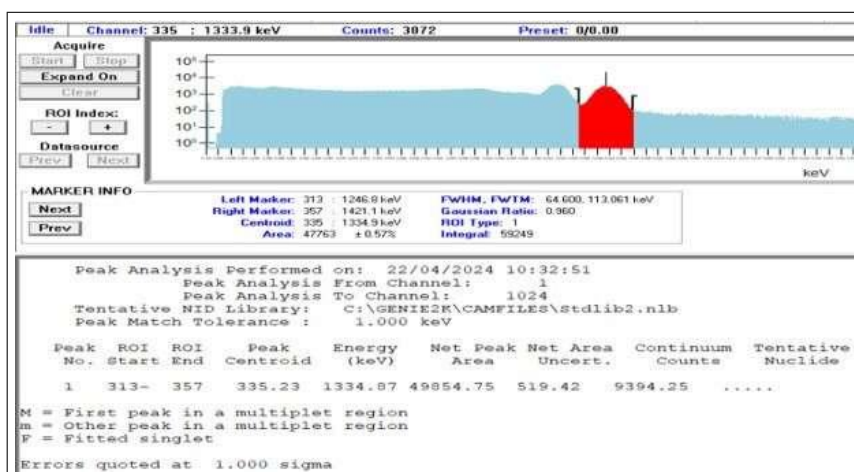
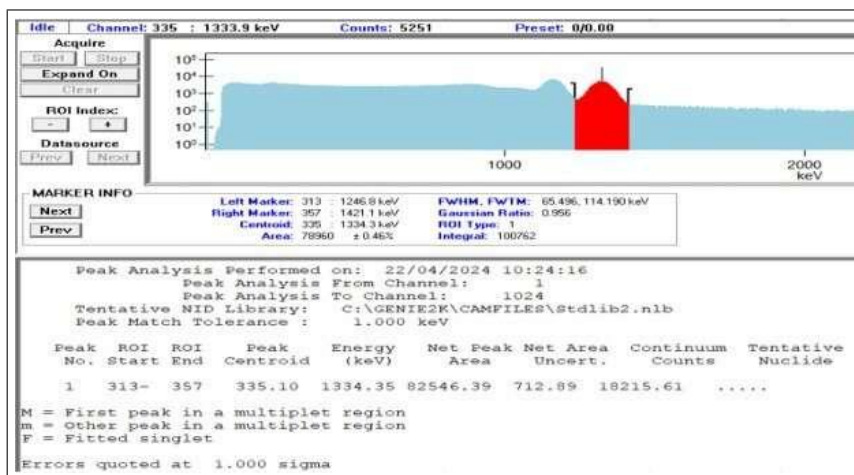


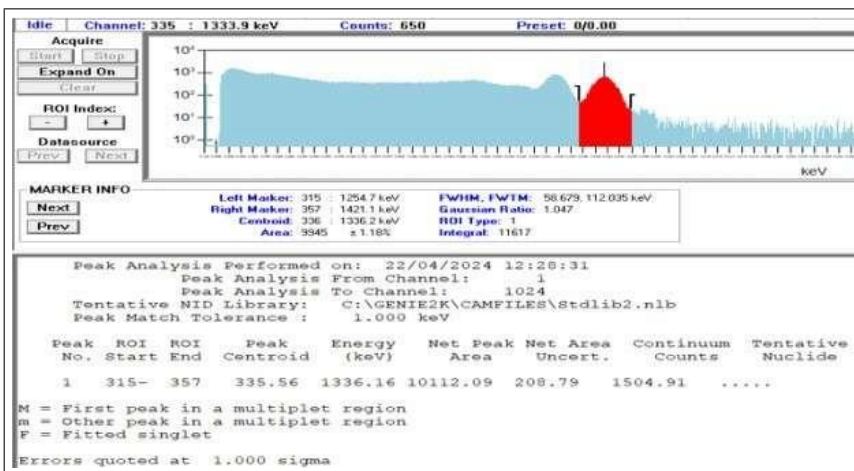
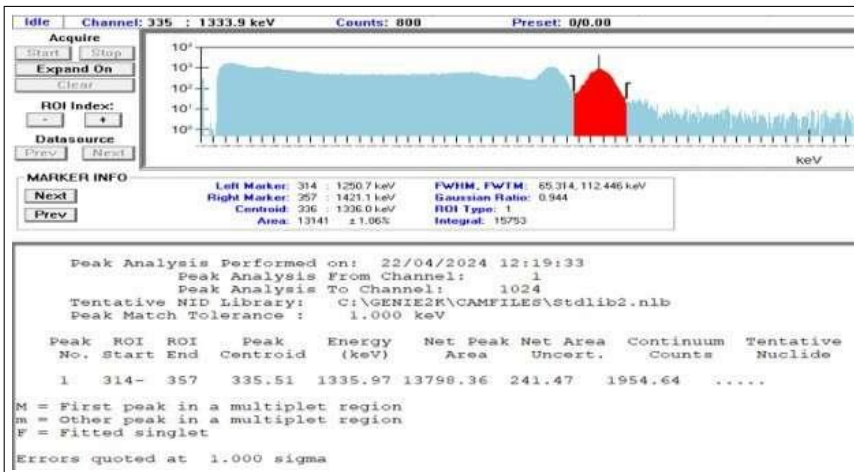
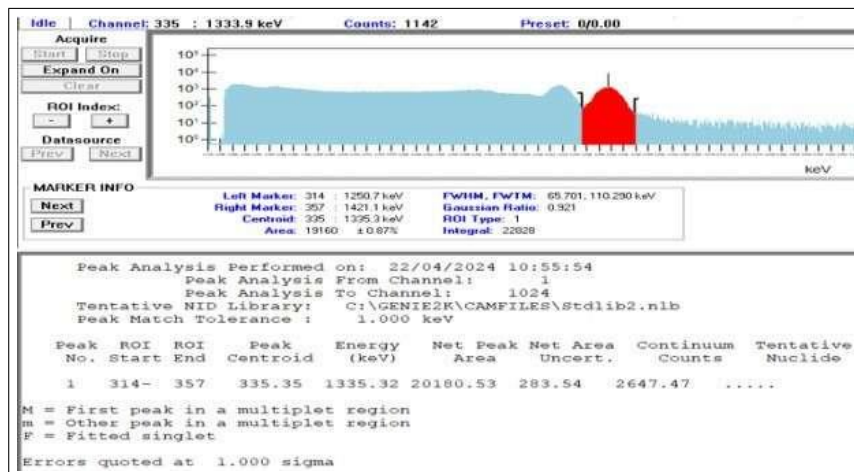


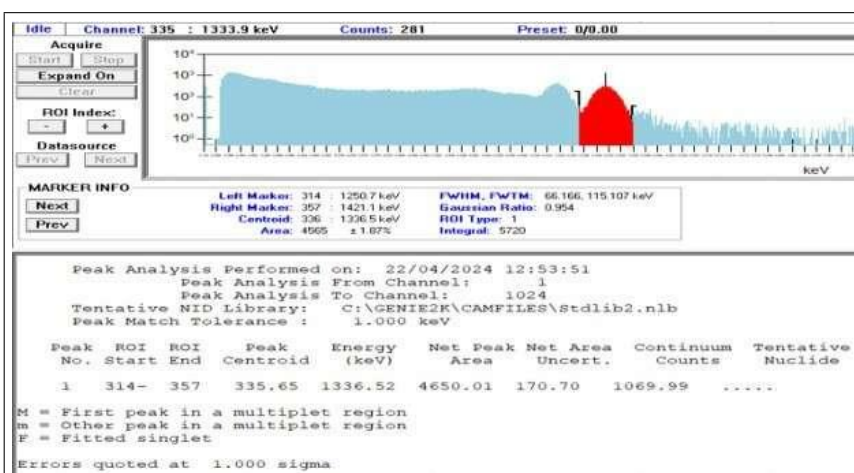
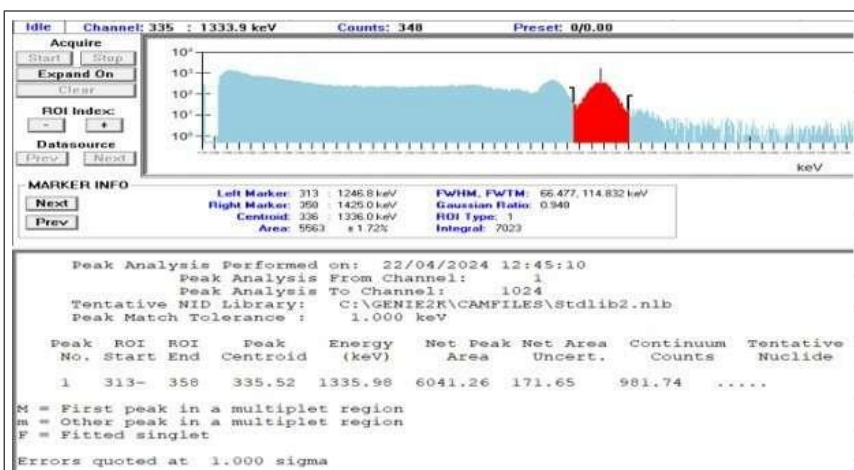
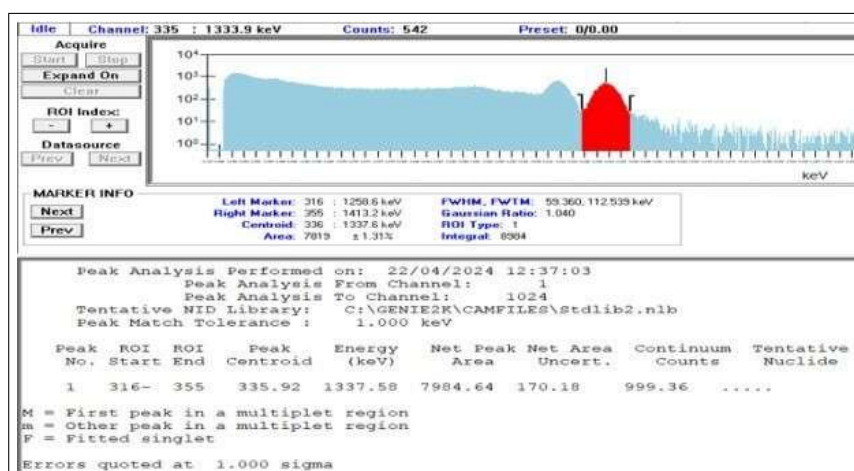


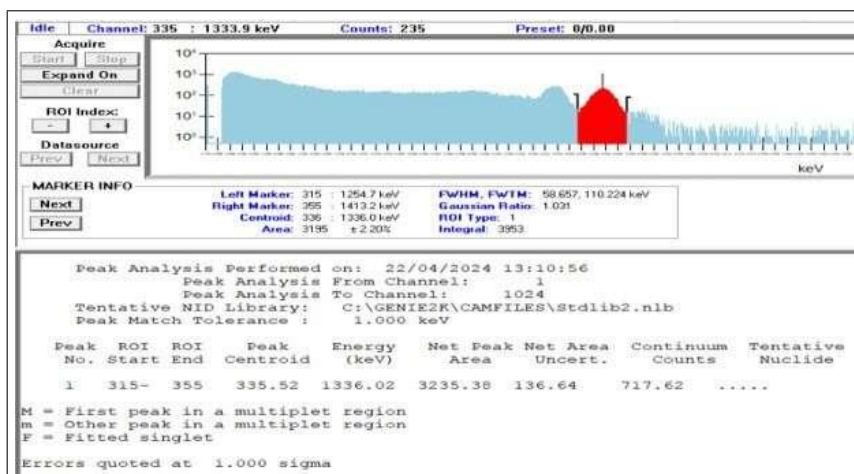
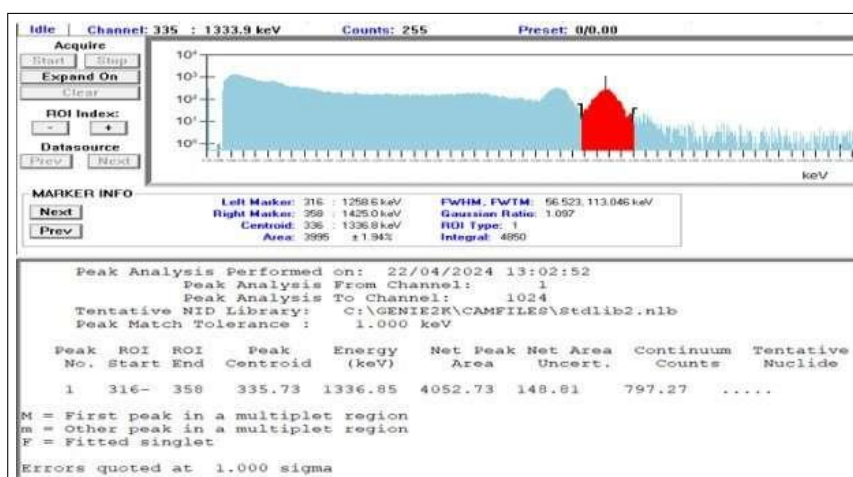
DETECTOR 1,5"x1,5" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1332,5 keV)

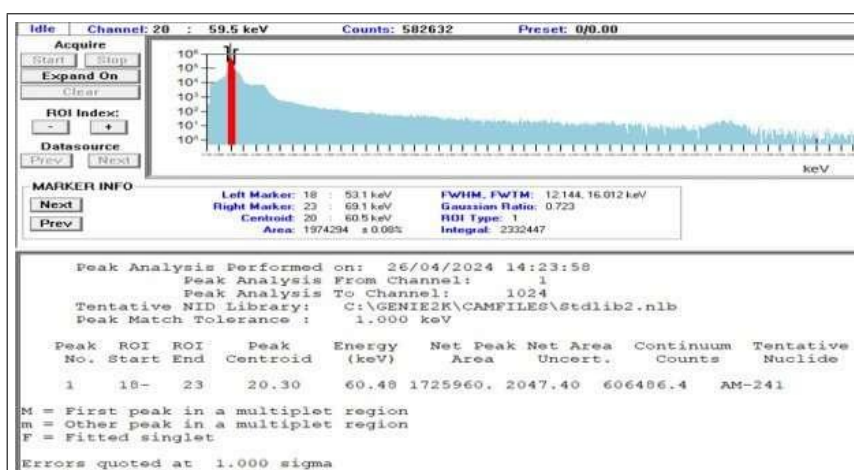
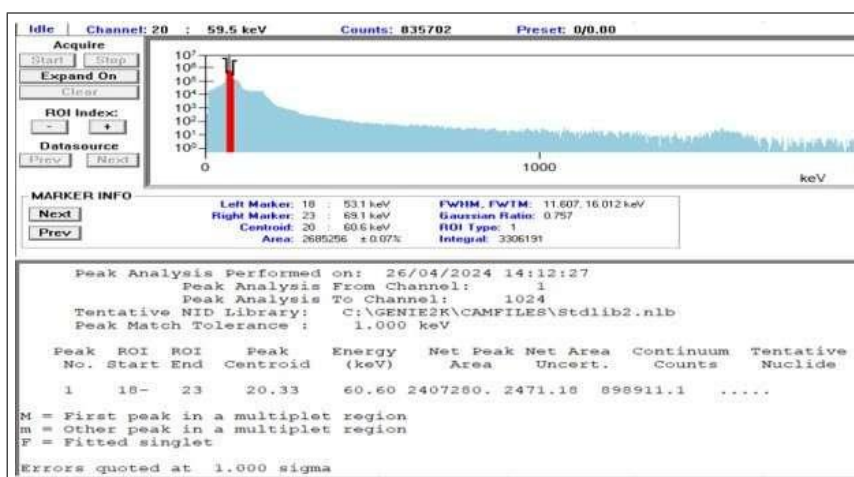
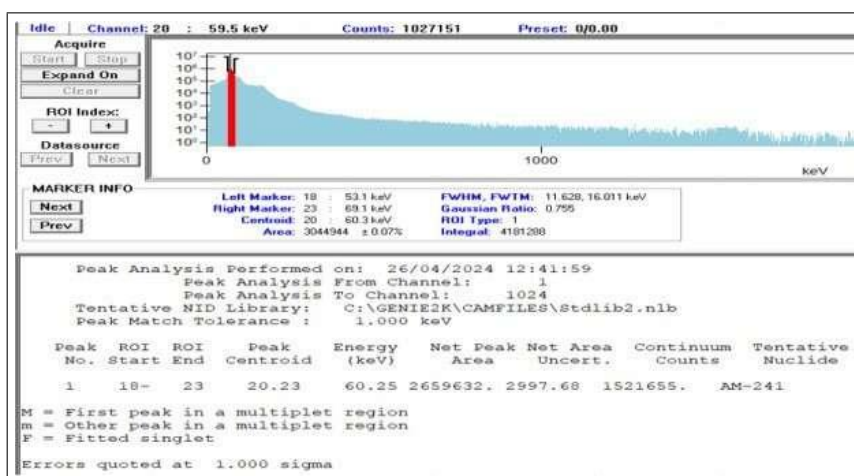


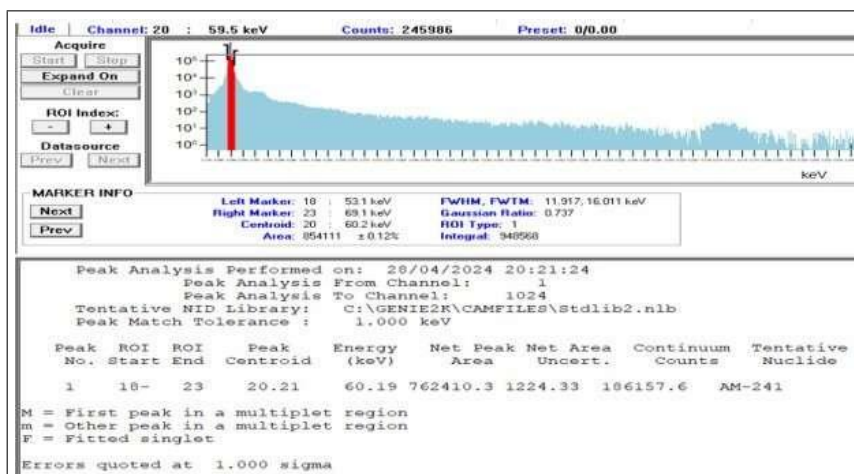
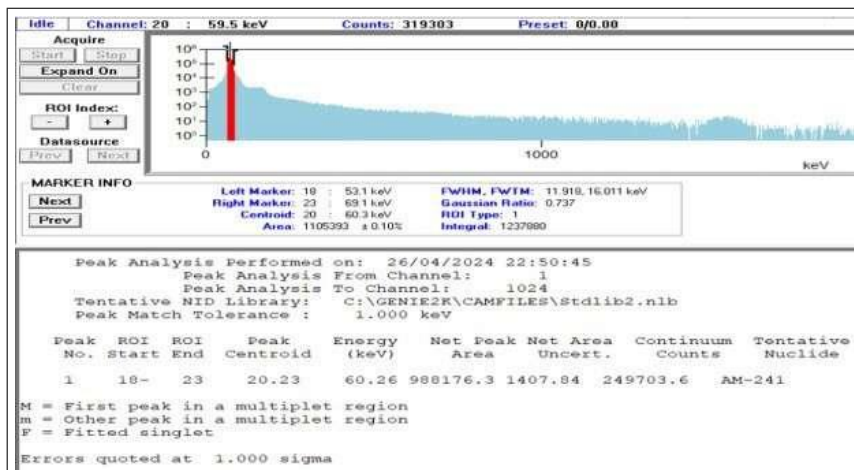
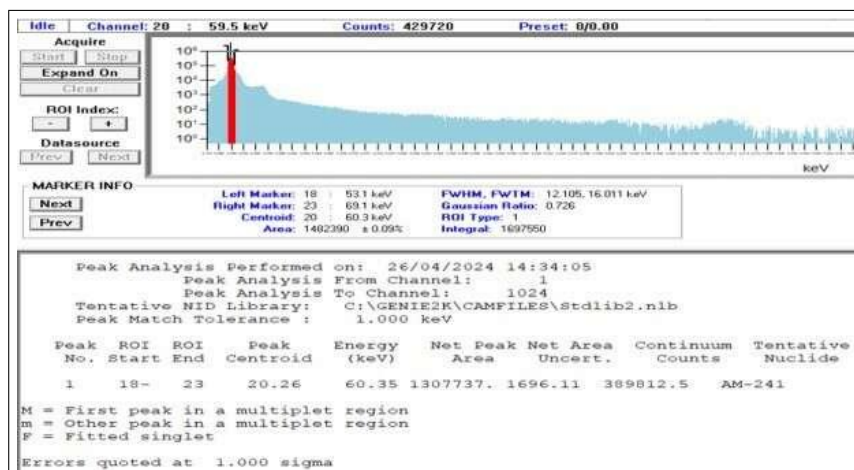


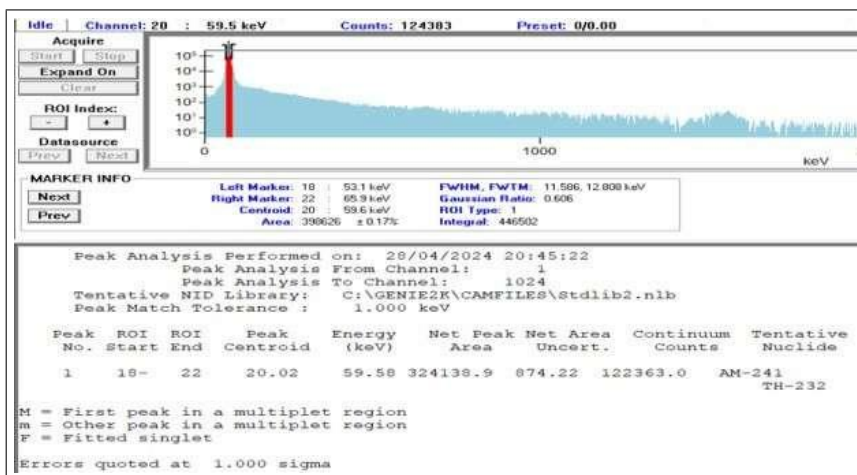
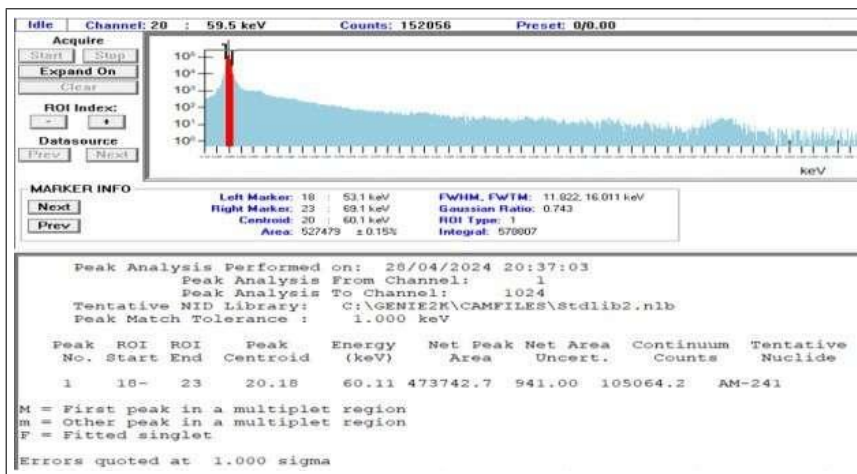
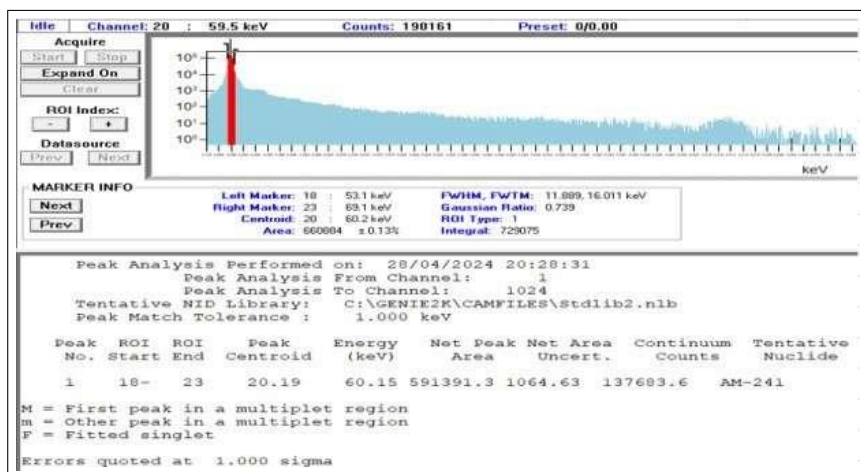


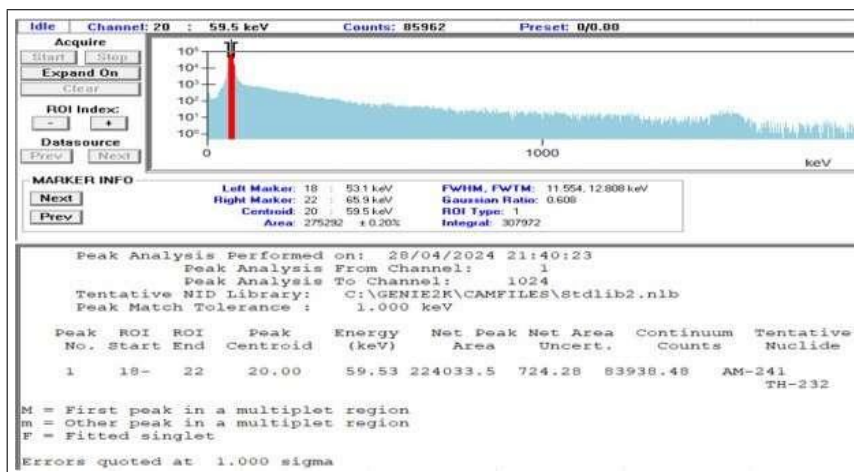
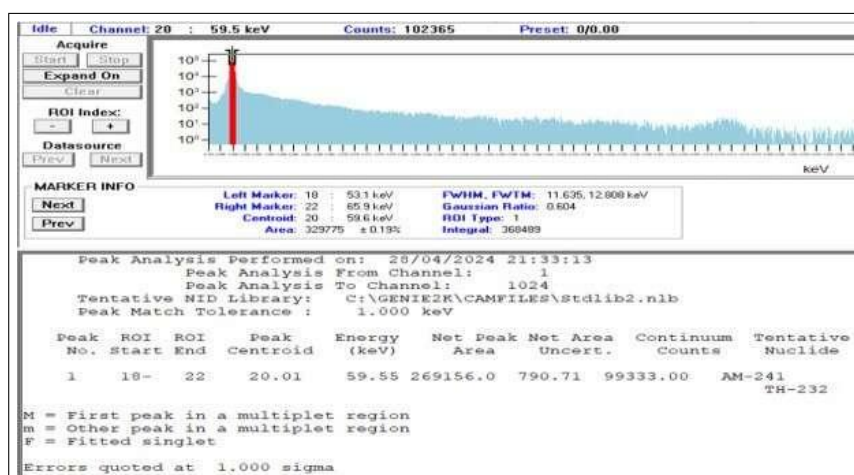


DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Am-241

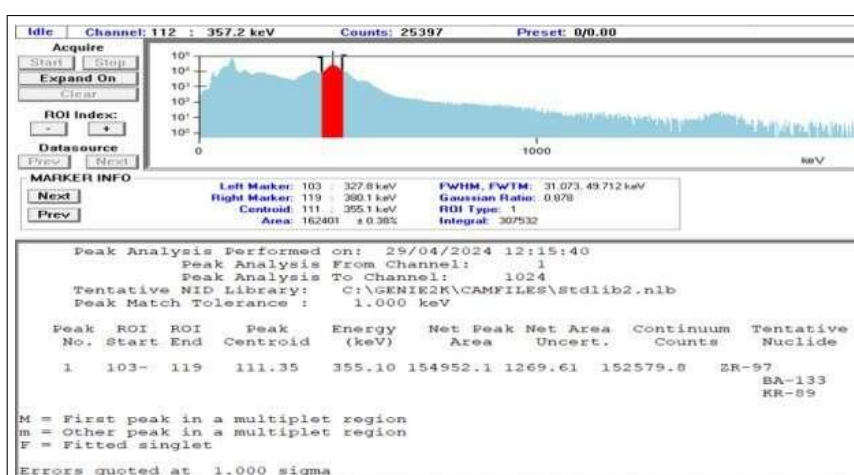
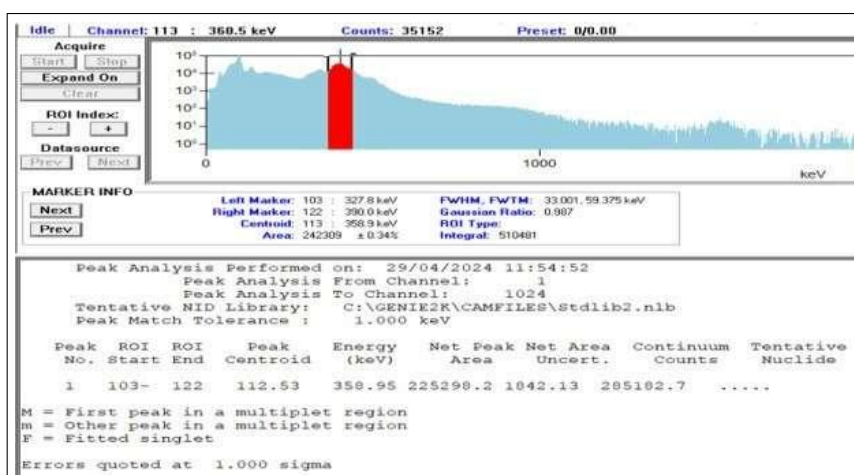
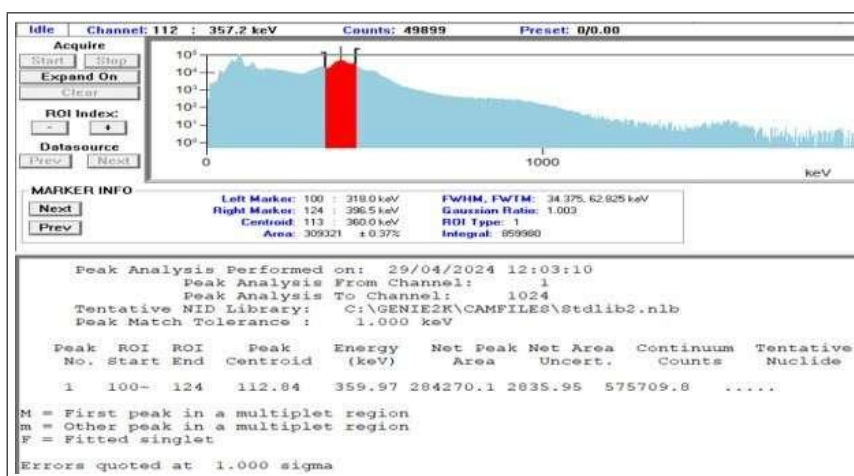


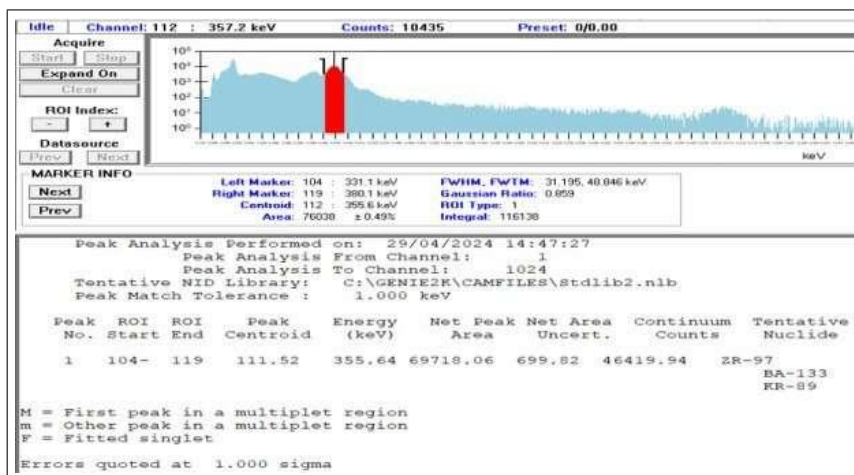
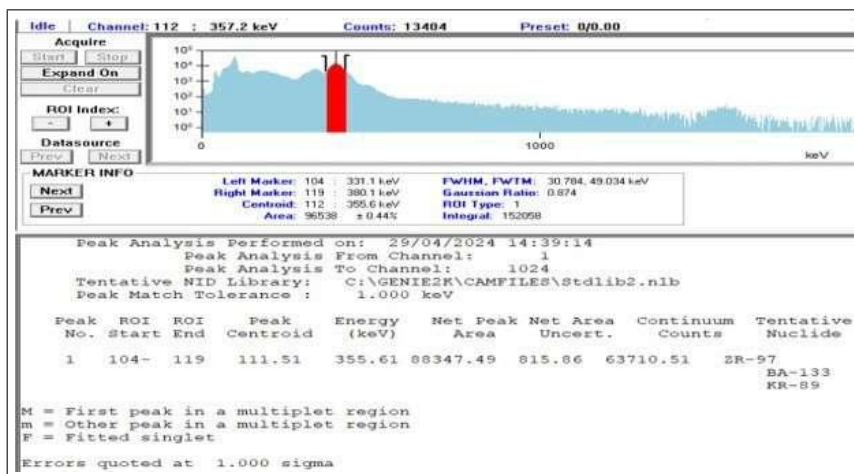
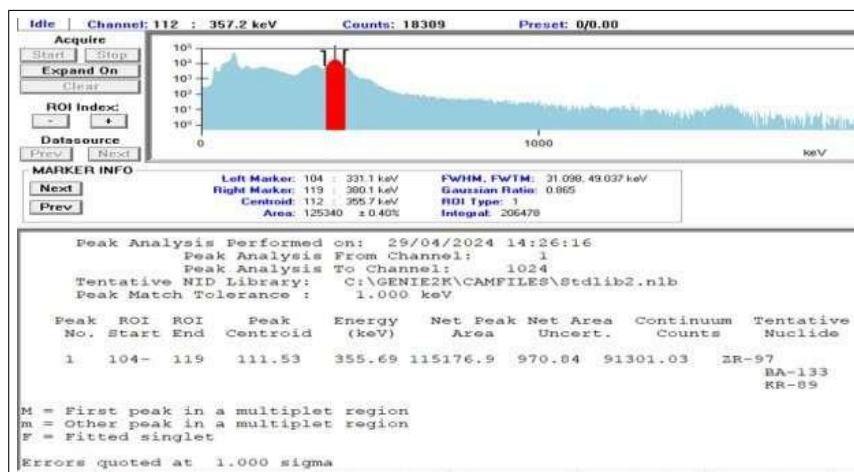


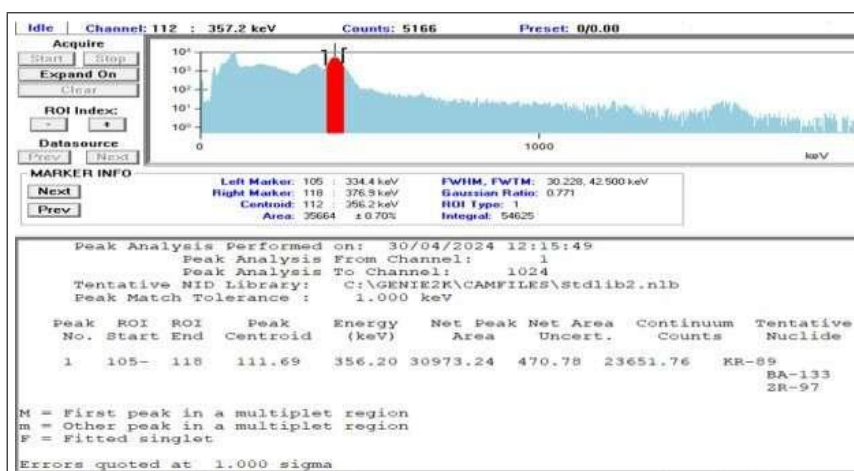
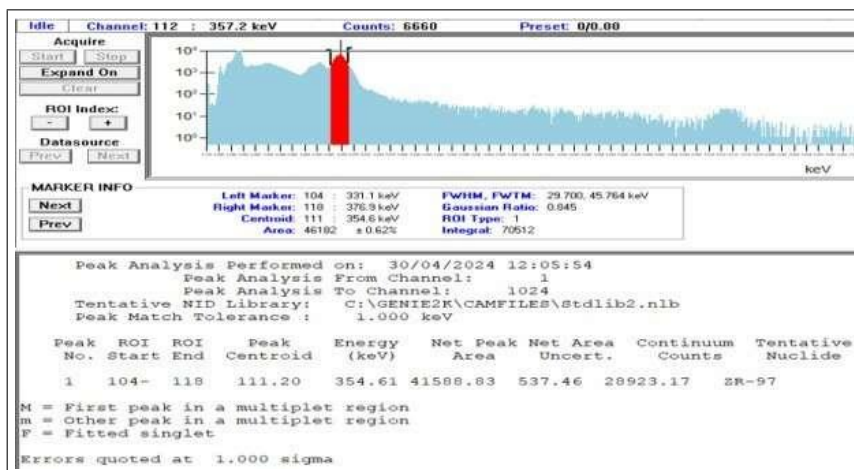
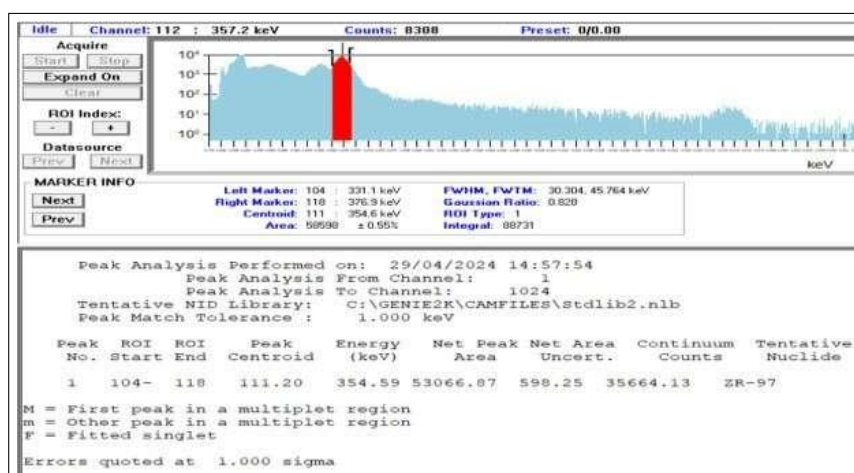


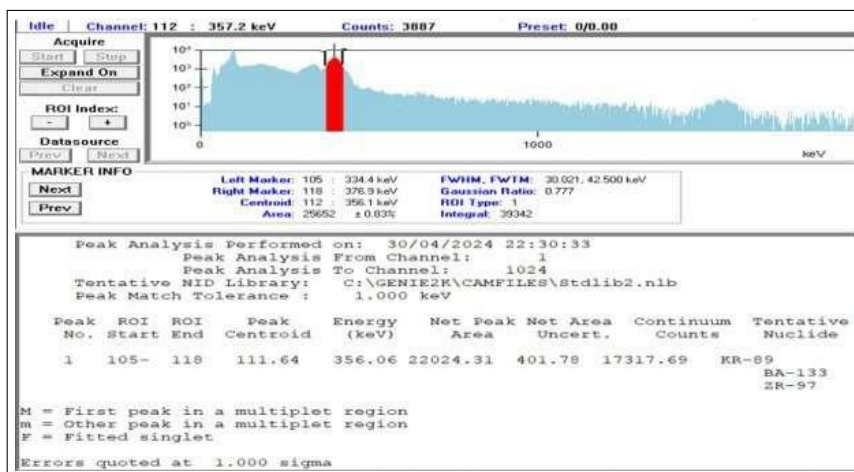
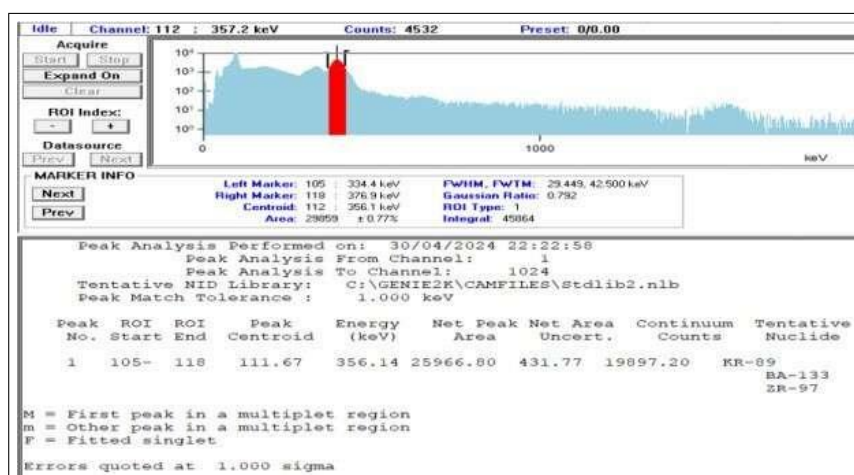


DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Ba-133

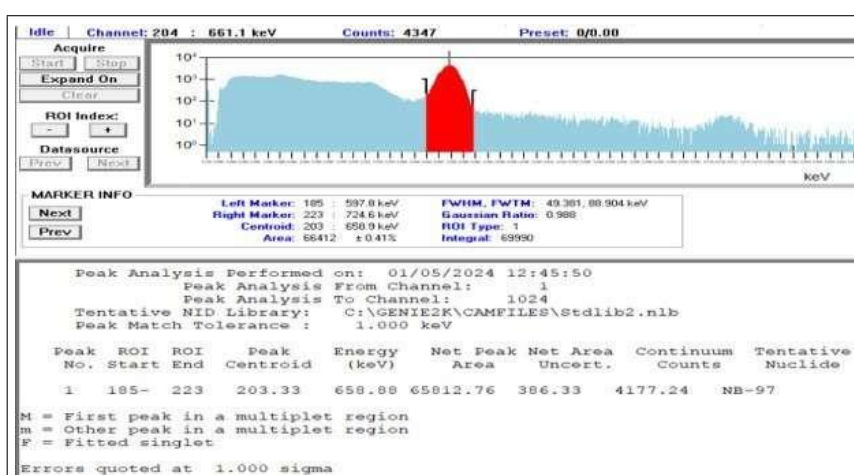
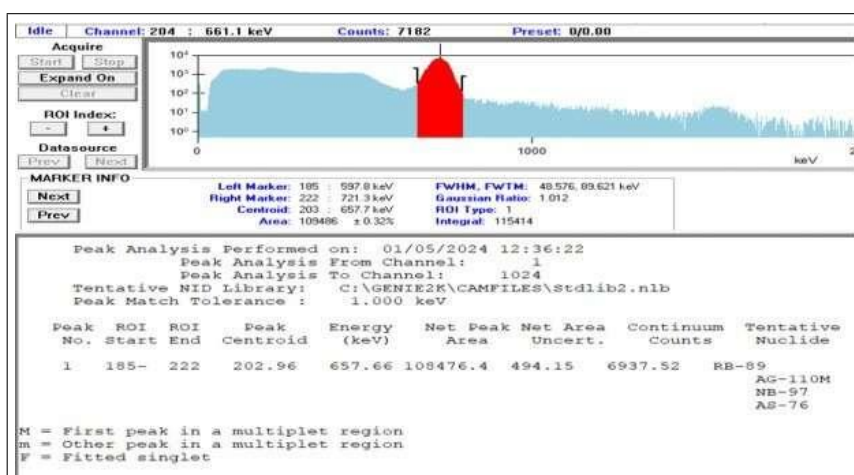
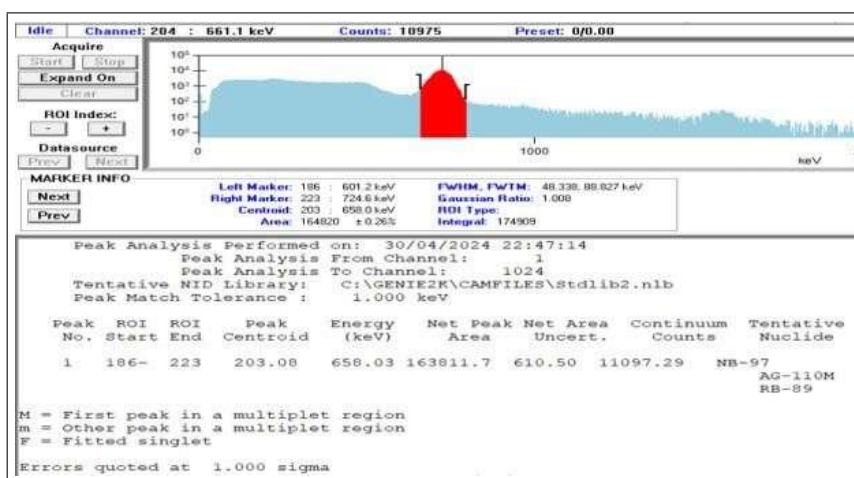


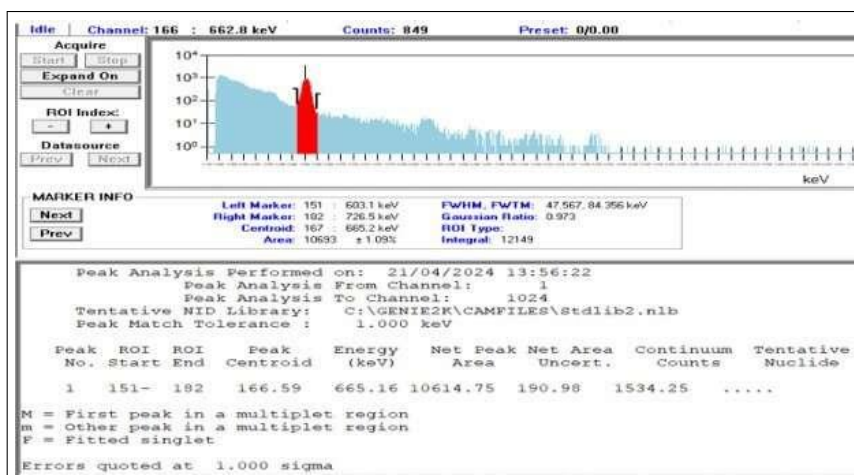
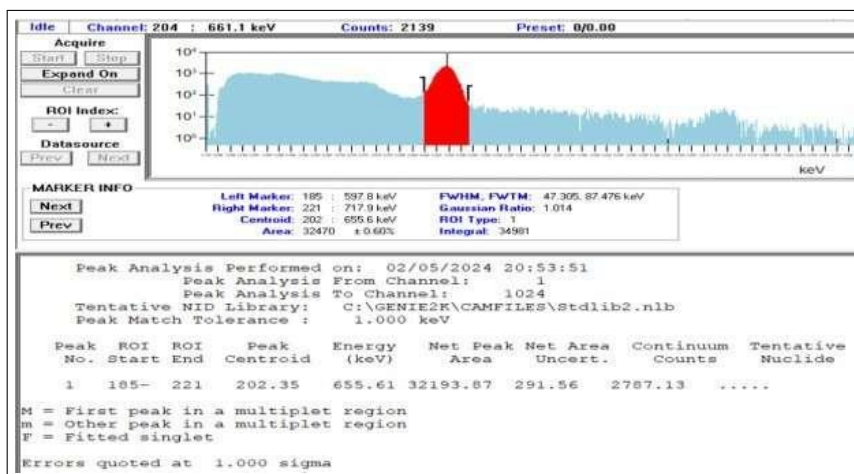
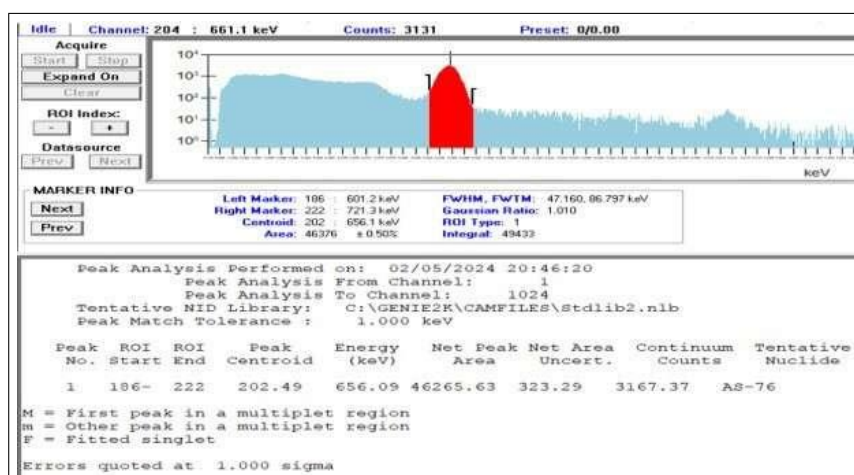


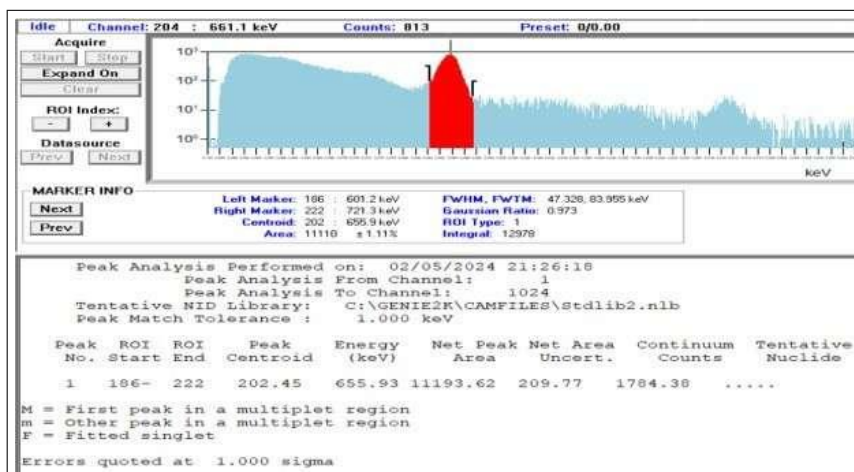
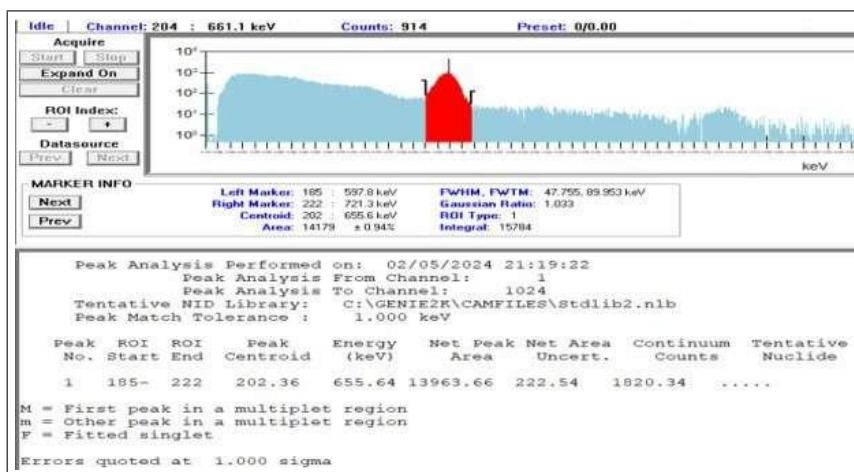
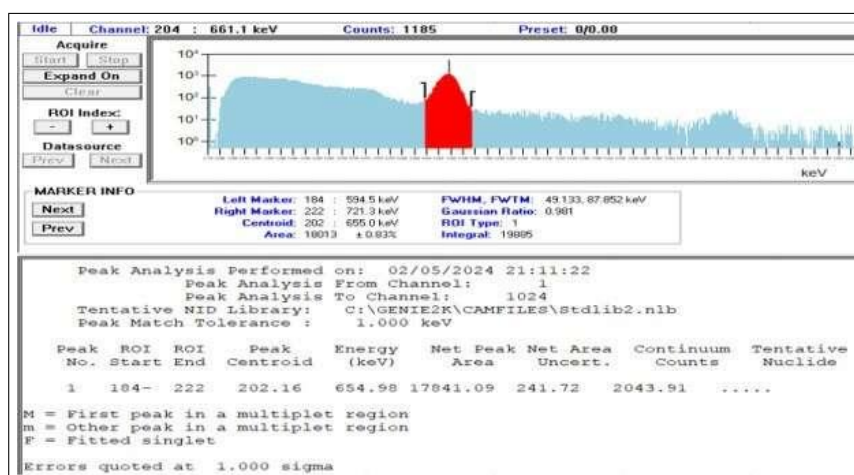


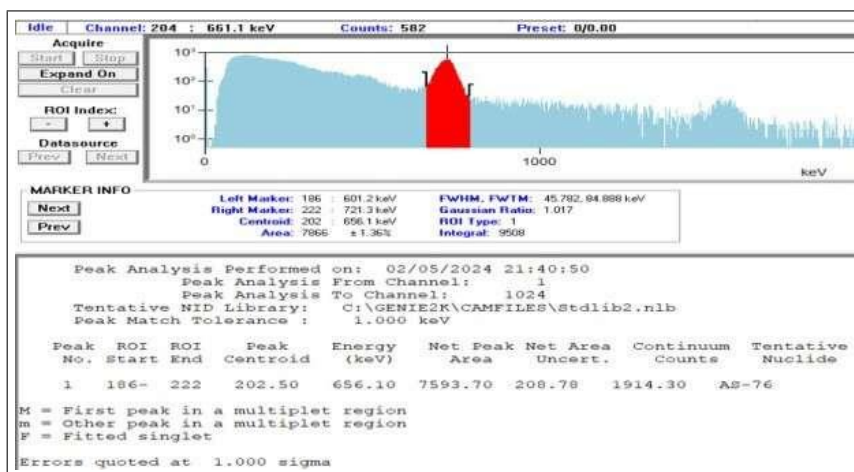
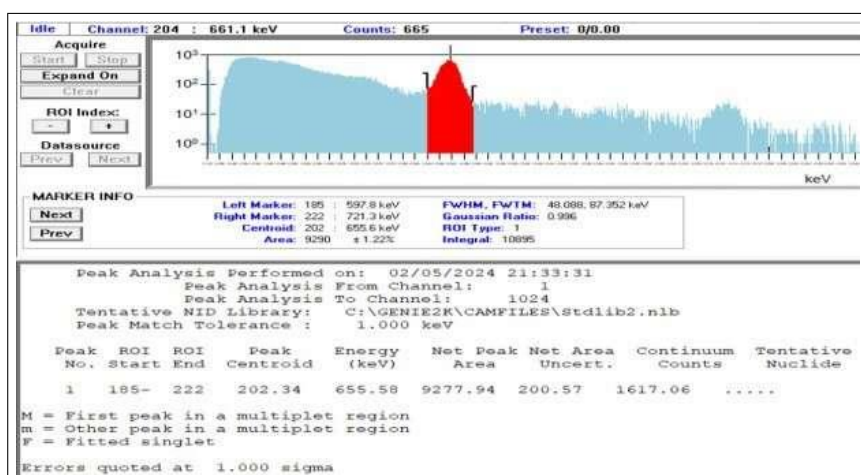


DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Cs-137

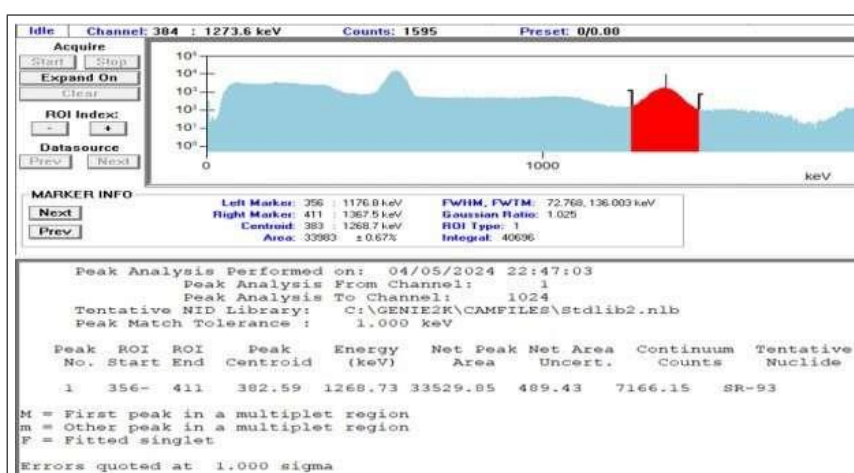
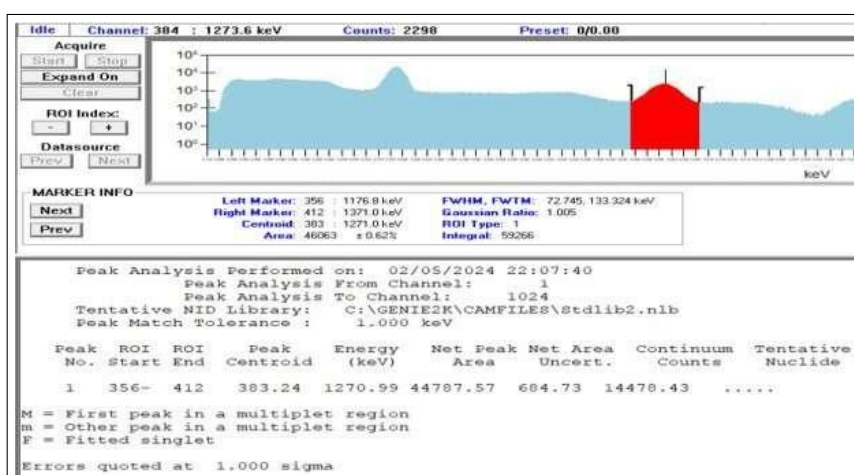
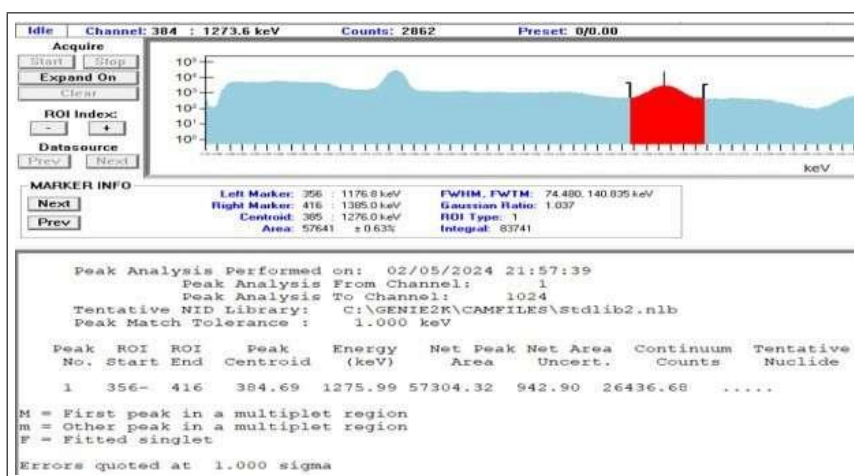


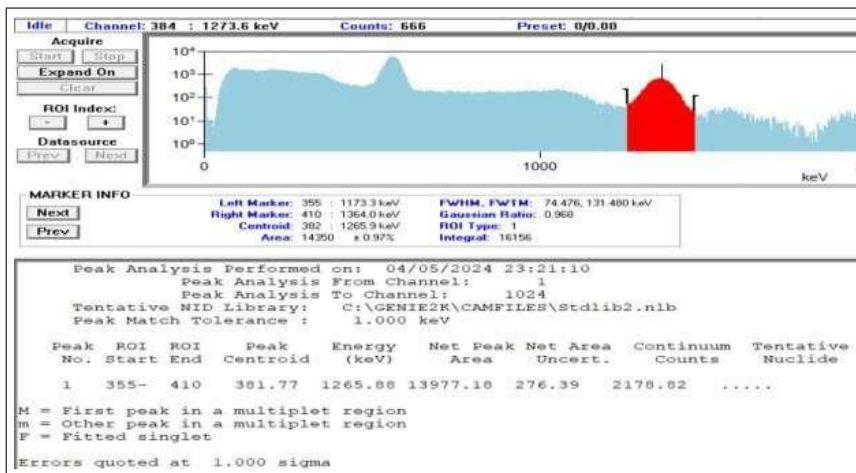
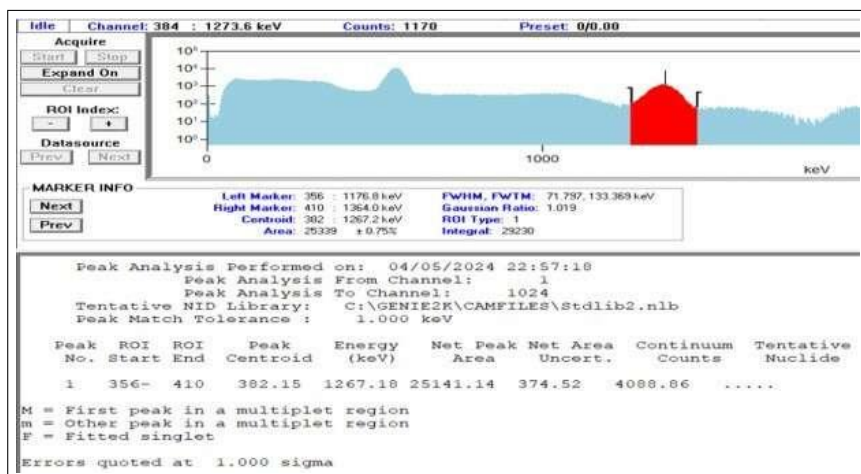


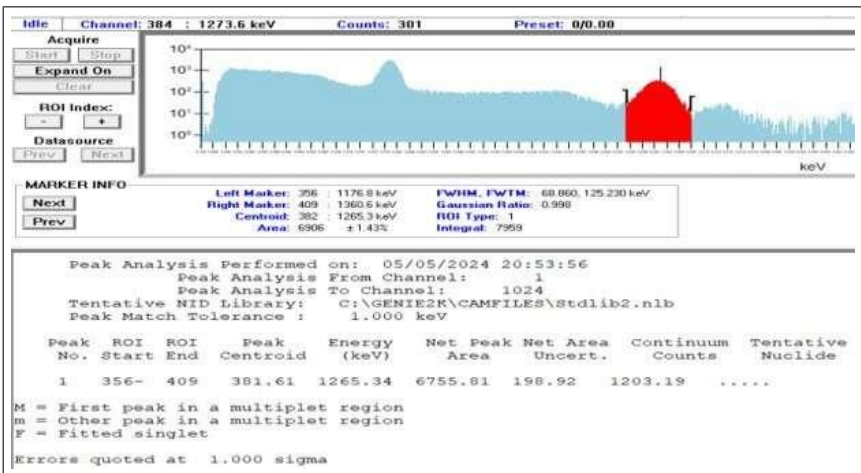
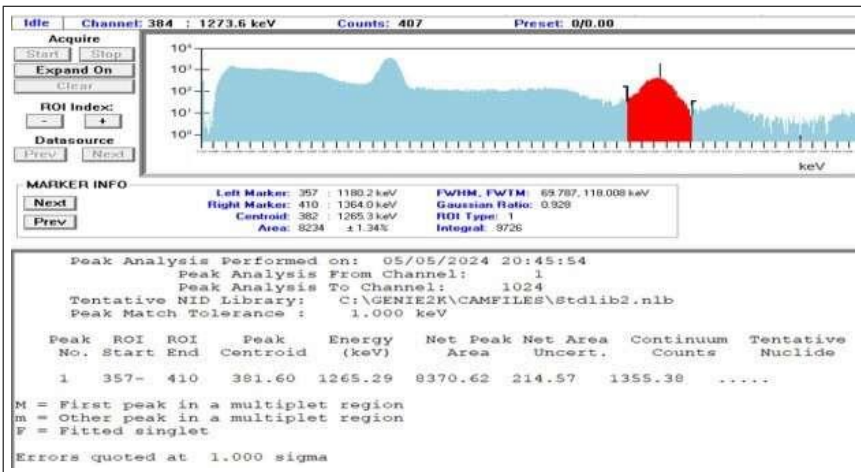
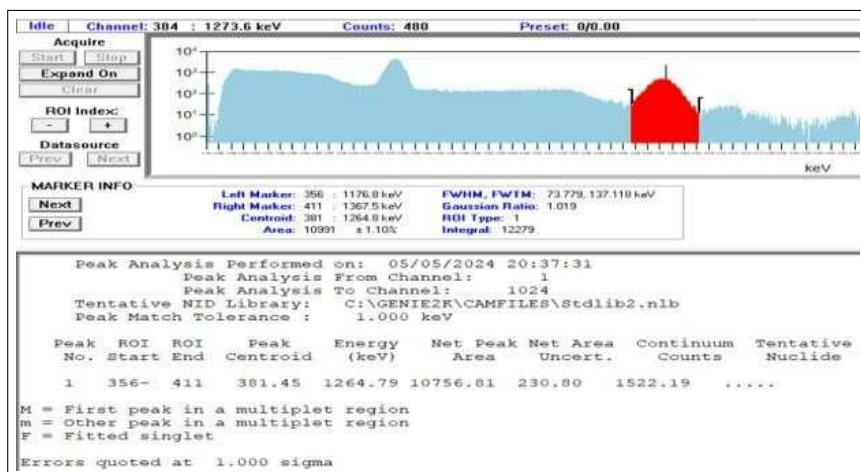


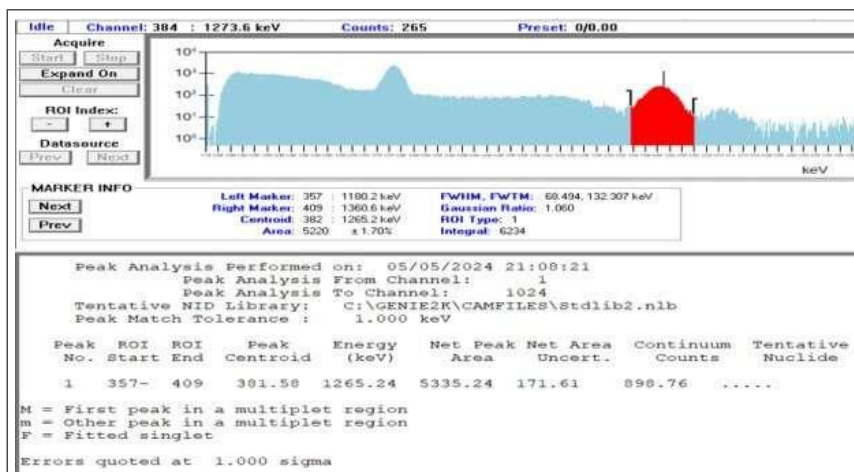
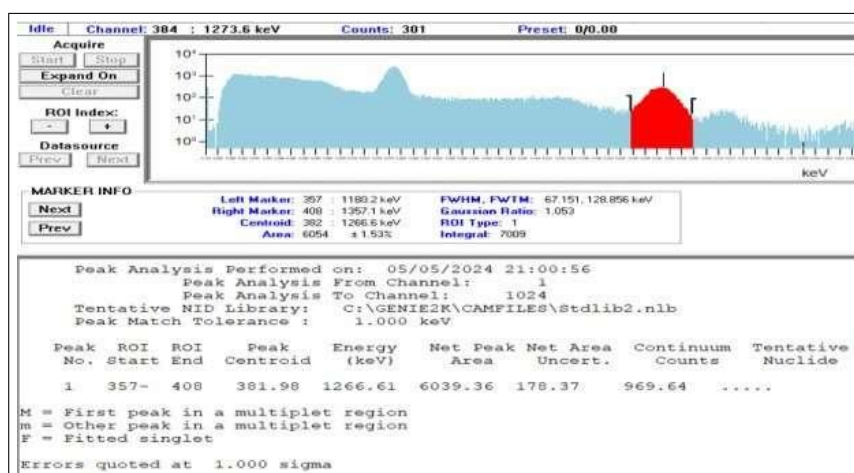


DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Na-22



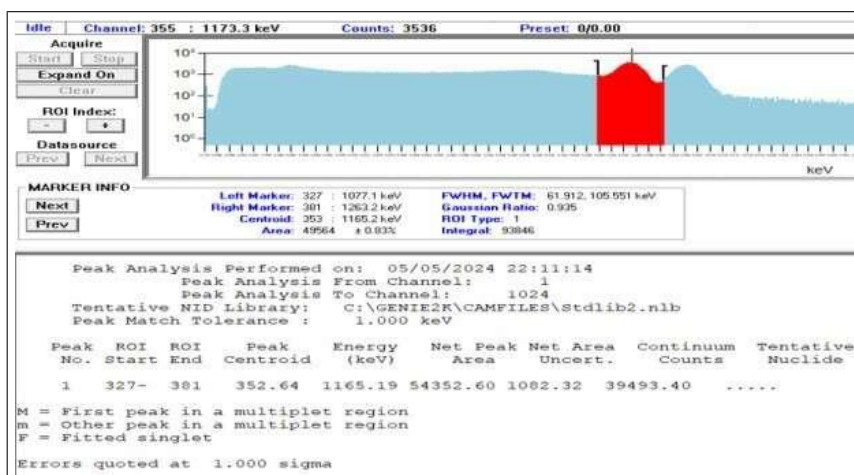
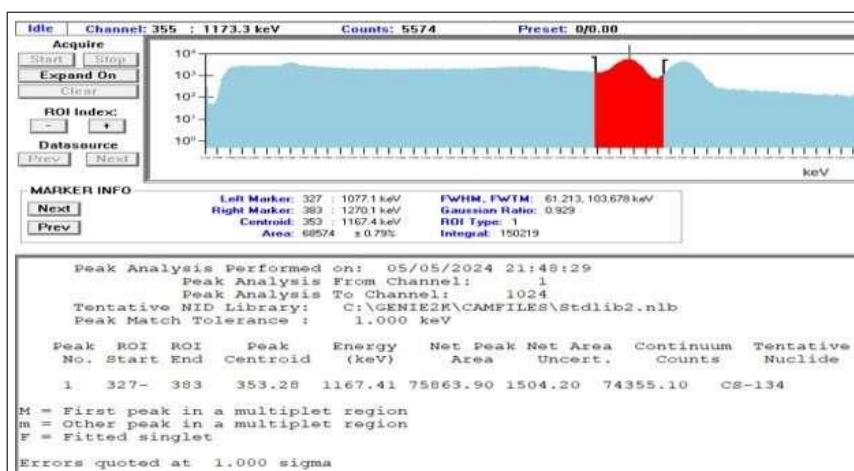
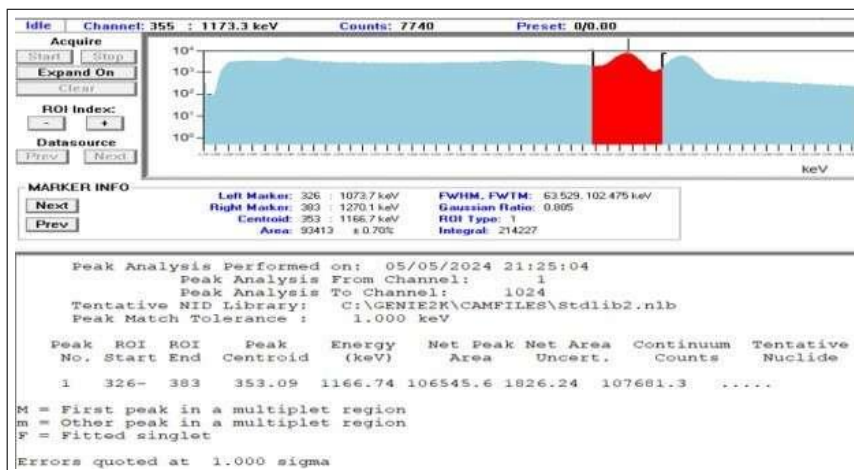


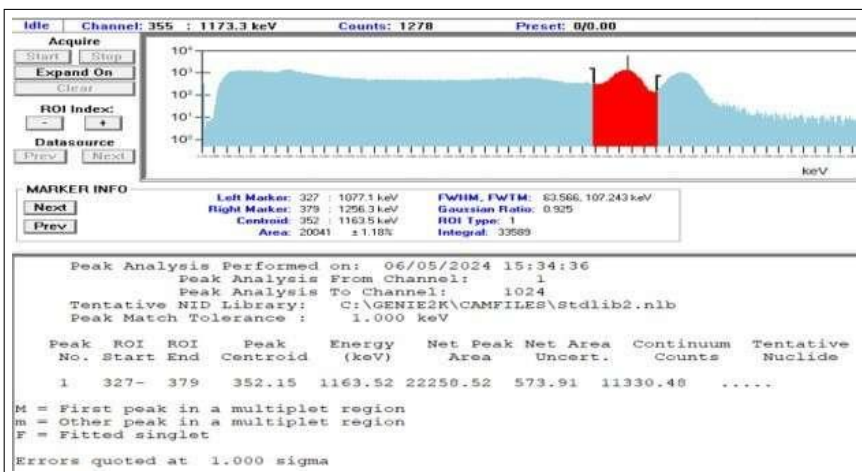
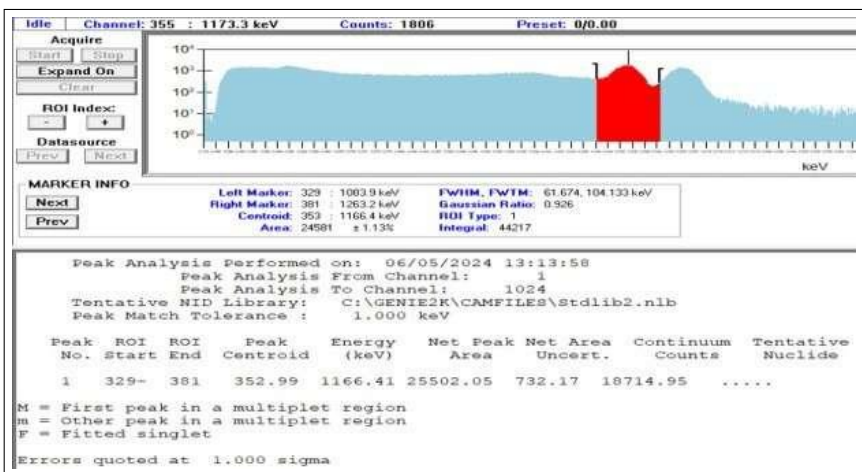
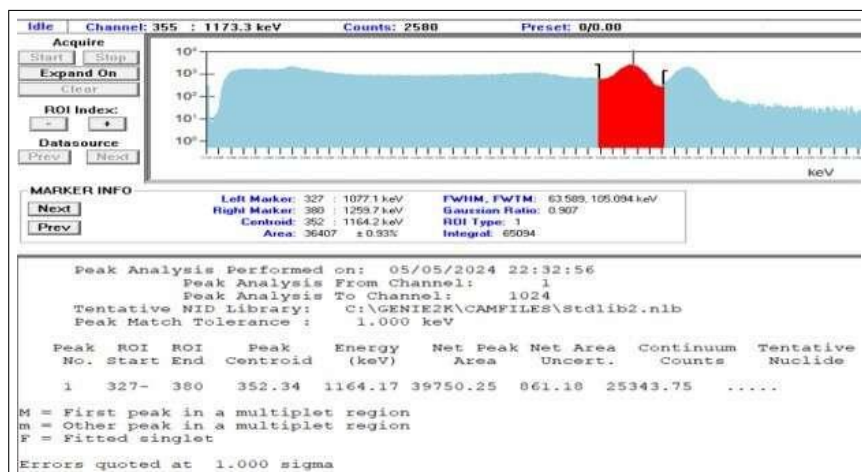


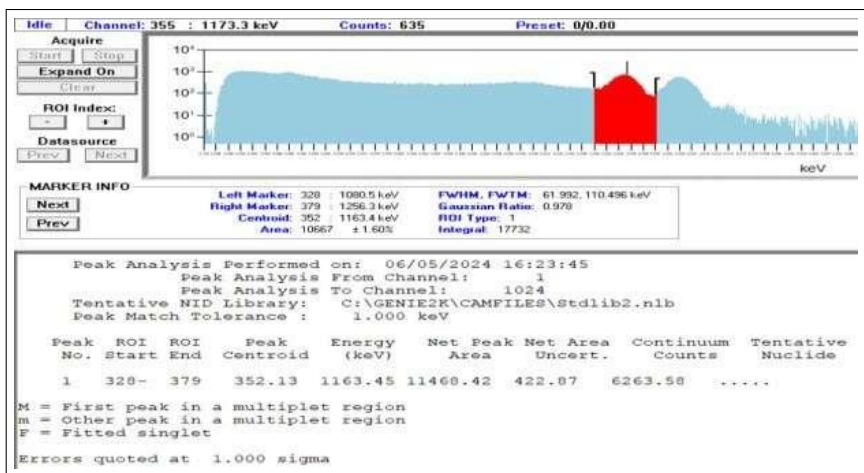
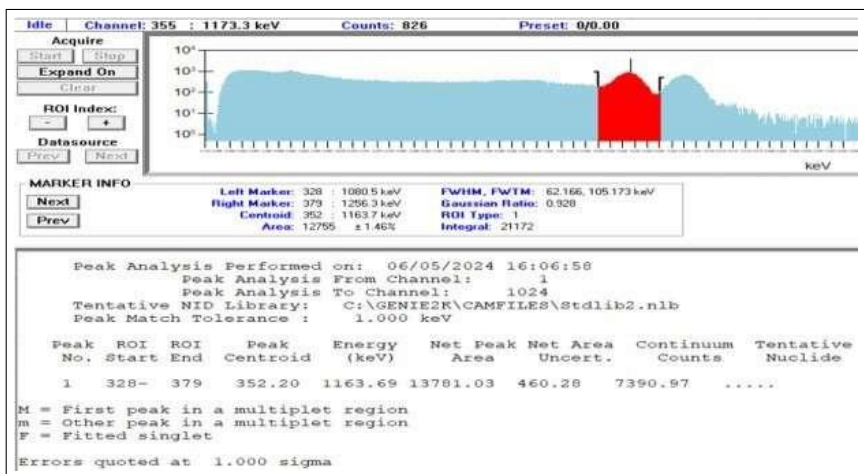
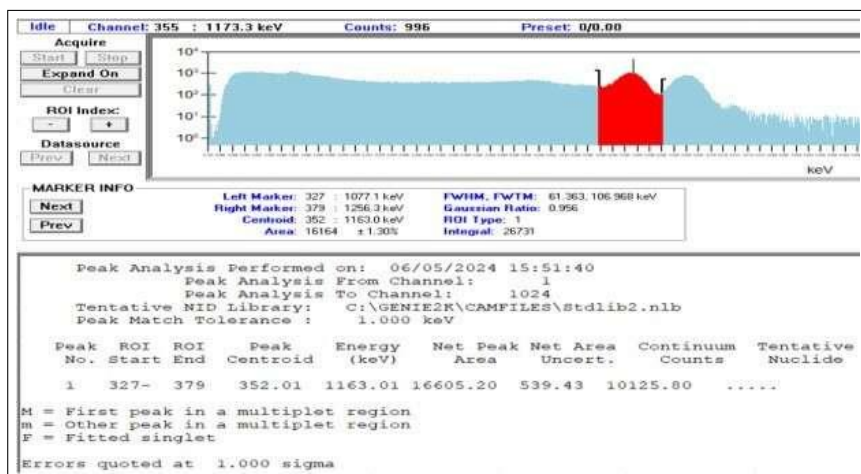


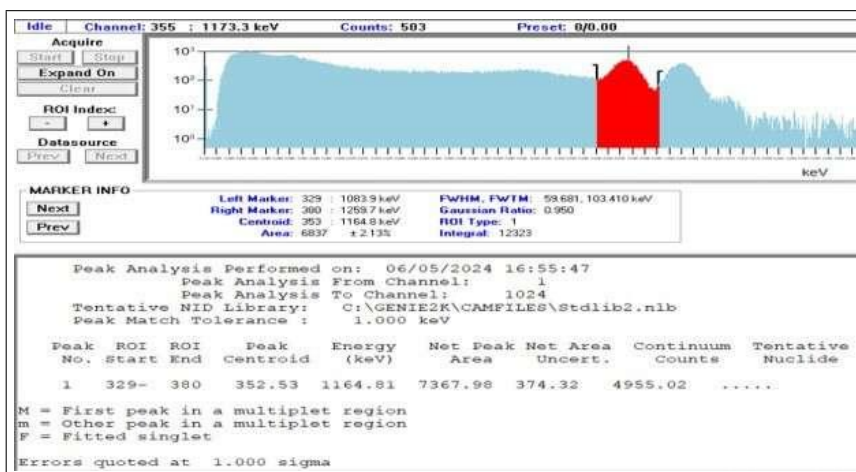
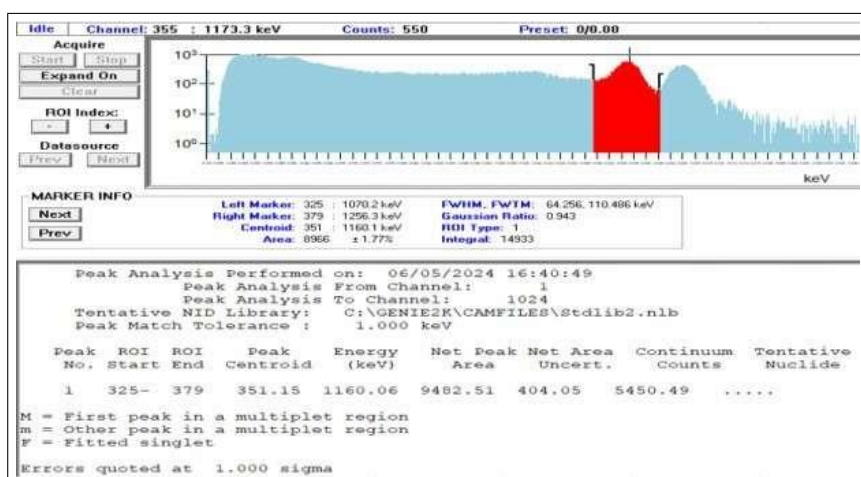
DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1173,2 keV)



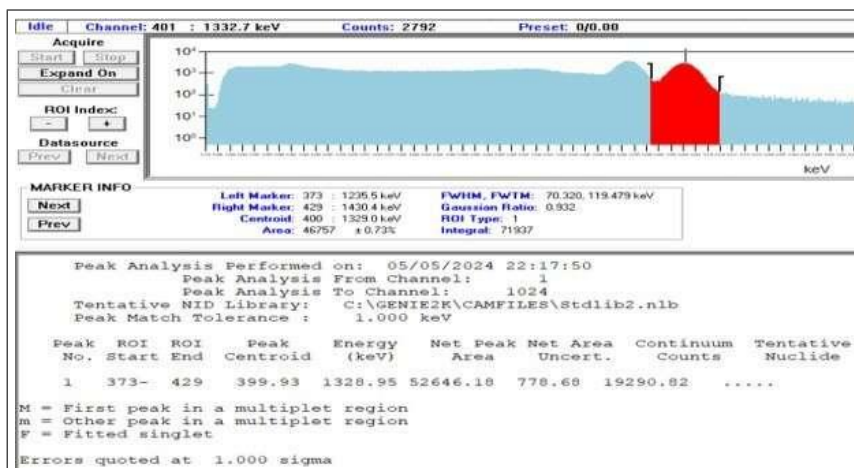
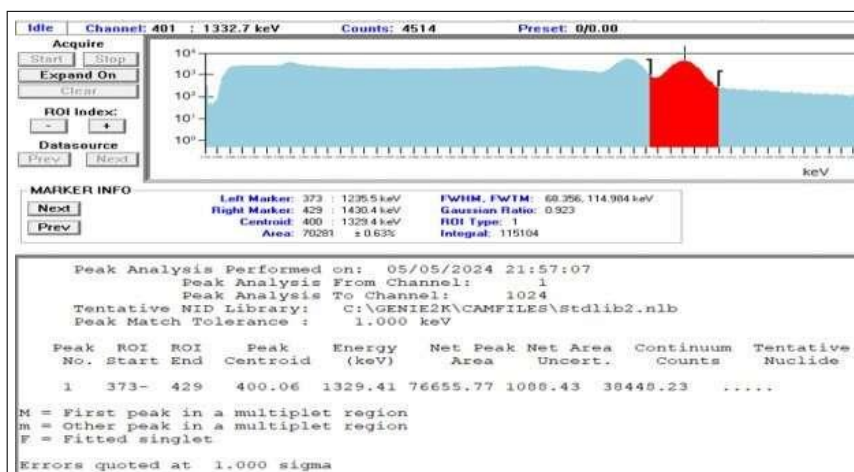
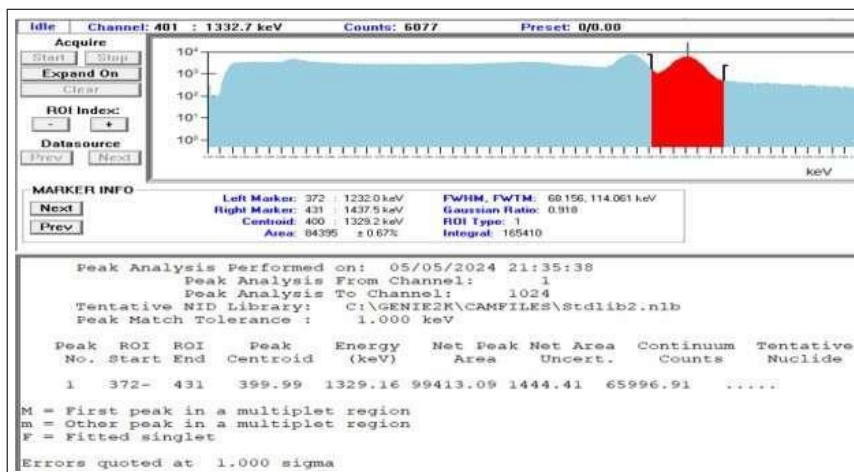


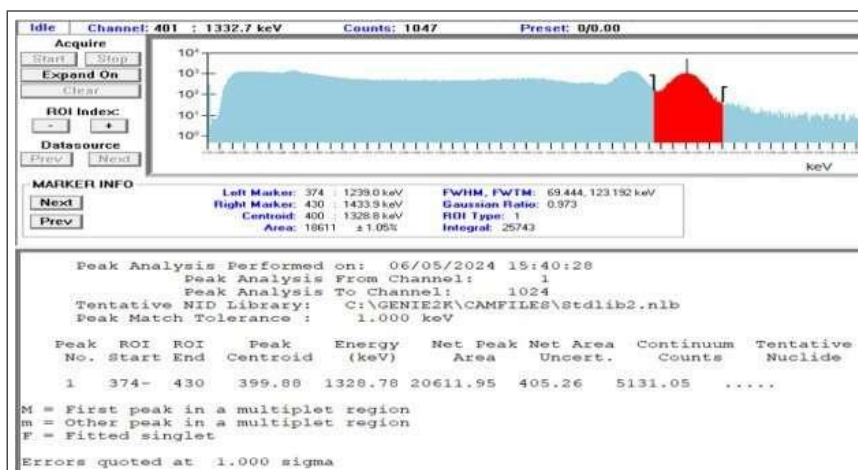
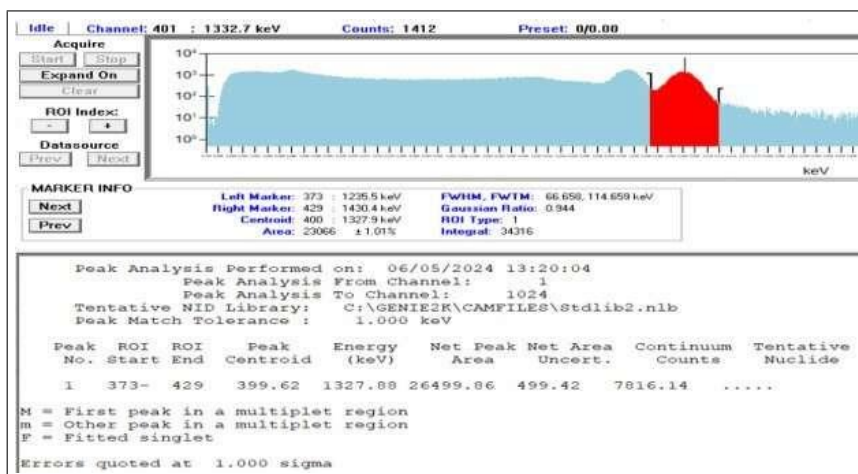
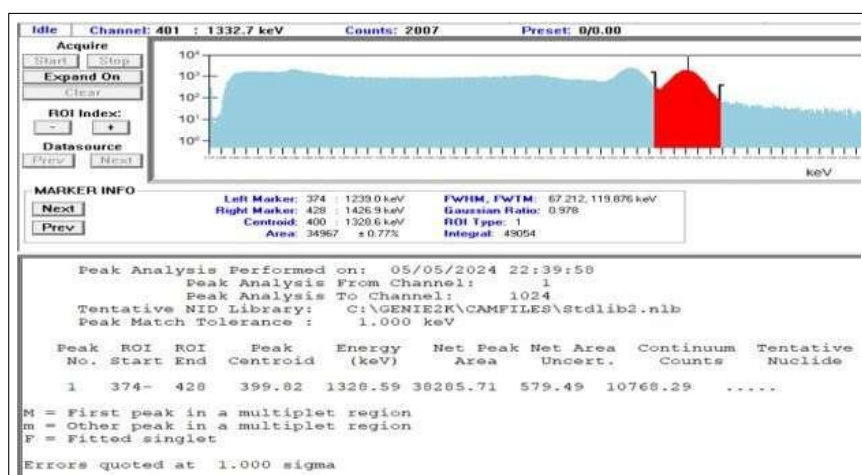


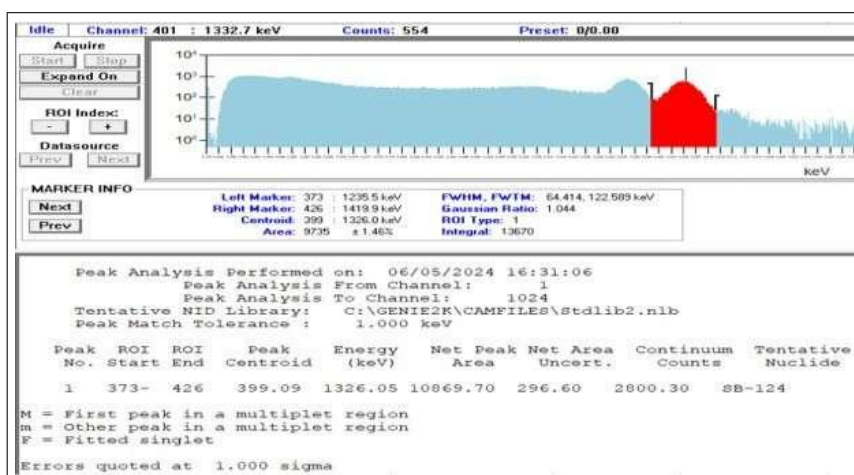
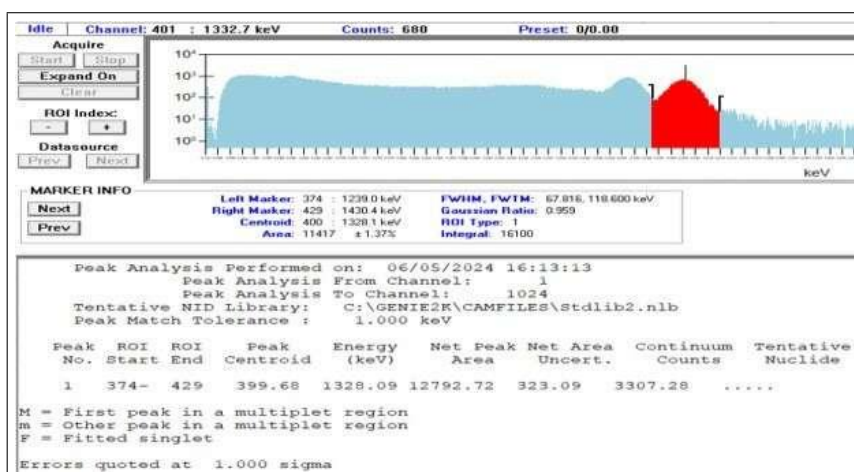
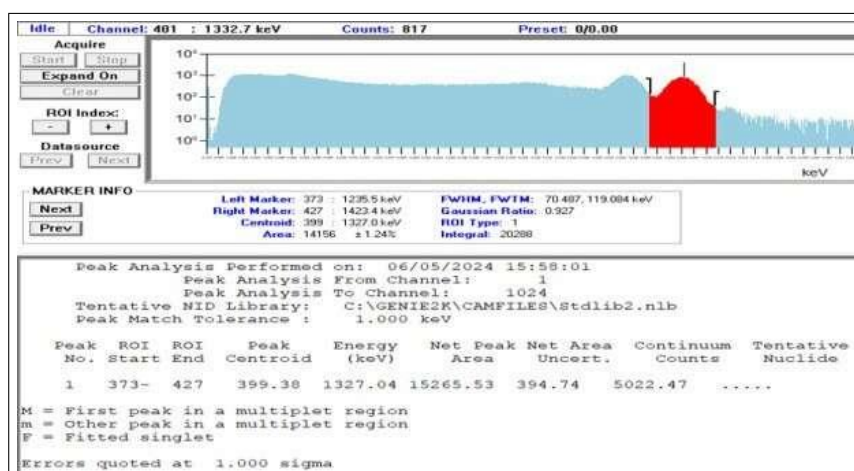


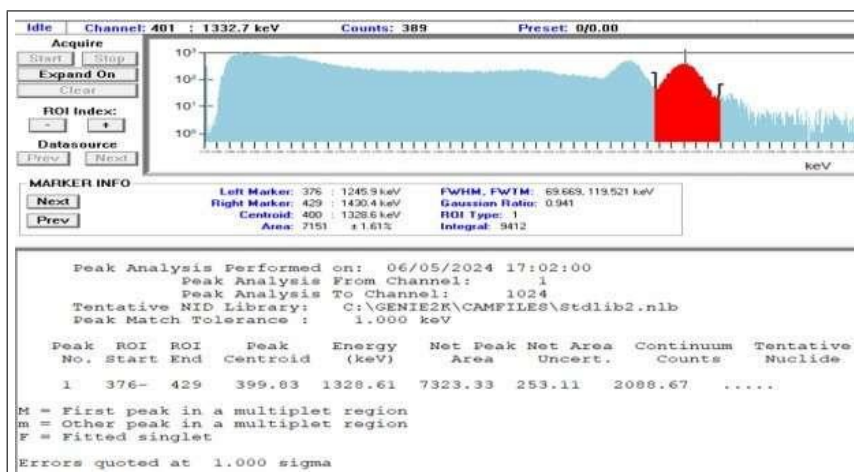
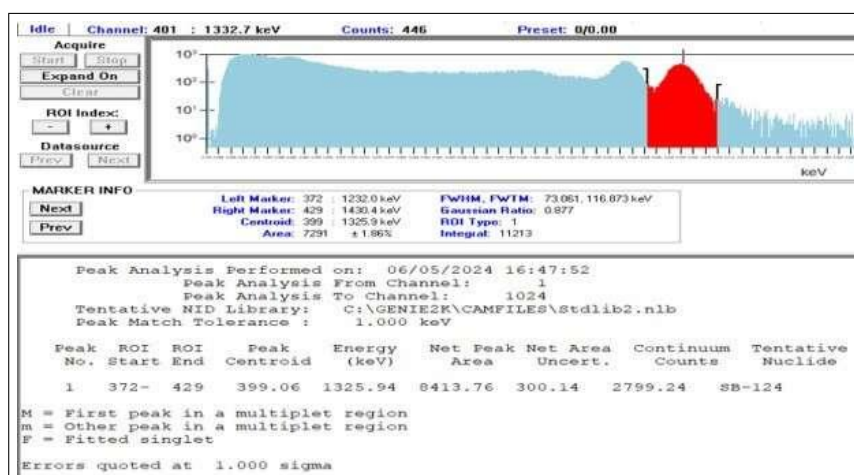
DETECTOR 2"x2" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1332,5 keV)

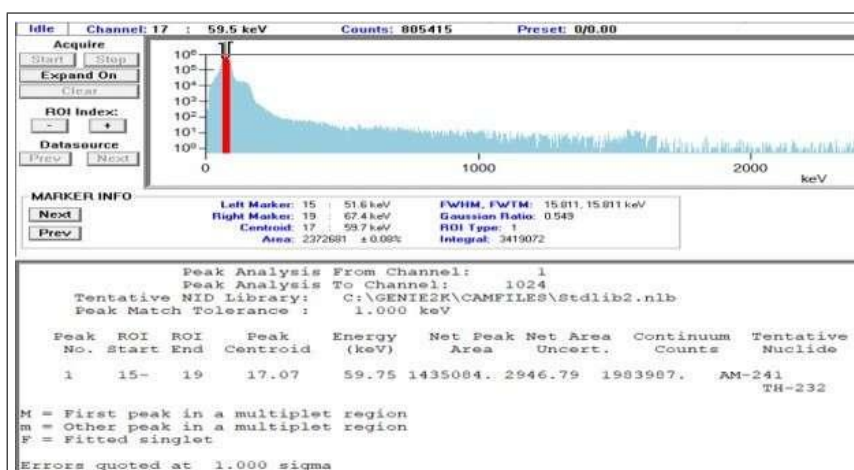
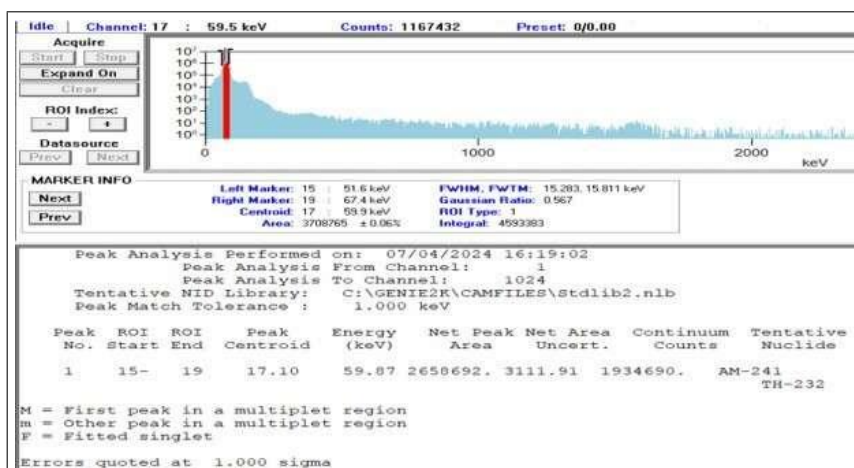
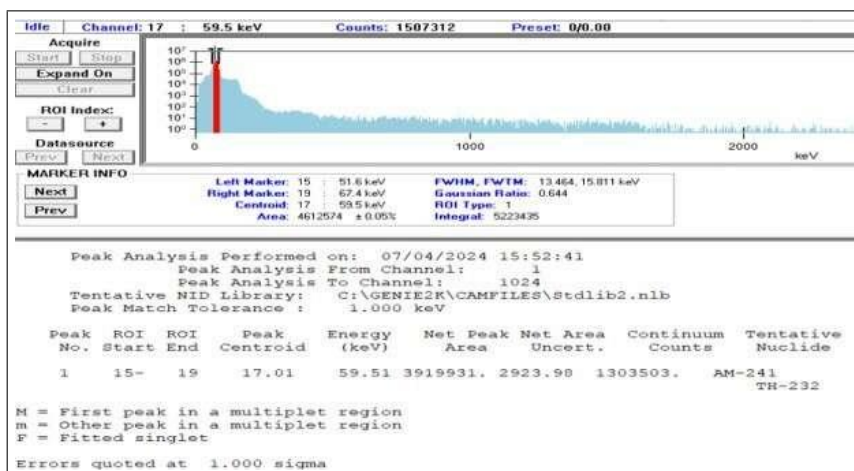


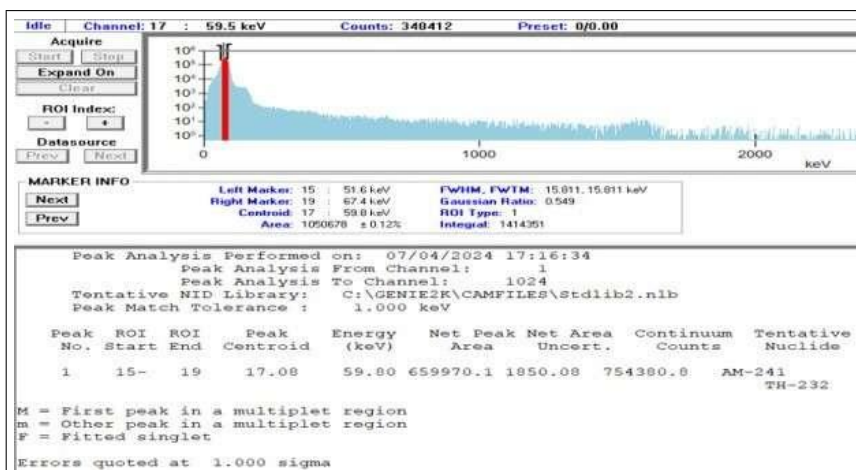
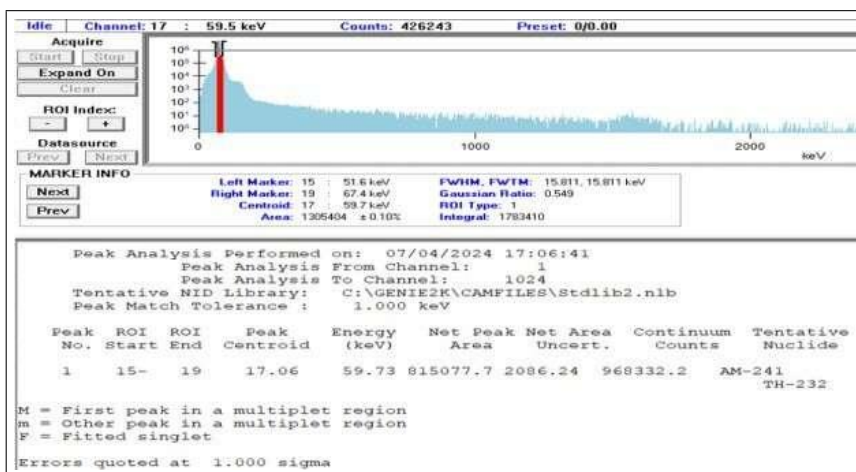
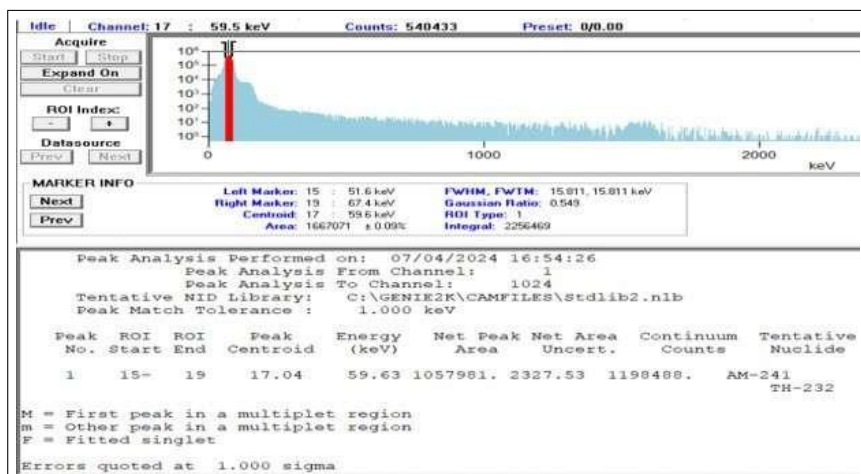


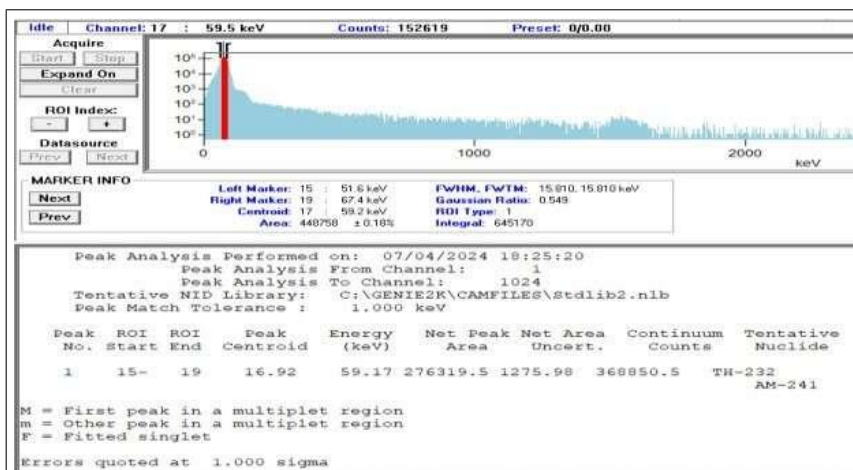
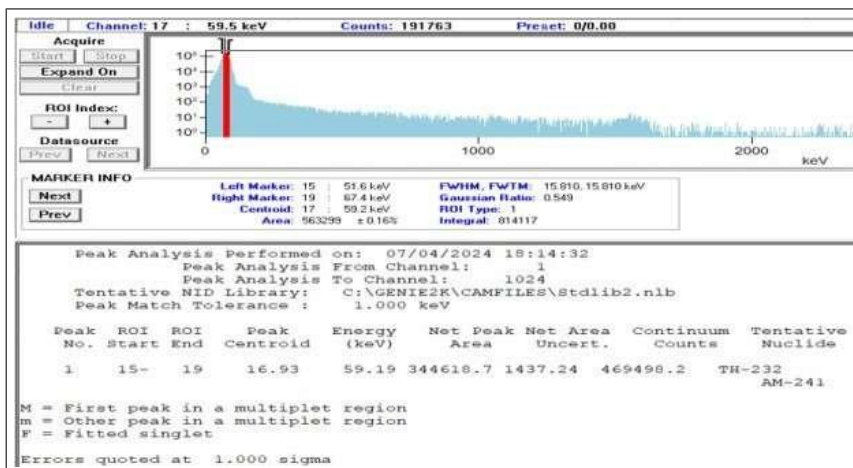
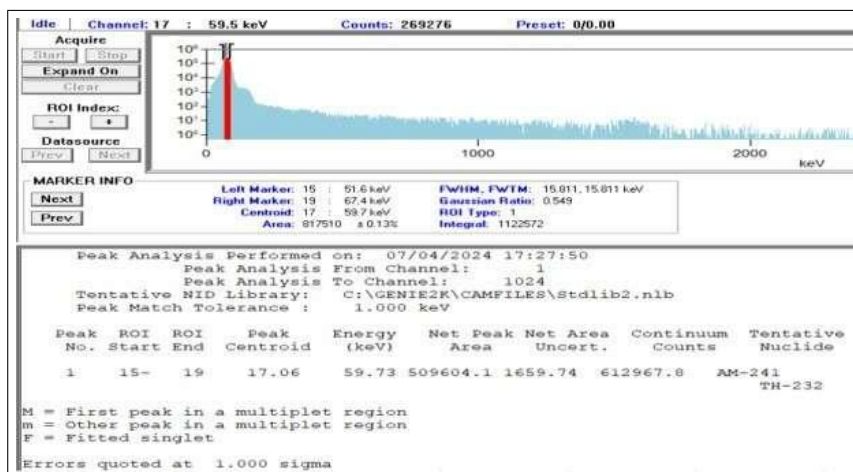


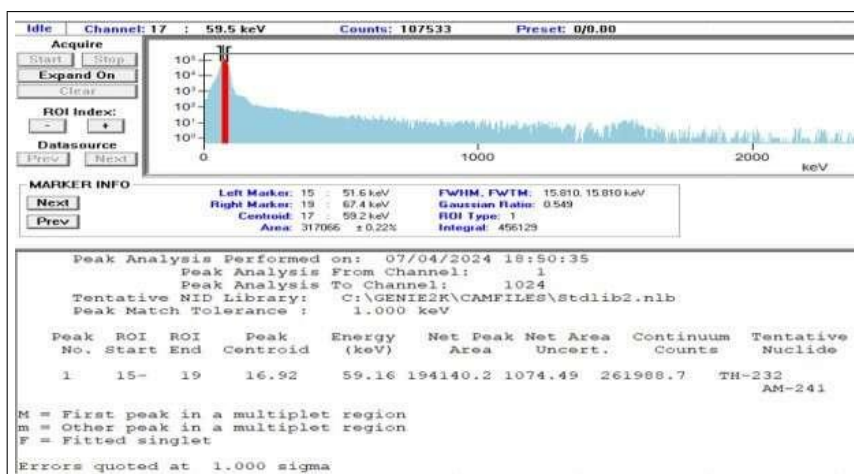
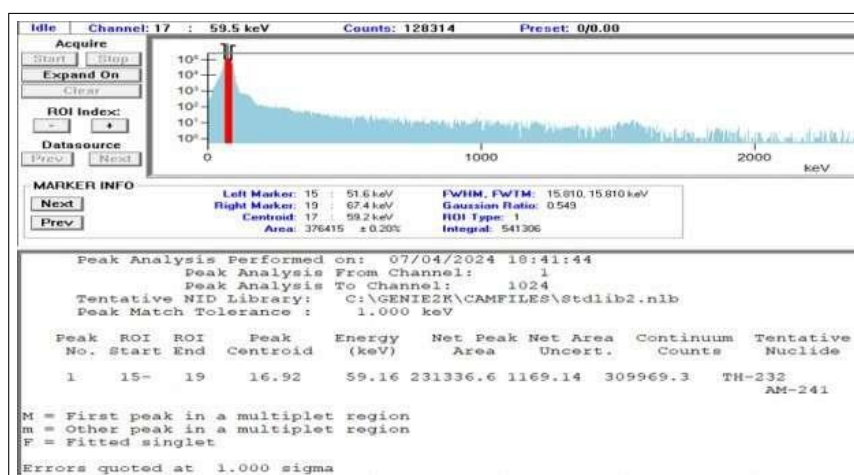


DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Am-241

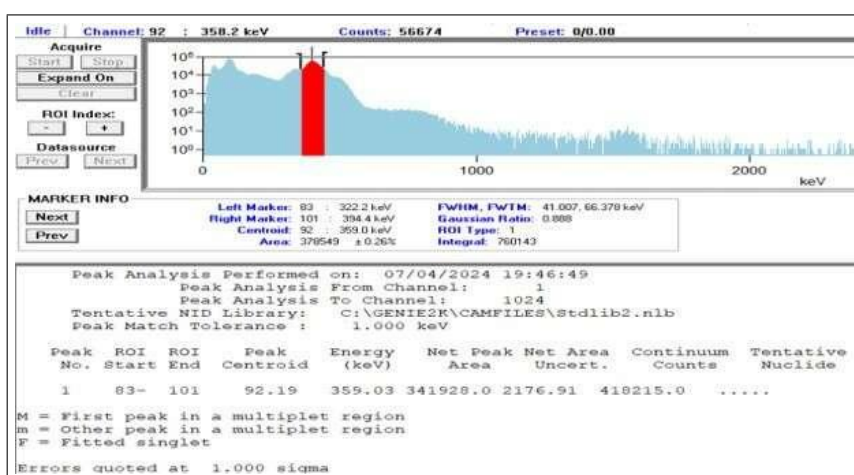
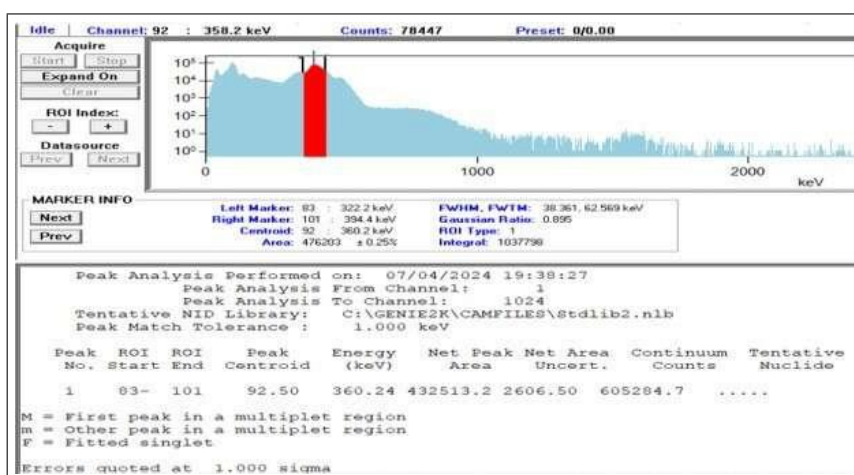
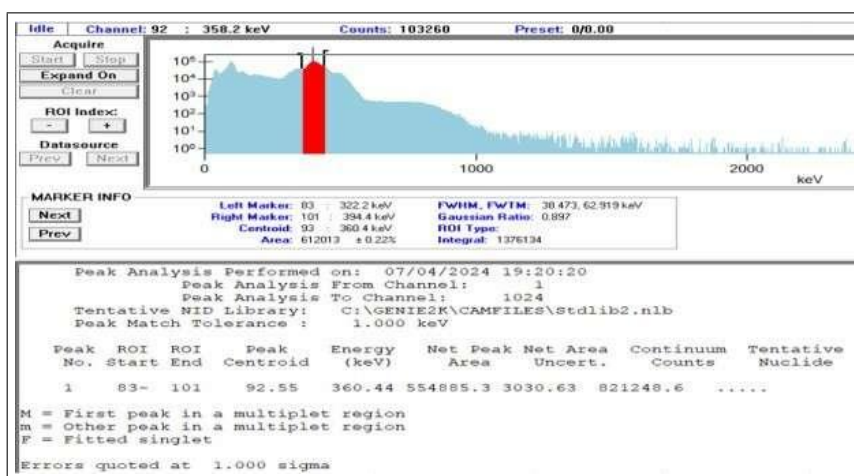


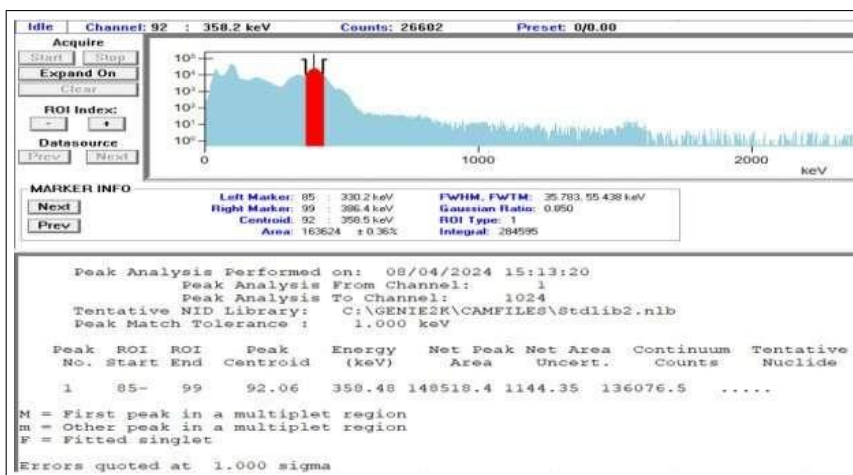
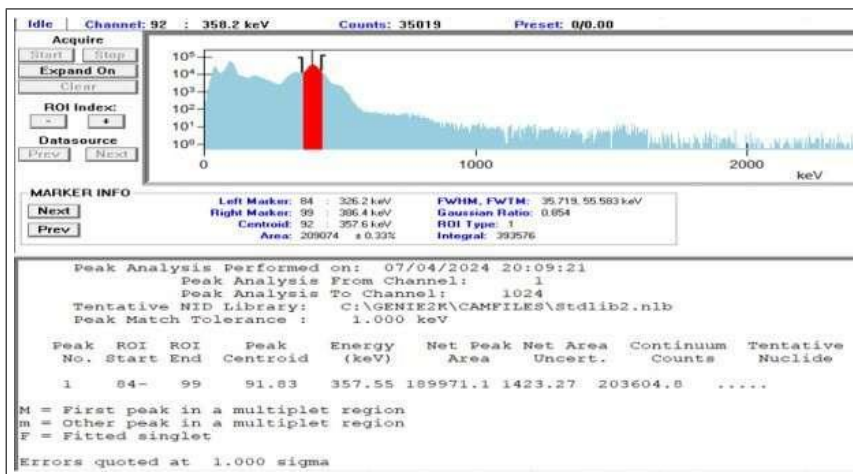
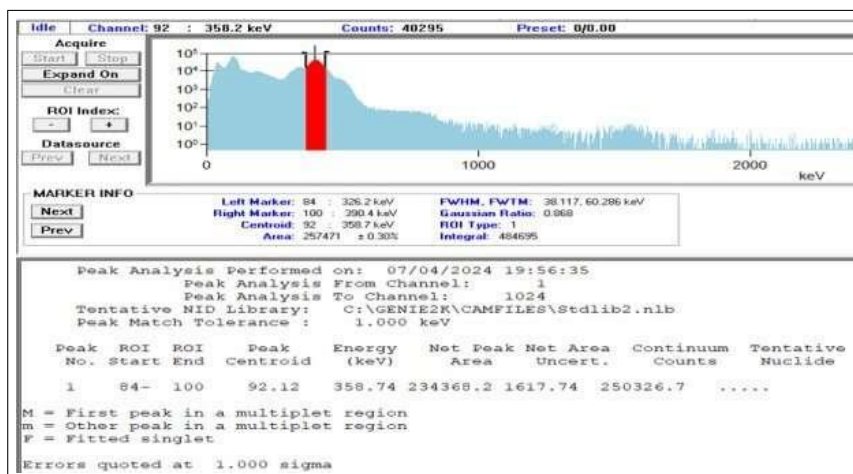


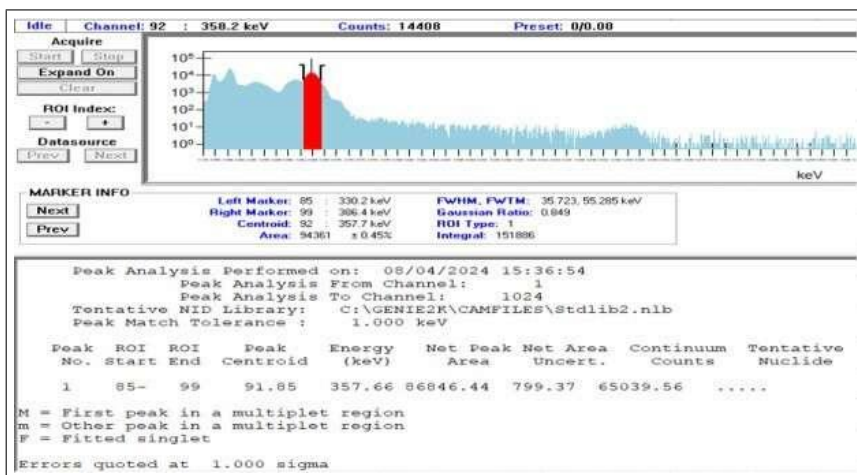
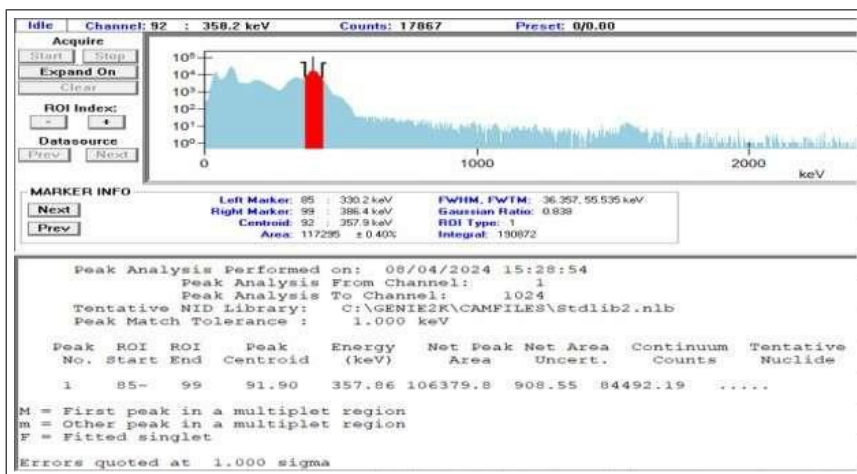
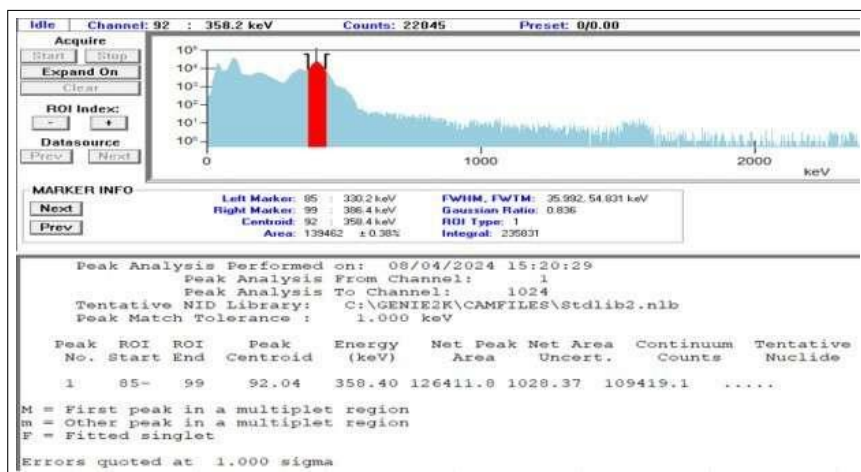


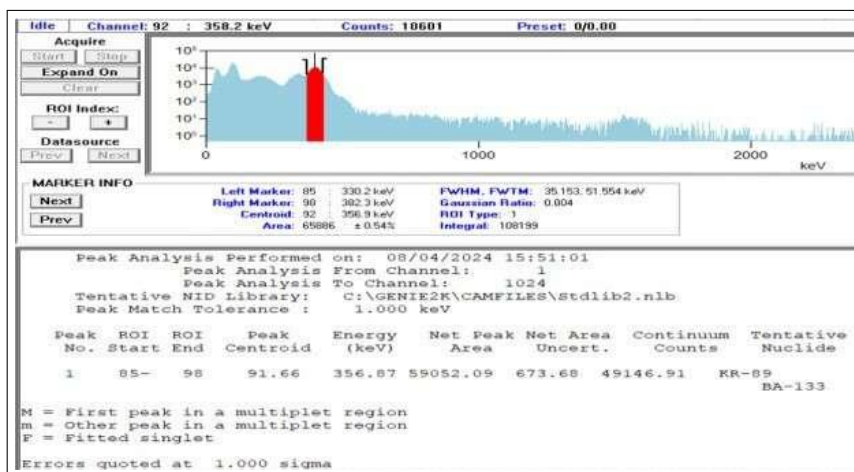
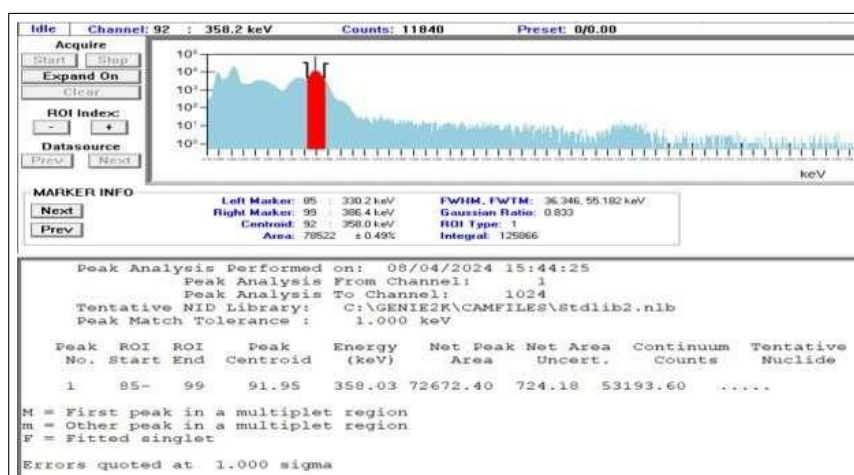


DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Ba-133

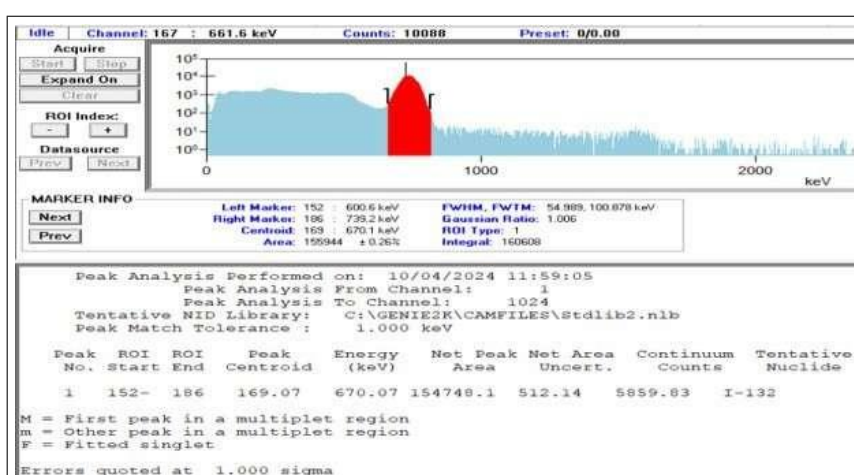
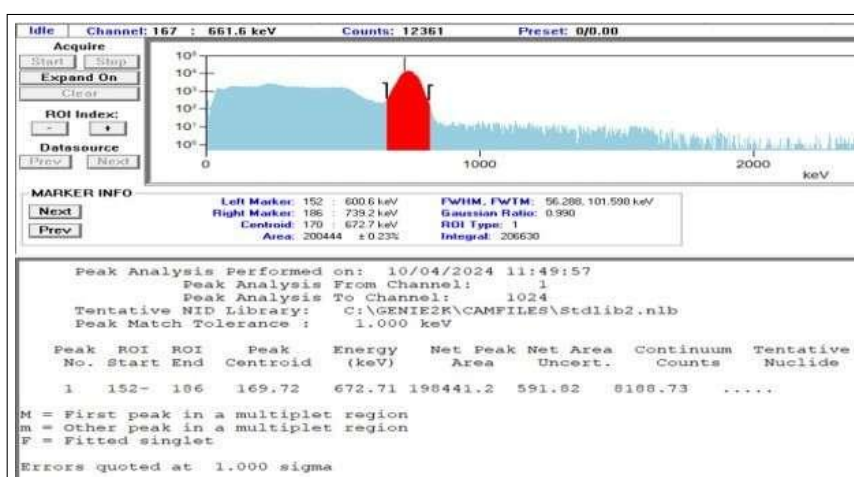
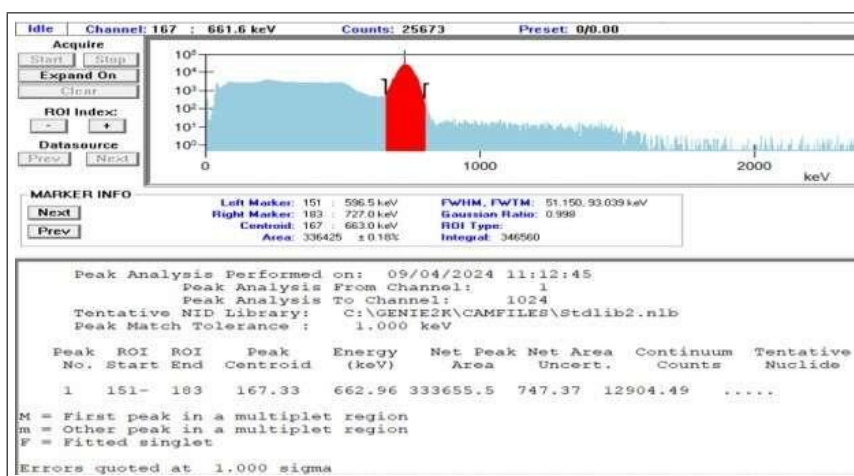


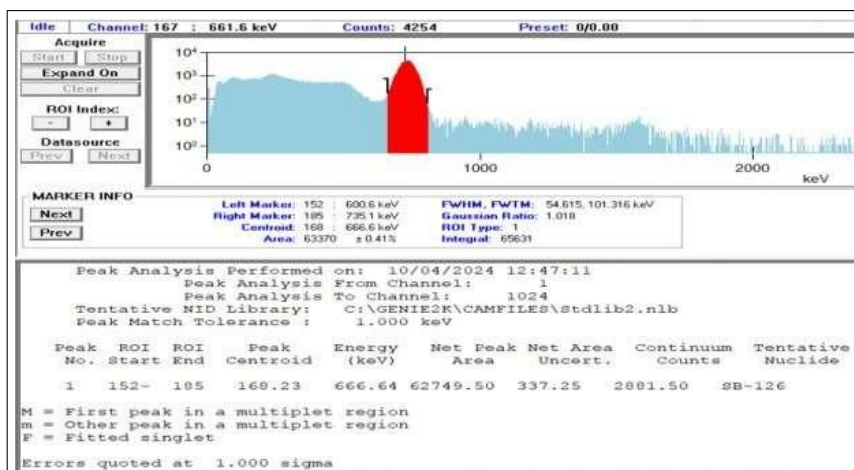
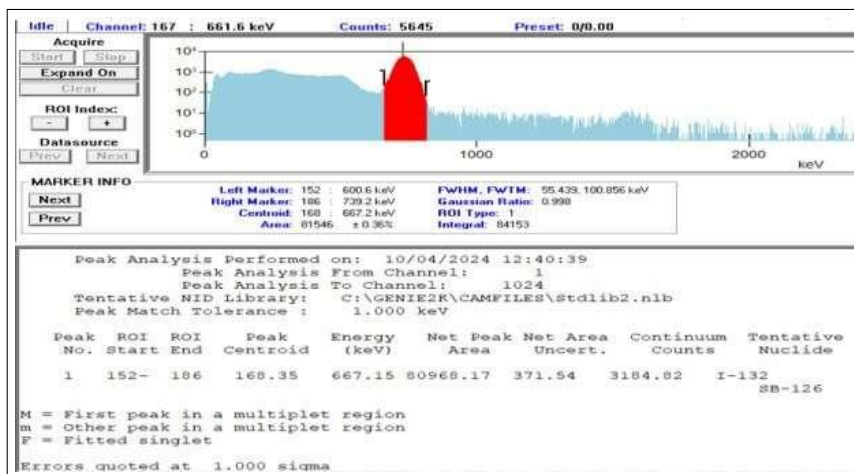
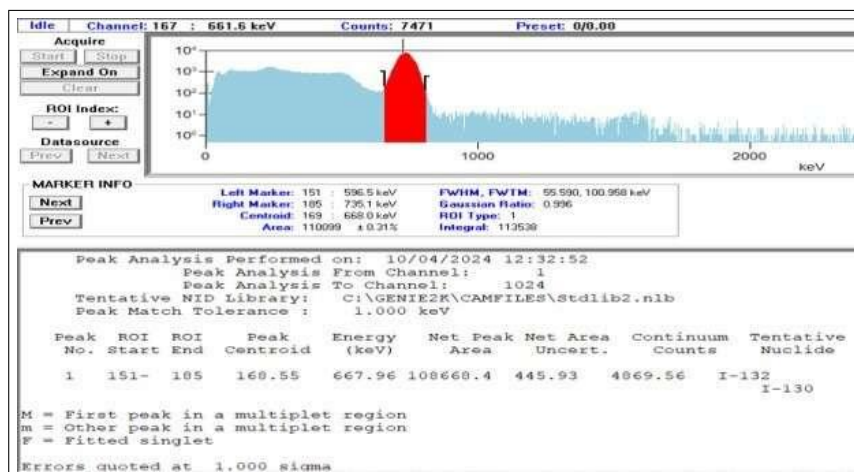


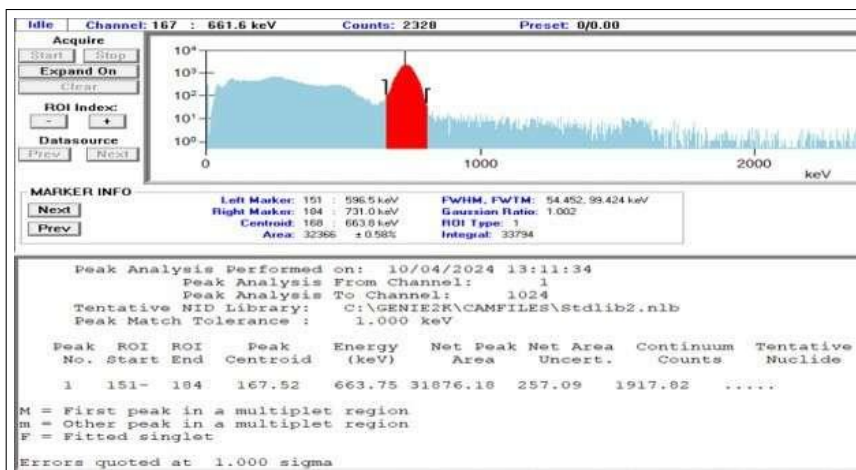
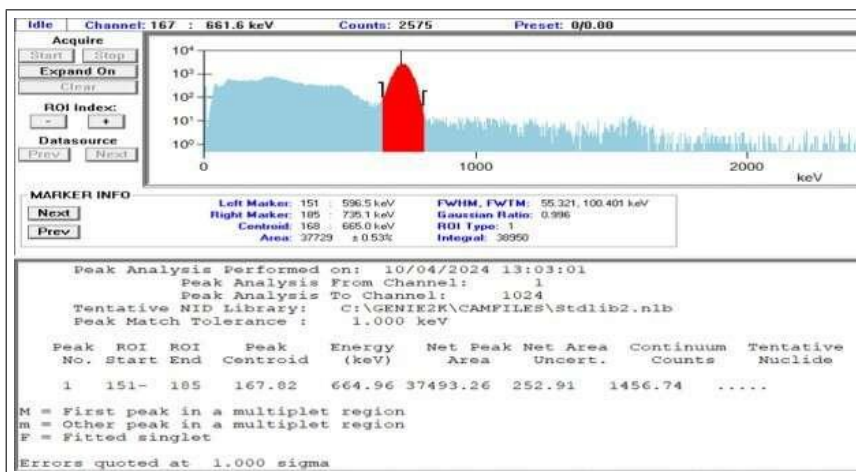
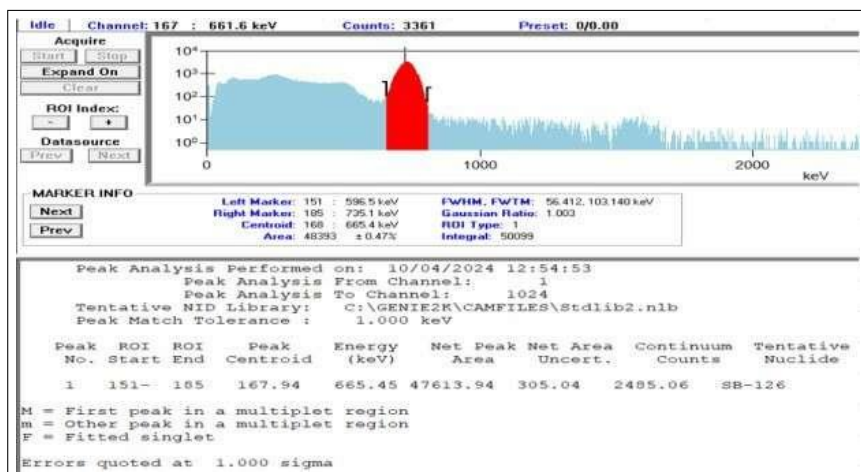


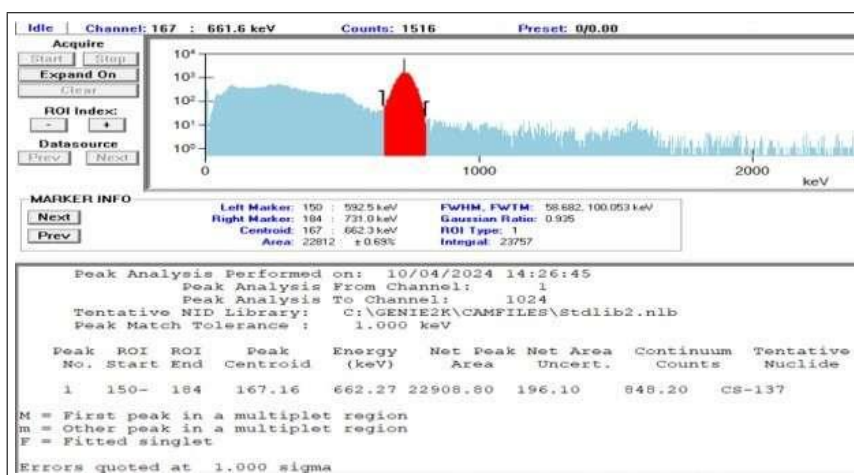
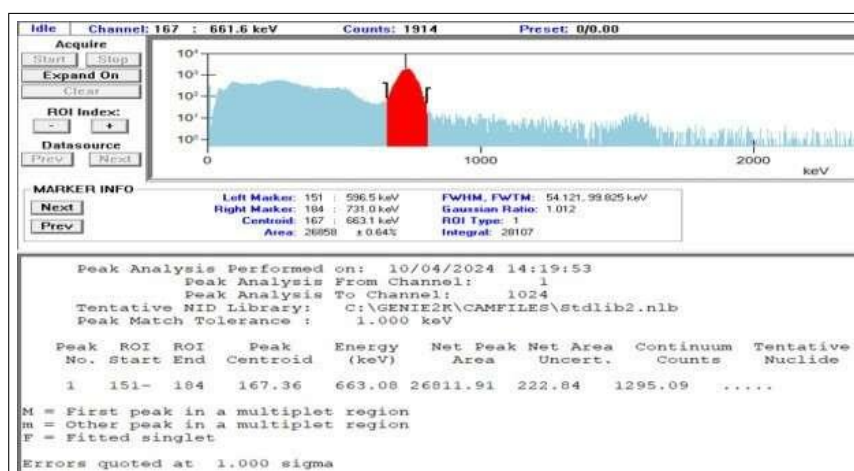


DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Cs-137

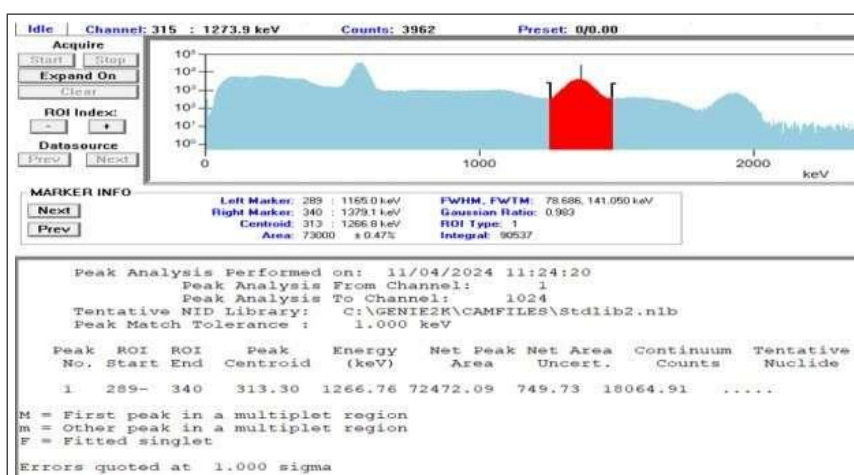
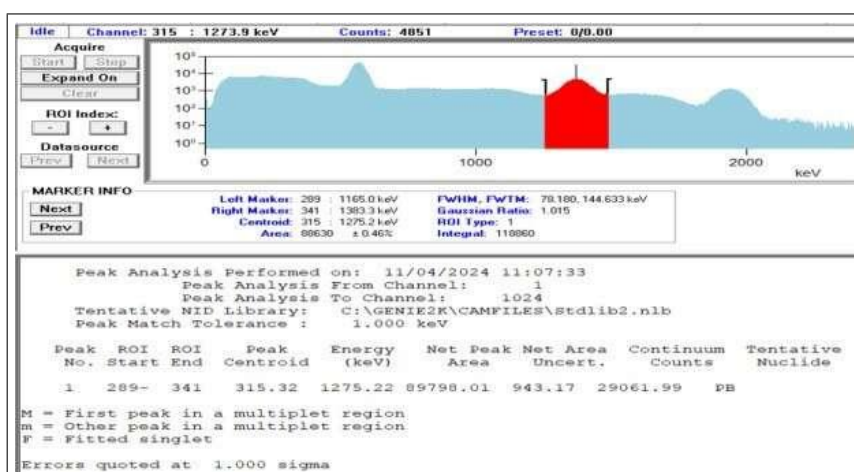
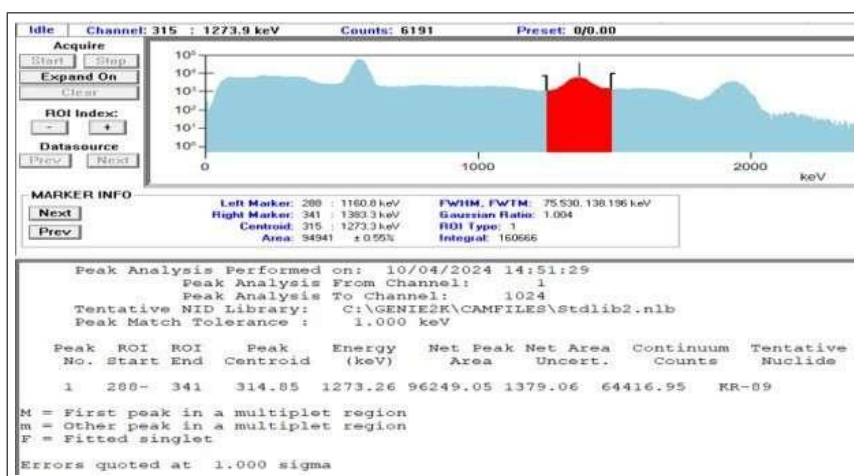


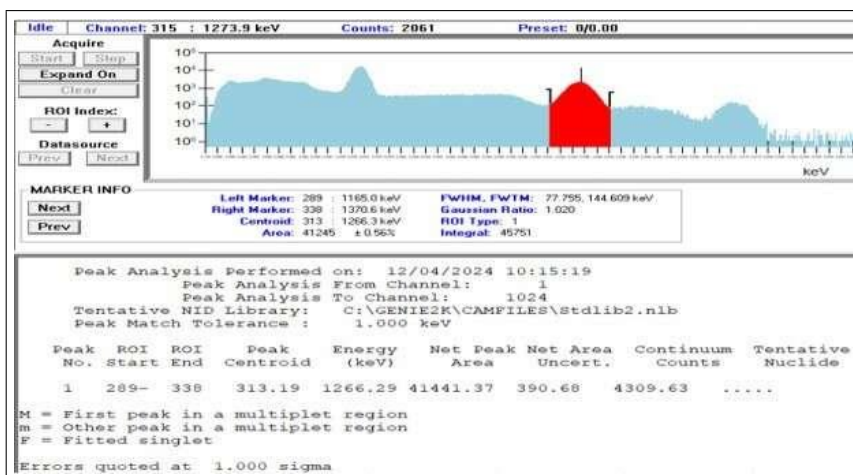
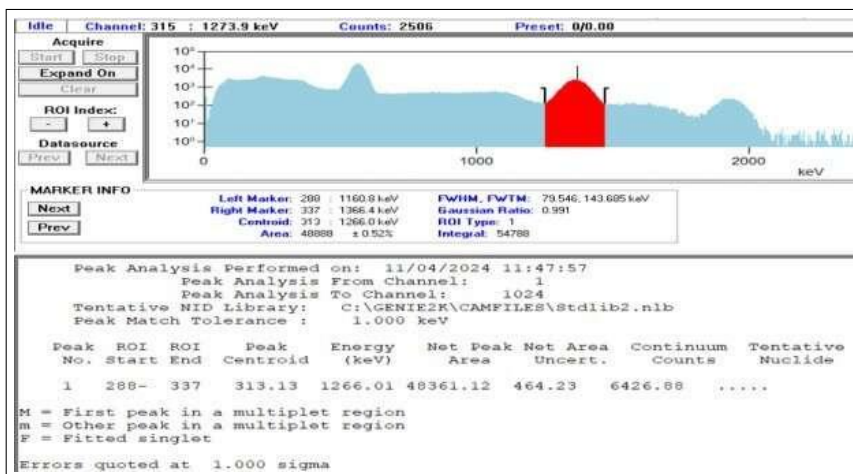
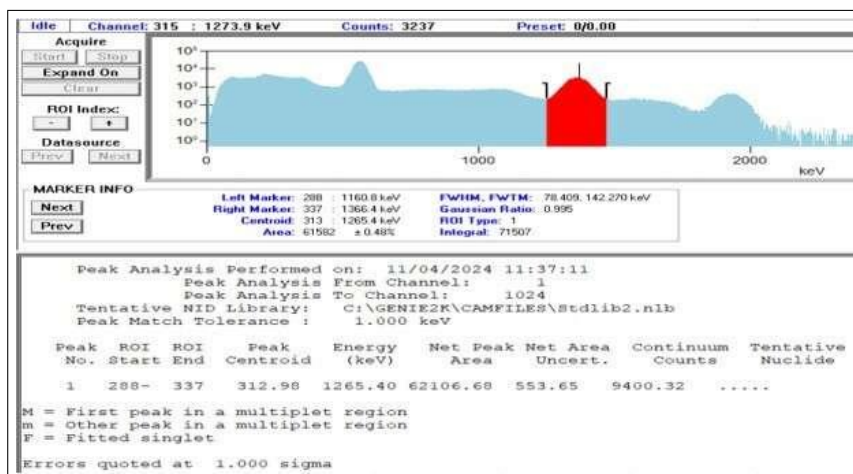


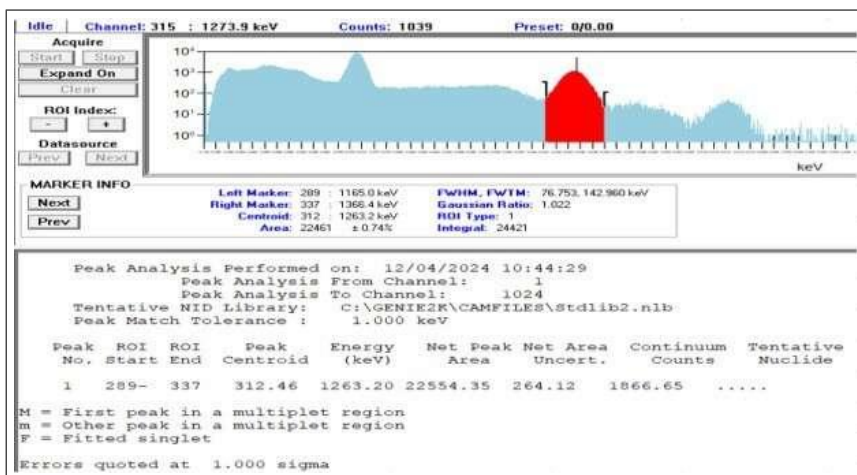
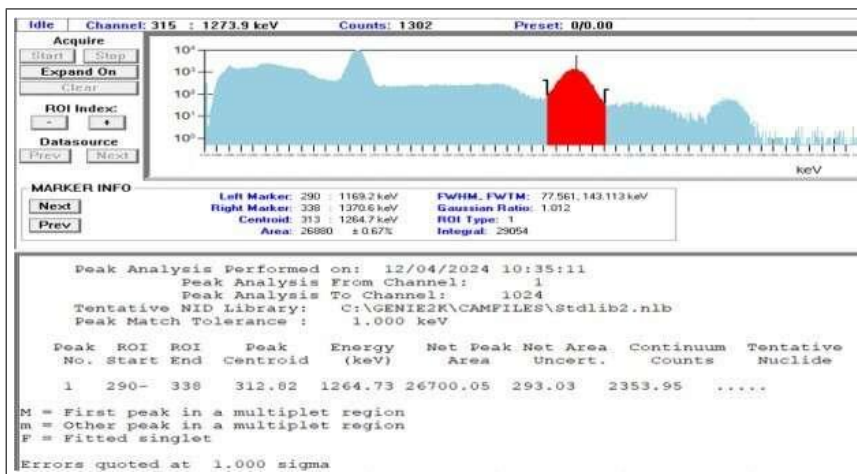
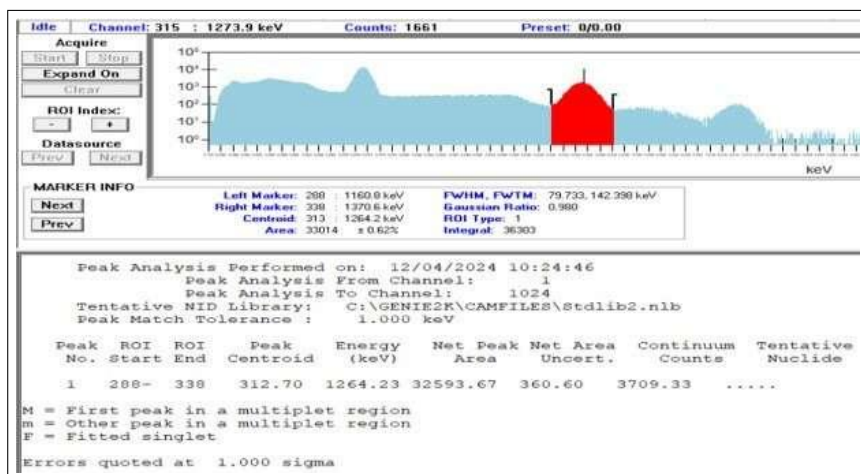


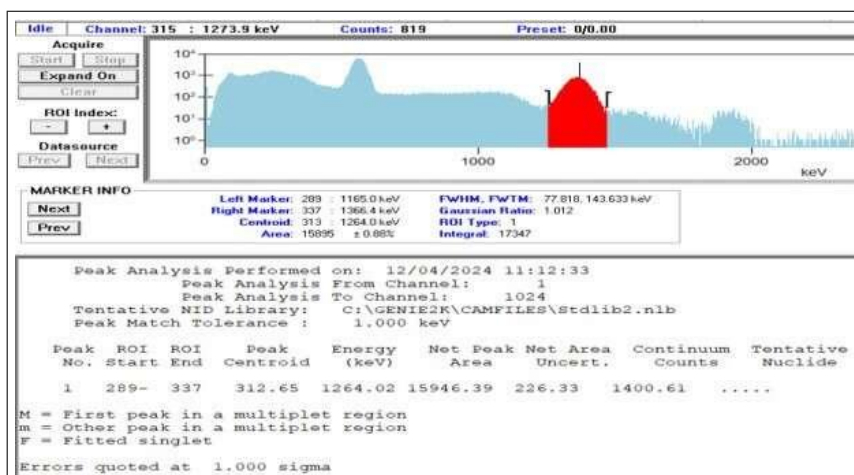
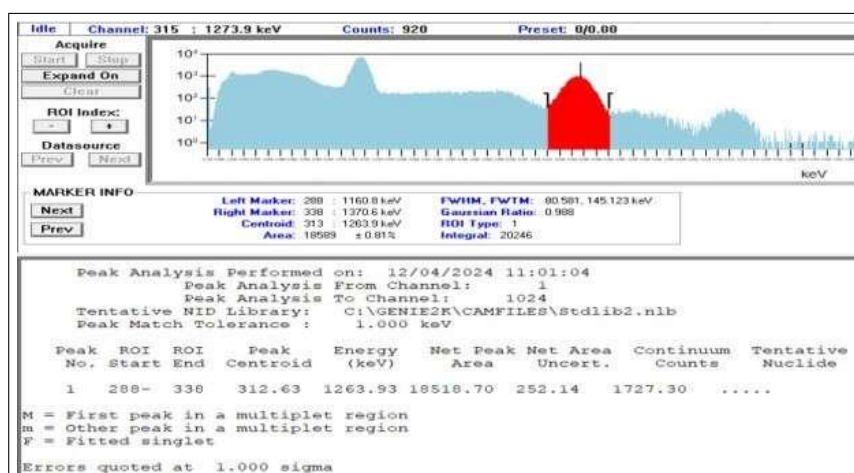


DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA Na-22



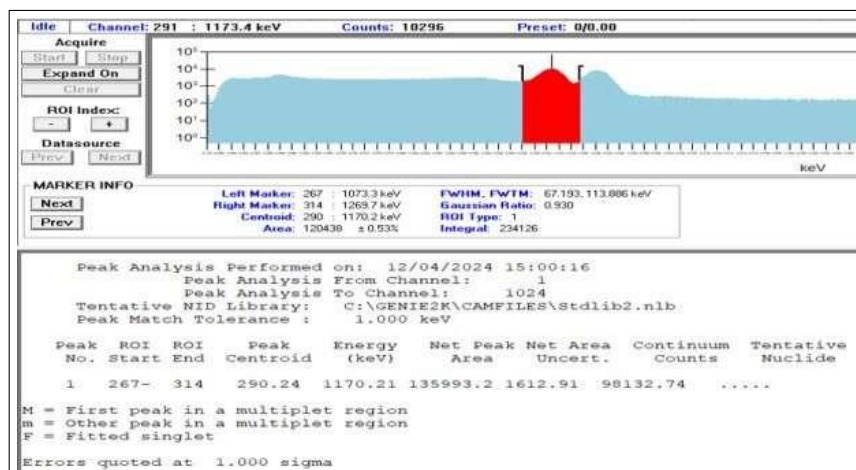
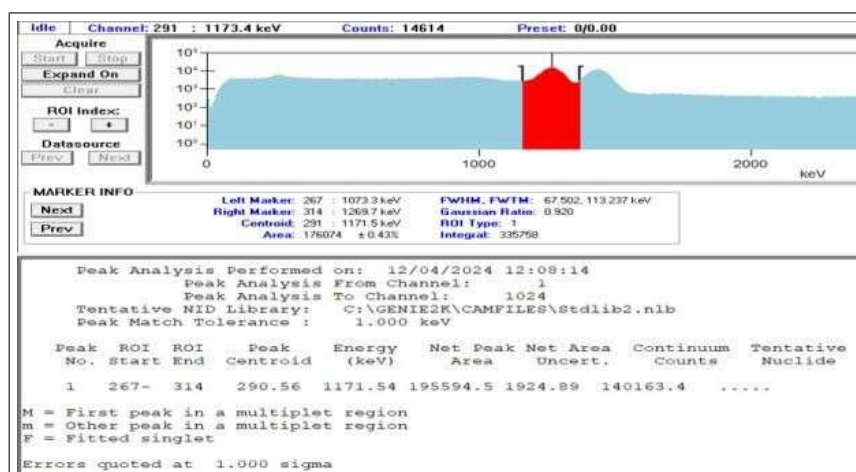
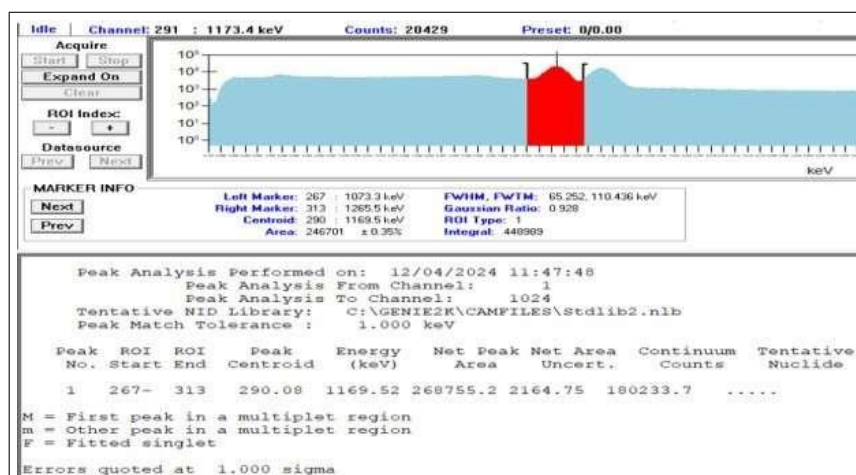


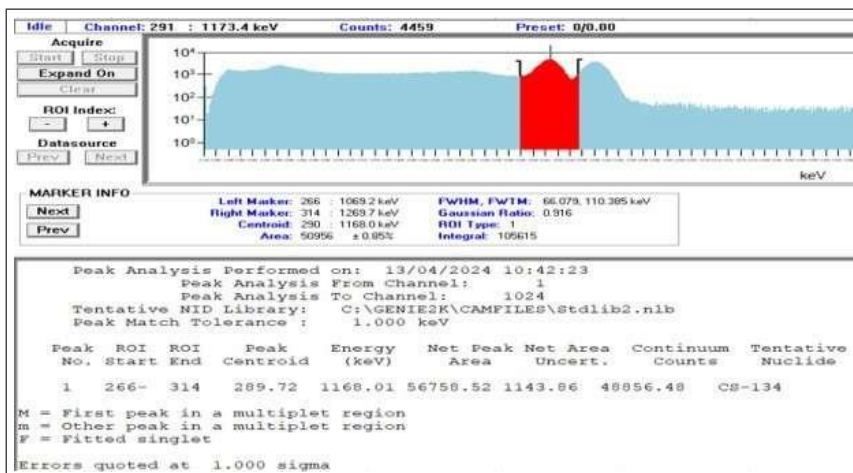
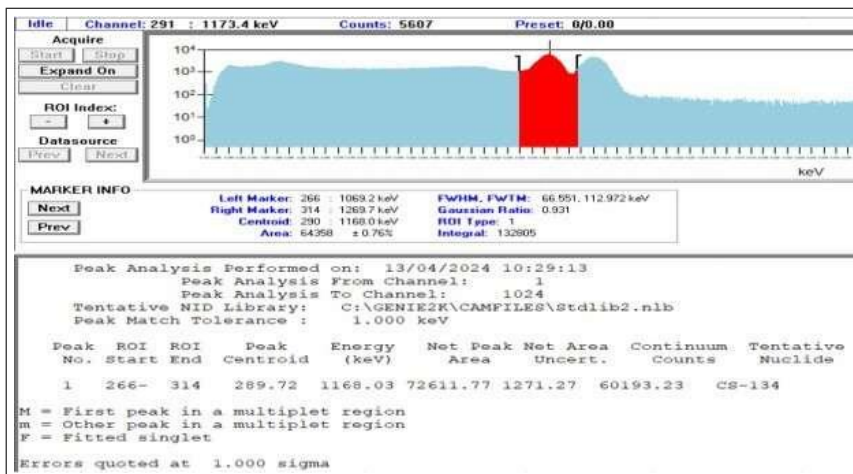
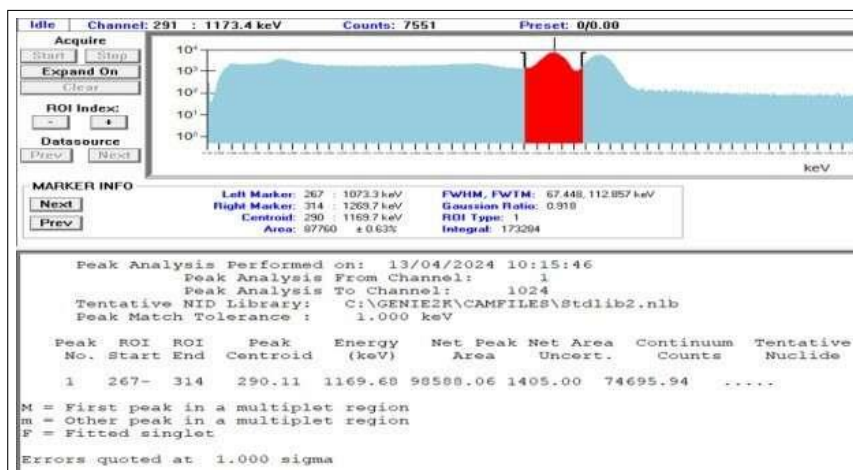


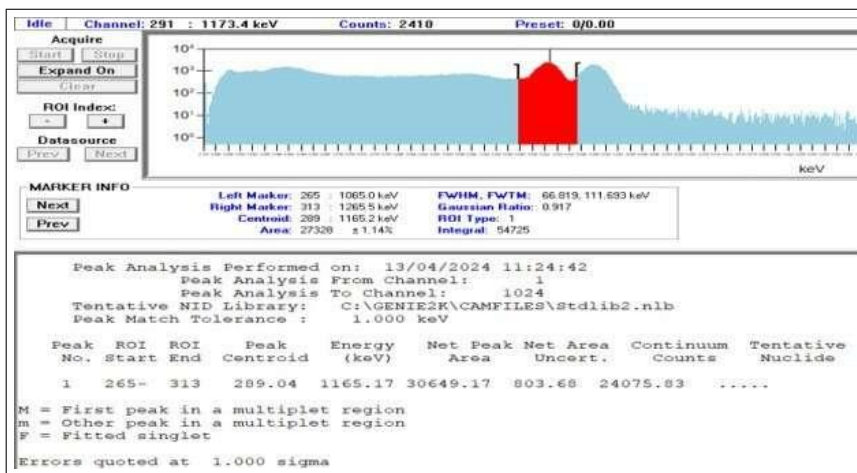
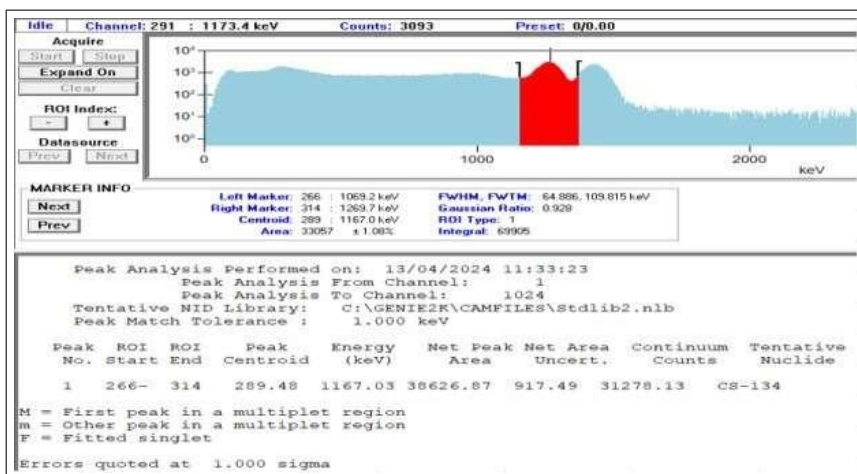
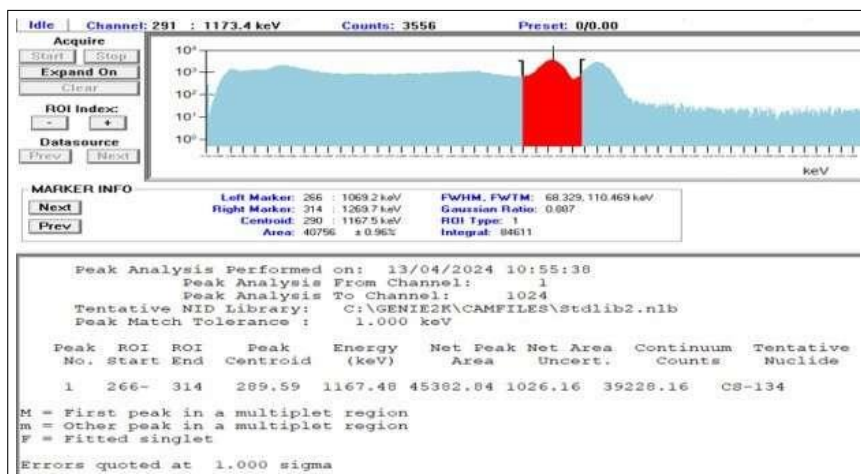


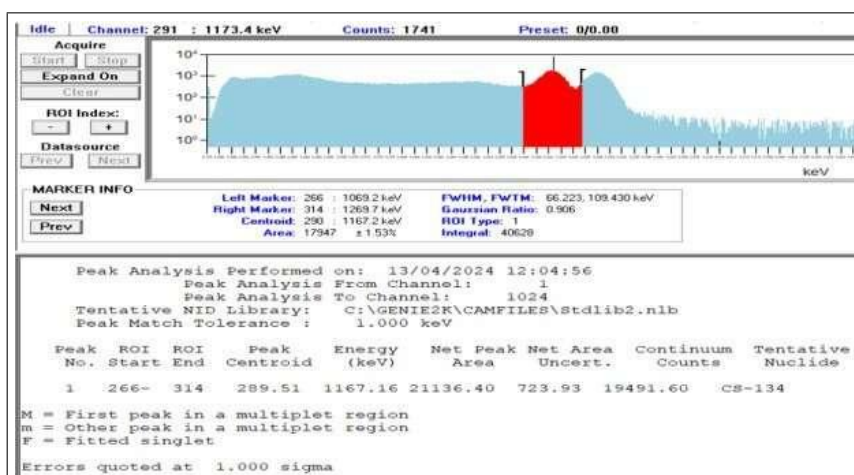
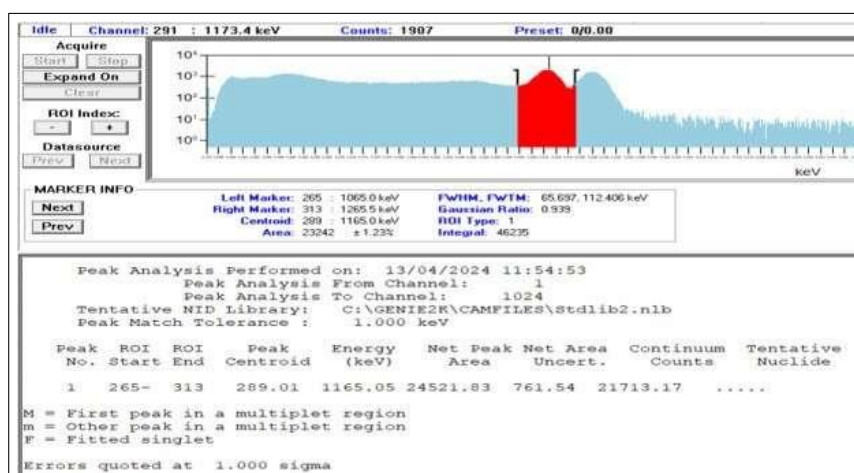
DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1173,2 KeV)









DETECTOR 3"x3" - ESPECTROS VARIANDO LA DISTANCIA

Co-60 (1332,5 keV)

