



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE MUESTRAS  
DE ARENA CON RETRODISPERSIÓN  $\gamma$**

**Adriana Lorena Serrano Sánchez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá, Colombia  
2017



# DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE MUESTRAS DE ARENA CON RETRODISPERSIÓN $\gamma$

**Adriana Lorena Serrano Sánchez**

Tesis para optar al título de :  
**Magister en Ciencias Física**

Director:  
**Prof. Fernando Cristancho Mejía**

Línea de Investigación:  
Física Nuclear  
Grupo de Investigación:  
Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá, Colombia  
2017



*«He notado que aún la gente que dice que todo está predestinado y que no podemos hacer nada para cambiar nuestro destino, mira antes de cruzar la calle.»*

Stephen Hawking



# Agradecimientos

Primero que todo doy gracias a Dios por darme la tranquilidad, la sabiduría y la constancia para luchar por este sueño.

Quiero agradecer al profesor Fernando Cristancho por darme la oportunidad de pertenecer al GFNUN. Su paciencia, consejos, apoyo y confianza me permitieron crecer como profesional y como persona. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para llevar a cabo este trabajo. Agradezco a todos los miembros del grupo por su colaboración especialmente a David, Freddy y Frank, por su paciencia, sugerencias, ideas y por su entera colaboración cuando mas lo necesité.

A mis compañeros Doris y Freddy por su compañía, por las risas y por todos los buenos momentos que compartimos en esta etapa de nuestras vidas. A la Universidad Nacional por la gran oportunidad de ser parte de una gran institución durante estos años.

Agradezco a mis Padres enseñarme a ser disciplinada, por inculcarme el amor al estudio y a todas las cosas que hago, por sus sacrificios para permitirme a mí realizar mis sueños y continuar en mi proceso de formación hacia el éxito. A mis abuelitos gracias por su paciencia y su apoyo incondicional. A toda mi familia por creer en mí y motivarme en cada proyecto que decido emprender.

Finalmente agradezco a Carlos Hernandez por ser mi más fiel compañero durante esta etapa, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme bellos momentos llenos de aprendizajes, amor y sobre todo felicidad.



## Resumen

La retrodispersión de rayos  $\gamma$  ha sido utilizada para estudiar las propiedades de algunos materiales. Esta técnica es muy significativa cuando sólo es posible acceder a un sólo lado del material a estudiar. Por esta razón, esta técnica puede ser aplicada a la detección de objetos enterrados.

Para caracterizar la interacción de la radiación con los materiales de la muestra, se estudia la relación entre las intensidades y las energías de los fotones transmitidos y retrodispersados por capas de arena para diferentes grosores. Para esta caracterización se tendrá en cuenta que la sección eficaz de los principales procesos de interacción de la radiación  $\gamma$  con la materia dependen del número atómico de los elementos del blanco.

El presente trabajo muestra los resultados de la caracterización de la radiación  $\gamma$  para aluminio y arena aplicados en el desarrollo de un método para la determinación de la densidad de muestras de arena con retrodispersión  $\gamma$ . En el montaje experimental se utiliza una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  y un detector de centelleo de NaI.

El coeficiente de atenuación de las muestras y su densidad son determinados haciendo uso de los espectros de transmisión. De los espectros de retrodispersión se puede conocer la intensidad relativa de fotones dispersados, una o múltiples veces, como una función del espesor de las capas de arena.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de símbolos y abreviatura</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I. Fundamentos Teóricos y Metodología</b>	<b>2</b>
<b>2. Fundamentos Teóricos</b>	<b>3</b>
2.1. Radiación Gamma . . . . .	3
2.2. Interacción de la radiación con la materia . . . . .	3
2.2.1. Efecto Fotoeléctrico . . . . .	4
2.2.2. Creación de pares . . . . .	4
2.2.3. Efecto Compton . . . . .	5
2.3. Coeficiente de atenuación lineal $\mu$ . . . . .	7
2.4. Transmisión . . . . .	8
2.5. Retrodispersión . . . . .	9
2.6. Detector de centelleo . . . . .	11
2.7. Propiedades físicas de los suelos . . . . .	12
<b>3. Metodología</b>	<b>14</b>
<b>II. Desarrollo Experimental y Análisis de los resultados</b>	<b>15</b>
<b>4. Aluminio</b>	<b>16</b>
4.1. Experimento de transmisión de radiación $\gamma$ . . . . .	16
4.1.1. Arreglo experimental. . . . .	16
4.1.2. Resultados . . . . .	17
4.1.3. Análisis . . . . .	17
4.2. Experimento de retrodispersión $\gamma$ . . . . .	18
4.2.1. Arreglo experimental . . . . .	18

---

4.2.2. Resultados . . . . .	19
4.2.3. Análisis . . . . .	20
<b>5. Arena</b>	<b>24</b>
5.1. Experimento de transmisión $\gamma$ . . . . .	24
5.1.1. Arreglo experimental . . . . .	24
5.1.2. Resultados . . . . .	25
5.1.3. Análisis . . . . .	26
5.2. Experimento de retrodispersión $\gamma$ . . . . .	27
5.2.1. Arreglo experimental . . . . .	27
5.2.2. Resultados . . . . .	28
5.2.3. Análisis . . . . .	29
<b>III. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>32</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>33</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>34</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>

# Lista de Figuras

2-1. Esquema del decaimiento del $^{137}\text{Cs}$ [1]. . . . .	3
2-2. Efecto Fotoeléctrico [2]. . . . .	4
2-3. Creación de pares [2]. . . . .	5
2-4. Efecto Compton [1]. . . . .	5
2-5. Energía del fotón dispersado entre $0^\circ < \theta^\circ < 180^\circ$ para diferentes energías del fotón incidente. . . . .	6
2-6. Gráfico cartesiano de la fórmula Klein-Nishina para diferentes energías incidentes. . . . .	7
2-7. Esquema del montaje experimental - transmisión de fotones. . . . .	8
2-8. Esquema del montaje experimental- retrodispersión de fotones. [2] . . . . .	9
2-9. Experimento de retrodispersión: (a) La radiación $\gamma$ incide en todo el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector. (b) La radiación $\gamma$ incide en todo el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre toda la cara del detector.(c) La radiación $\gamma$ incide en cualquier parte de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector. . . . .	10
2-10.Diagrama de un detector de centelleo [3]. . . . .	12
4-1. Prototipo del montaje experimental de transmisión $\gamma$ en aluminio. . . . .	16
4-2. Espectro de energía de transmisión en Al con $z$ (cm) = 0, 3, 6, 9 y 12. Datos normalizados . . . . .	17
4-3. La pendiente de la gráfica corresponde al coeficiente de atenuación lineal del aluminio, $\mu = 0.2110(4) \text{ cm}^{-1}$ . Datos normalizados. . . . .	18
4-4. Esquema del montaje experimental de retrodispersión $\gamma$ en aluminio . . . . .	19
4-5. Espectro de retrodispersión en aluminio con $z = 0, 1, 2, 3$ y 4 cm. Datos normalizados. . . . .	20
4-6. Diferencia entre los espectros obtenidos para cada una de las placas de aluminio con espesor de 1, 2, 3 y 4 cm respecto al espectro de referencia (0 cm). Datos normalizados. . . . .	21
4-7. Gráfica de $I_b(z)$ en función del grosor de las láminas de aluminio $z(\text{cm})$ con sus incertidumbres. Datos normalizados. . . . .	22
5-1. Esquema del montaje experimental de transmisión $\gamma$ en arena. . . . .	24
5-2. Espectro de energía de transmisión en arena con $z = 0, 3, 6, 9$ y 12 cm de grosor. Datos normalizados . . . . .	25
5-3. La pendiente de la gráfica corresponde al coeficiente de atenuación lineal de arena $\mu = 0.1251(4) \text{ cm}^{-1}$ . Datos normalizados. . . . .	26
5-4. Esquema del montaje experimental de retrodispersión $\gamma$ en arena. . . . .	27

---

5-5. Espectro de energía de retrodispersión en arena con $z = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ y $6$ cm de grosor. Datos normalizados. . . . .	28
5-6. Diferencia entre los espectros obtenidos para cada una de las capas de arena con espesor de $1, 2, 3, 4, 5$ y $6$ cm respecto al espectro de referencia ( $0$ cm). Datos normalizados. . . . .	29
5-7. Gráfica de $I_b(z)$ en función del grosor de las láminas de Al $z(\text{cm})$ con sus incertidumbres. Datos normalizados. . . . .	30

# Lista de Tablas

2-1. Clasificación de las partículas de suelo. . . . .	12
2-2. Composición de la arena obtenida por XFR. El mayor componente de la arena es SiO <sub>2</sub> [3]. . . . .	13

# Lista de símbolos y abreviaturas

## Símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI
$\lrcorner$	Aproximación	—
$\theta$	Ángulo de dispersión	—
$\Omega$	Ángulo sólido	sr
$A$	Área	m <sup>2</sup>
$\lambda$	Camino libre medio	m
$\mu$	Coefficiente de atenuación lineal	m <sup>-1</sup>
$\mu_m$	Coefficiente de atenuación másico	$\frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$
$h$	Constante de Planck	J · s
$\rho$	Densidad volumétrica	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$E$	Energía	J
$z$	Espesor de la muestra	m
$I_o$	Intensidad emitida	Cuentas
$m_e$	Masa del electrón	kg
$Z$	Número atómico	—
$n$	Número de centros dispersores por unidad de volumen	—
$\alpha$	Párticula alfa	—
$\beta$	Párticula beta	—
$\gamma$	Radiación gamma	—
$\sigma$	Sección eficaz	m <sup>2</sup>
$\omega$	Peso atómico	—

## Subíndices

Subíndice	Término
C	Compton
e	Electrón
f	Final
ph	Fotoeléctrica
o	Inicial
m	Másico
T	Total

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
Ba	Bario
Cs	Cesio
SiO <sub>2</sub>	Dioxido de Silicio
GFNUN	Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional
MCA	MultiChannel Analyzer
NIST	National Institute of Standards and Technology
NaI	Yoduro de Sodio

# 1

## Introducción

Las recientes investigaciones que se han realizado sobre de las propiedades de los suelos (humedad y densidad), se han llevado a cabo haciendo uso de la física nuclear, esto para facilitar la detección de objetos que se encuentren inmersos en él (minerales, tuberías, minas antipersonas, entre otros). De esta investigación se deriva la necesidad de determinar rápidamente y con precisión la densidad de los suelos, sin tener que recurrir a métodos de intervención física (extracción).

El Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional (GFNUN) desarrolla un programa que involucra la investigación de las propiedades del suelo (humedad y densidad) y simultáneamente ha promovido el trabajo investigativo sobre los instrumentos nucleares utilizados para determinar dichas propiedades. Como parte de esta investigación se propone desarrollar un método para la determinación de la densidad de muestras de arena con la retrodispersión  $\gamma$ . Para desarrollar este método se considera necesario comprender los fenómenos de transmisión y de retrodispersión Compton, para modelar estos fenómenos a la geometría del montaje experimental y de esta manera poder hacer una descripción de las condiciones y parámetros necesarios.

El cálculo de la densidad total se puede entender como la interacción de los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva de  $^{137}\text{Cs}$  y los electrones orbitales de los átomos del que está compuesto [1] el suelo ( $\text{SiO}_2$  en el caso de la arena). La radiación  $\gamma$  resultante de estas interacciones es registrada por un detector de NaI situado a corta distancia de la fuente emisora adyacente al material a medir. Puesto que el número de electrones presente por unidad de volumen de suelo es proporcional a la densidad de éste, es posible correlacionar el número relativo de rayos gamma dispersos con el número de rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad del material.

La transmisión y retrodispersión de los rayos  $\gamma$  se han utilizado para estudiar las propiedades del suelo, tales como su coeficiente de atenuación, densidad y humedad [3, 4].

## **Parte I.**

# **Fundamentos Teóricos y Metodología**

# 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1. Radiación Gamma

Un núcleo inestable puede decaer de manera espontánea a diferentes núcleos (emitiendo partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ ) y/o a estados de menor energía del mismo núcleo (emitiendo radiación gamma). En el caso de la emisión de radiación gamma, el núcleo puede ir de un estado excitado  $E_o$ , a un estado de menor energía  $E_f$ ,

$$E_\gamma \approx E_o - E_f. \quad (2-1)$$

Los rayos gamma son radiación electromagnética con un rango de energías que va desde decenas de keV hasta los MeV. En este trabajo en particular, vamos a considerar el núcleo inestable de  $^{137}\text{Cs}$ , que emite una partícula  $\beta^-$  y decae a un estado excitado del  $^{137}\text{Ba}$  hasta que finalmente emite un  $\gamma$  de 662 keV y decae al estado fundamental  $^{137}\text{Ba}$ , como se muestra en la Figura 2-1.

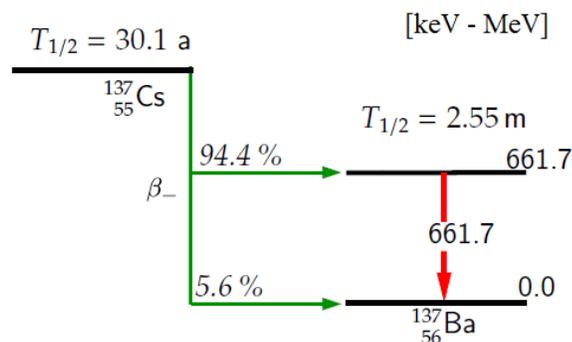


Figura 2-1.: Esquema del decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$  [1].

### 2.2. Interacción de la radiación con la materia

Los principales procesos de interacción de la radiación gamma con la materia son efecto fotoeléctrico, creación de pares y efecto Compton.

### 2.2.1. Efecto Fotoeléctrico

En el efecto fotoeléctrico un rayo gamma de energía  $E_\gamma$  interactúa con un electrón ligado a un material y deposita toda su energía en él. Como resultado, el rayo  $\gamma$  es absorbido por el electrón y el ahora fotoelectrón es expulsado del átomo con energía dada por la diferencia entre  $E_\gamma$  y la energía de atadura del electrón como se puede apreciar en la Figura 2-2. La vacancia dejada por el fotoelectrón es llenada por un electrón de un nivel superior, produciendo así un rayo X [3].

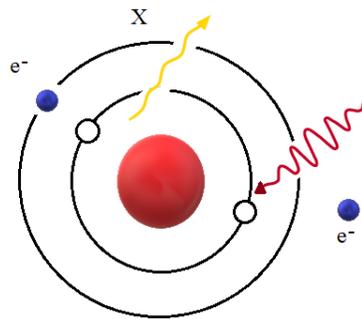


Figura 2-2.: Efecto Fotoeléctrico [2].

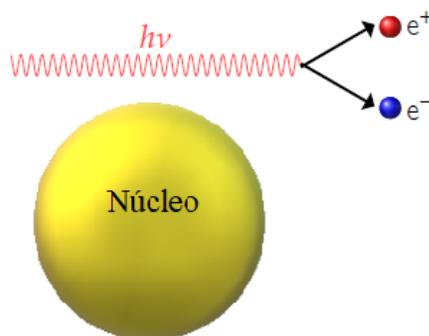
Es posible calcular la sección eficaz fotoeléctrica usando la aproximación de Born y suponiendo que el rayo  $\gamma$  sólo interactúa con los electrones de la capa K y que su energía es no relativista. La sección eficaz fotoeléctrica resultante tiene dos proporcionalidades importantes

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^m}{E_\gamma^{3.5}}, \quad (2-2)$$

donde  $Z$  es el número atómico del material. A medida que la energía disminuye  $\sigma_{ph}$  aumenta, lo que significa que los rayos de baja energía presentarán una disminución mayor, por lo que la probabilidad de que ocurra una transmisión o dispersión de fotones de baja energía es muy baja. También se puede ver que  $\sigma_{ph}$  aumenta como  $Z^m$ , donde  $m$  es un número entre 4 y 5 normalmente, por lo tanto, incluso para altas energías, si el material absorbente tiene un número atómico alto,  $\sigma_{ph}$  aumentará y no se transmitirán ni dispersarán  $\gamma$  [3].

### 2.2.2. Creación de pares

El fenómeno de creación de pares tiene lugar con fotones de alta energía. En éste, debido a la interacción de Coulomb en la vecindad del núcleo, la energía del fotón incidente se convierte espontáneamente en la masa de un par electrón-positrón (Figura 2-3) [4].



**Figura 2-3.:** Creación de pares [2].

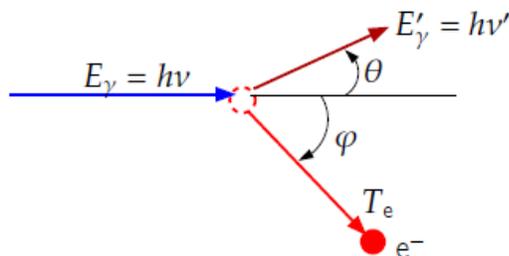
El principio de conservación de la energía en este caso en particular se expresa

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_-, \quad (2-3)$$

donde  $E_+$  y  $E_-$  representan las energías cinéticas del electrón y del positrón respectivamente. Según la Ec. (2-3), se necesitan fotones con una energía superior a 1.02 MeV (dos veces la energía en reposo del electrón) para que pueda darse este proceso. Debido a que la energía que emite el  $^{137}\text{Cs}$  es de 662 keV, no se tendrá en cuenta el fenómeno de creación de pares en este trabajo.

### 2.2.3. Efecto Compton

En el efecto Compton un fotón- $\gamma$  y un electrón libre interactúan en una colisión elástica, cumpliendo con el principio de conservación de la energía y del momentun.



**Figura 2-4.:** Efecto Compton [1].

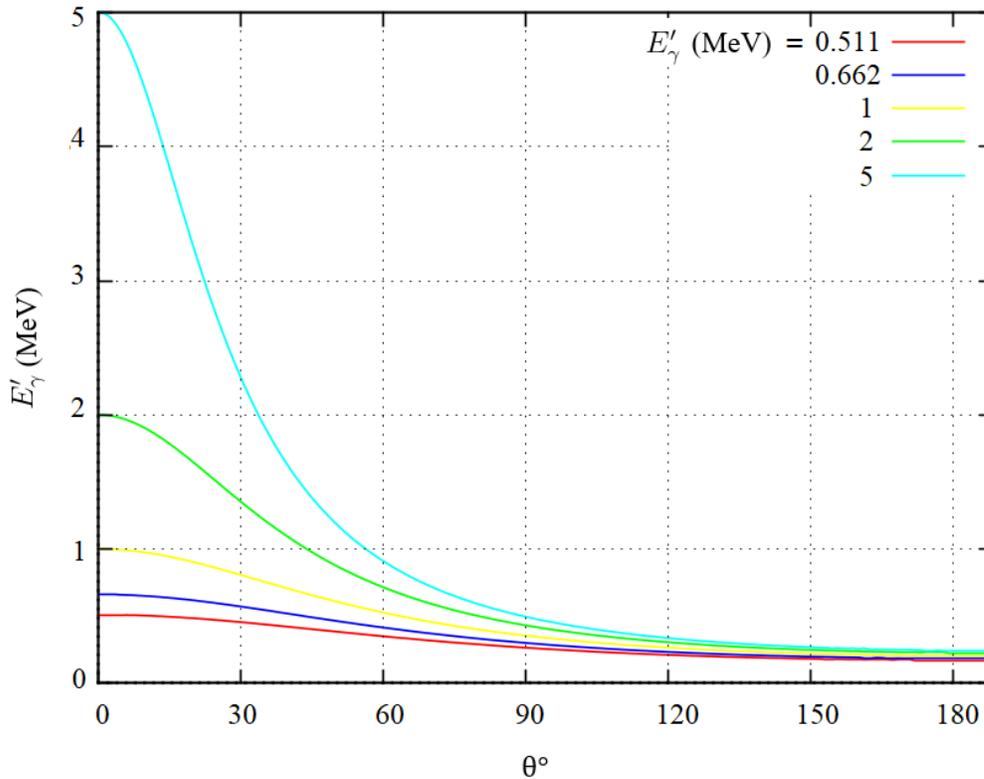
Antes de la colisión el fotón tiene una energía  $E_\gamma = h\nu$  y el electrón se encuentra en reposo, tras la colisión el fotón tiene una energía  $E'_\gamma = h\nu'$ , se dispersa formando un ángulo  $\theta$  con la horizontal y da parte de su energía al electrón (llamado electrón de retroceso) como se puede apreciar en la Figura 2-4. Debido a que todos los ángulos de dispersión son posibles,

se presenta una distribución en la energía del fotón  $\gamma$ . Para el caso de interacción con un electrón libre o débilmente ligado, la relación entre la energía del fotón dispersado  $E'_\gamma$  y el ángulo de dispersión es [5]

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \epsilon(1 - \cos \theta)}, \quad (2-4)$$

donde  $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$  es la energía del fotón incidente en unidades de masa del electrón. El electrón de retroceso también es dispersado formando un ángulo  $\varphi$  con la horizontal, con una energía  $T_e$  que es registrada por el detector como un espectro continuo que va desde  $T = 0$  hasta

$$T_{max} = E_\gamma \frac{2\epsilon}{1 + 2\epsilon}. \quad (2-5)$$



**Figura 2-5.:** Energía del fotón dispersado entre  $0^\circ < \theta^\circ < 180^\circ$  para diferentes energías del fotón incidente.

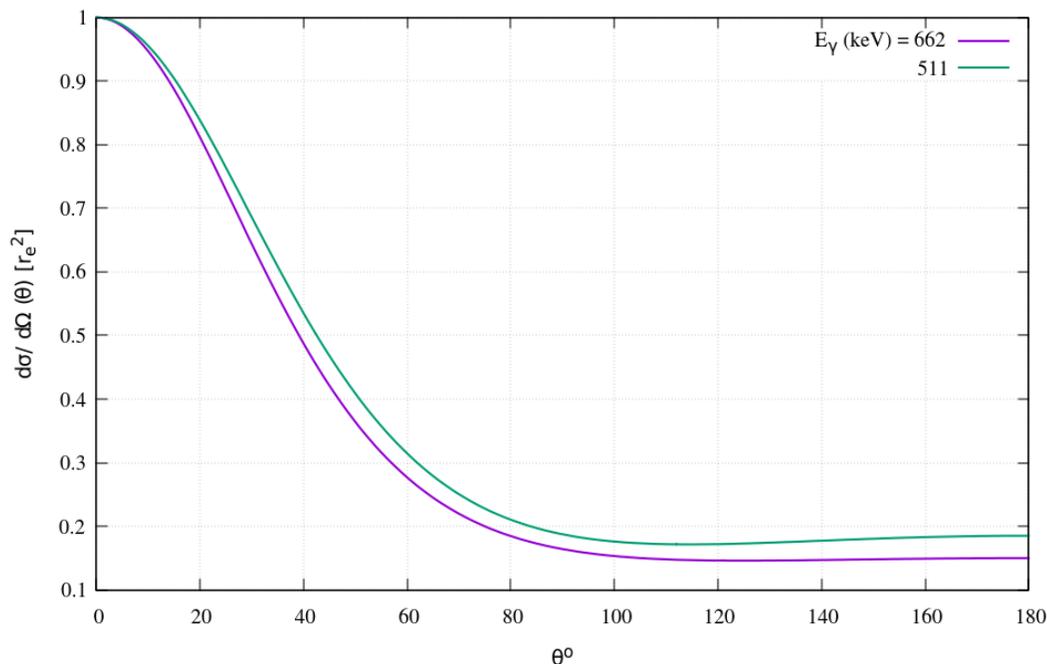
La sección eficaz para el efecto Compton está dada por la fórmula de Klein-Nishina [6]

$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \epsilon(1 - \cos \theta)]^2} \left( 1 + \cos^2 \theta \frac{\epsilon^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \epsilon(1 - \cos \theta)} \right), \quad (2-6)$$

donde  $r_e$  es el radio clásico del electrón. Para obtener la probabilidad total de que ocurra

efecto Compton por electrón es necesario integrar la fórmula de Klein-Nishina sobre  $d\Omega$  y para obtener la sección eficaz de Compton por centro de dispersión multiplicamos la Ec. (2-6) por  $Z$  [5].

Podemos ver en la Figura 2-6 que cuando  $\theta \geq 90^\circ$  La sección eficaz diferencial angular es prácticamente una distribución uniforme.



**Figura 2-6.:** Gráfico cartesiano de la fórmula Klein-Nishina para diferentes energías incidentes.

### 2.3. Coeficiente de atenuación lineal $\mu$

Cuando un haz de rayos  $\gamma$  penetra un material, se observa una desaparición progresiva de los fotones que lo constituyen. Esta disminución del número de fotones incidentes se denomina atenuación y es el resultado de las interacciones (fotoeléctrica y Compton) entre un cierto número de fotones con los electrones de los átomos que componen el material.

Se denomina coeficiente de atenuación lineal  $\mu$  a la fracción de fotones que interactúan por unidad de espesor del material absorbente y por lo tanto la probabilidad de interacción por unidad de recorrido, siendo una constante que depende de la energía de los fotones y del tipo de material,

$$\mu = n\sigma \quad , \quad \sigma = \sigma_{ph} + Z\sigma_C \quad (2-7)$$

donde  $n$  es el número de centros dispersores por unidad de volumen.

$$n = \frac{\rho N_A}{\omega} \quad \therefore \quad \mu = \frac{\sigma N_A \rho}{\omega} \quad (2-8)$$

donde  $N_A$  es el número de Avogadro,  $\rho$  es la densidad y  $\omega$  es el peso atómico.

El coeficiente de atenuación lineal Ec. (2-8) es dependiente de la densidad. Teniendo en cuenta que el material a pesar de tener la misma composición estequiométrica se encuentra en diferentes estados físicos (líquido, sólido, gaseoso), se establece un coeficiente de atenuación másico  $\mu_m$  que sea independiente de  $\rho$  y por ende del estado físico de la muestra,

$$\mu_m = \frac{\sigma N_A}{\omega}. \quad (2-9)$$

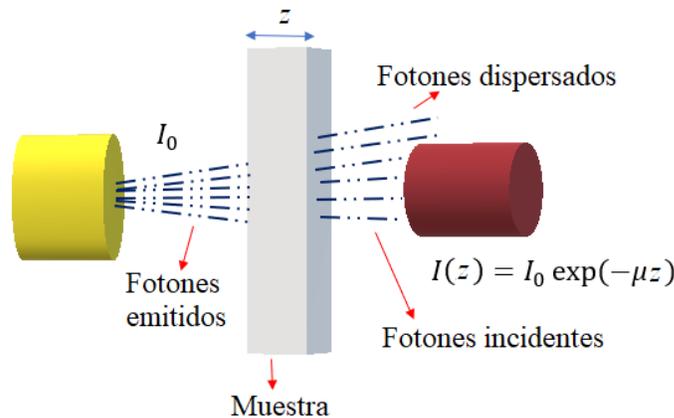
Finalmente se obtiene la siguiente relación

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2-10)$$

donde  $\mu_m$  es la cantidad que se encuentra en las bases de datos [7] y en representaciones gráficas.

## 2.4. Transmisión

Cuando un rayo  $\gamma$  pasa a través de la materia como se muestra en la Figura 2-7. La probabilidad de absorción en una capa fina es proporcional al grosor de dicha capa, lo que implica un decrecimiento exponencial de la intensidad.



**Figura 2-7.:** Esquema del montaje experimental - transmisión de fotones.

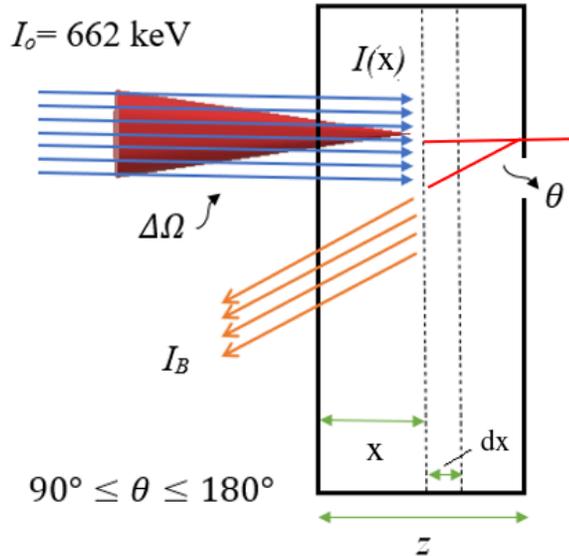
$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\mu z}, \quad (2-11)$$

donde  $I_0$  es la intensidad inicial del rayo,  $\mu$  el coeficiente de atenuación lineal y  $z$  es espesor del material.

## 2.5. Retrodispersión

Para  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ , se habla de retrodispersión. Para poder comprender el fenómeno de retrodispersión, hacemos uso de un modelo que permite calcular el número de fotones retrodispersados por el material de grosor  $z$ , esto para obtener una aproximación analítica del número de fotones dispersados en cada elemento de volumen del material a estudiar [4], situación en la cual la probabilidad de interacción radiación-aire entre la fuente y la arena es despreciable en comparación con la interacción radiación-arena.

Una vista esquemática simplificada de la configuración es mostrada en la Figura 2-8.



**Figura 2-8.:** Esquema del montaje experimental- retrodispersión de fotones. [2]

La intensidad de retrodispersión está dada por la intensidad inicial  $I_0$  que corresponde al número de fotones que alcanzan  $z$  (grosor de la muestra), multiplicado por la atenuación exponencial del haz [3]. Si el suelo tiene una composición homogénea el número de fotones que alcanzan  $z$  será similar a la expresada en la Ec. (2-11).

La sección transversal de Klein-Nishina determina la doble contribución diferencial a la intensidad retrodispersada por cada capa  $dz$  a través de cada cono  $d\Omega$  de acuerdo con

$$d^2R(z) \propto I(x) \left( \frac{d\sigma_C}{d\Omega} \right) d\Omega dx, \quad (2-12)$$

donde  $(d\sigma_C/d\Omega)d\Omega$  se puede expresar como  $I(x)\mu_C dx(\Delta\Omega/4\pi)$  que corresponde al número de fotones retrodispersados en un cono  $\Delta\Omega$  en dirección  $\theta$ . Definiendo  $\mu_2$  como el coeficiente de atenuación asociado a la energía de retrodispersión ( $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) entonces sólo

$$d^2R(z)e^{-\mu_2 z}$$

logra volver a la superficie.

La intensidad de retrodispersión estará dada por

$$dI_B(x) = \left( \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) I_0 \mu_{C1} e^{(-\mu_1)} e^{(-\mu_2)} dx,$$

y si integramos sobre la profundidad total, obtenemos la intensidad retrodispersada total [8]

$$\int I_B dx = \left( \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) I_0 \mu_{C1} \int_0^z e^{(-\mu_1)} e^{(-\mu_2)} dx$$

y finalmente obtenemos la intensidad de retrodispersión cuando  $\theta = 180^\circ$

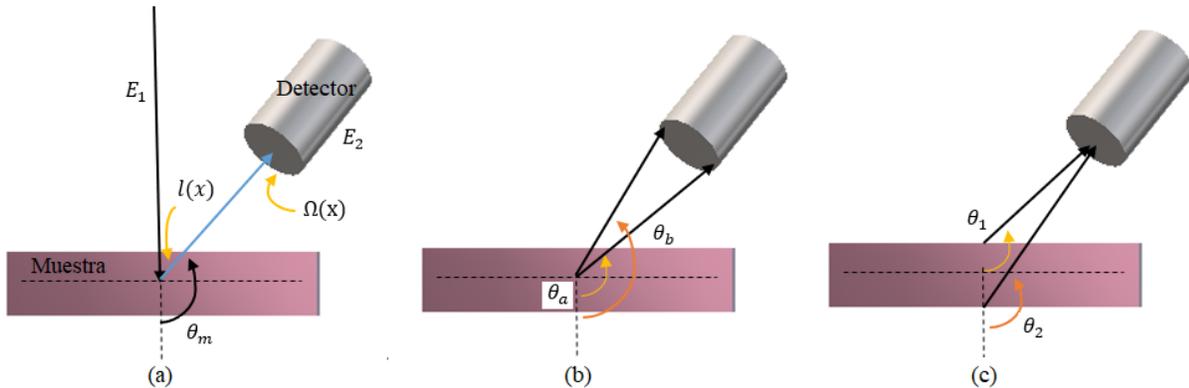
$$I_B(z) = \left( \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) I_0 \frac{\mu_{C1}}{\mu_T} [1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)z}]. \quad (2-13)$$

con

$$\mu_T = \mu_1 + \mu_2 \quad (2-14)$$

Siendo  $\mu_1$  el coeficiente de atenuación lineal asociado a  $E_\gamma$  y  $\mu_2$  el coeficiente de atenuación asociado a  $E'_\gamma$ .

En un experimento de retrodispersión ideal la radiación  $\gamma$  incide en el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector manteniendo fijo un ángulo  $\theta_m$  (ángulo entre la fuente y el detector), como se muestra en la Figura 2-9(a). En el laboratorio encontramos casos como los que se muestran en la Figura 2-9(b) en los que la radiación  $\gamma$  incide en el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre toda la cara del detector dando lugar a ángulos diferentes  $\theta_a, \theta_b$  y en la Figura 2-9(c) donde la radiación  $\gamma$  incide en cualquier parte de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector con  $\theta_1 \neq \theta_2$  [2].



**Figura 2-9.:** Experimento de retrodispersión: (a) La radiación  $\gamma$  incide en todo el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector. (b) La radiación  $\gamma$  incide en todo el centro de la muestra, se retrodispersa e incide sobre toda la cara del detector. (c) La radiación  $\gamma$  incide en cualquier parte de la muestra, se retrodispersa e incide sobre el centro del detector.

Debido a esta variación no se tiene total certeza del ángulo con el que sale la radiación  $\gamma$  que es retrodispersada y que a su vez está asociado a la energía de retrodispersión descrita en la Ec. (2-4), por esta razón se propone hacer una aproximación al ángulo con el cual sale retrodispersada la radiación  $\gamma$

$$l(x) = \frac{x}{|\cos \theta|} \approx \frac{x}{|\cos \theta_m|} = \tau x, \quad \tau = \frac{1}{|\cos \theta|}. \quad (2-15)$$

El factor "Dalet"  $\tau$  se hará únicamente sobre el coeficiente de atenuación lineal  $\mu_2$  ya que este corresponde a la energía de retrodispersión [2]

$$\tau \mu_2 = \frac{\mu_2}{|\cos \theta|}. \quad (2-16)$$

por lo tanto la Ec. (2-14) será descrita

$$\mu_T = \mu_1 + \frac{\mu_2}{|\cos \theta|} \quad (2-17)$$

Con esta aproximación, la intensidad de retrodispersión descrita por la Ec. (2-13) para  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  se puede expresar

$$I_B(z) = \left( \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \right) I_0 \frac{\mu_{C1}}{\mu_T} [1 - e^{(-\mu_T z)}]. \quad (2-18)$$

## 2.6. Detector de centelleo

Uno de los métodos más eficientes para la detección de los rayos gamma y la medición de sus energías es el uso de detectores de centelleo o centelladores. Asociados al sistema electrónico adecuado, estos detectores permiten identificar la energía del fotón  $\gamma$  así como la intensidad del haz. Los centelladores son materiales (sólidos, líquidos o gaseosos) que emiten luz cuando la radiación  $\gamma$  pasa a través de ellos. Se definen tres grupos principales: cristales orgánicos, cristales inorgánicos y detectores gaseosos. La respuesta de un detector de centelleo a la radiación es lineal, de manera que la energía de la luz producida por el centelleo será proporcional a la energía depositada por la radiación en el volumen del detector. Como la cantidad de luz producida por un centellador es muy pequeña es necesario amplificarla antes de registrarla como un pulso, esto se realiza por medio de un tubo fotomultiplicador (PMT).

Tenemos un tubo evacuado con un fotocátodo en su entrada y dínodos (multiplicadores de electrones) dentro de él. Los fotones procedentes del centelleador chocan con el fotocátodo, generalmente de cesio o antimonio, y se emiten electrones. La carga que es producida en el fotocátodo es directamente proporcional a la energía de la luz colisionando con ella, por lo que la cantidad total de carga producida es proporcional a la energía de la radiación incidente [1].

Los electrones creados en el fotocátodo son guiados por un campo eléctrico sucesivamente a los dínodos, que están cubiertos con una sustancia que emite electrones secundarios. Al final

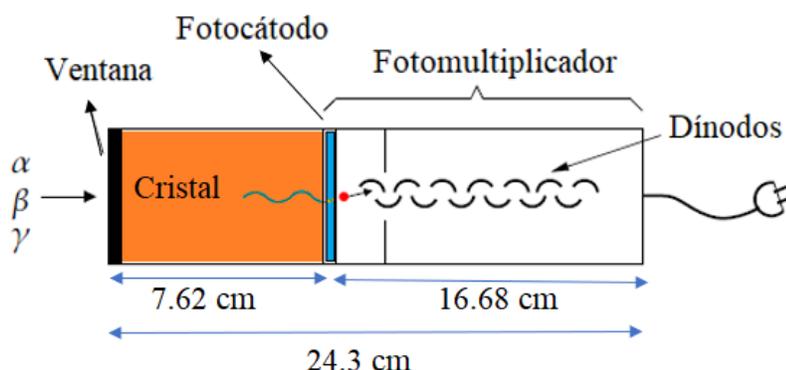


Figura 2-10.: Diagrama de un detector de centelleo [3].

de este proceso de amplificación, el PMT entrega un impulso de carga de salida alrededor de  $10^6$  veces más fuerte que el original [3]. Después de la amplificación, la carga va a una secuencia de módulos electrónicos para ser registrada.

## 2.7. Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos determinan en gran medida la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes. La textura del suelo representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo y arcilla [9]. Comúnmente en los suelos se clasifican en tres clases de tamaño denominados arena, limo y arcilla (Tabla 2-1).

Fracción del suelo	Diámetros límites en mm
Arena	0.5 - 2.0
Limos	0.002 - 0.5
Arcilla	Menos de 0.002

Tabla 2-1.: Clasificación de las partículas de suelo.

La arena es un suelo que ha sido ampliamente estudiada con el fin de aplicar la técnica de retrodispersión de radiación  $\gamma$  para encontrar objetos enterrados con alto contenido orgánico,

debido a que la arena provee un alto contraste en el sistema de detección a los objetos que tienen alto contenido orgánico [3]. En la Tabla 2-2 se presenta la composición química de la arena.

Elemento o componente	Concentración
SiO <sub>2</sub>	96.18 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.21 %
TiO <sub>2</sub>	0.23 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19 %
CaO	0.05 %
K <sub>2</sub> O	0.05 %
Na <sub>2</sub> O	0.04 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03 %
Zr	216 ppm
S	37 ppm
Sr	28 ppm
Ni	24 ppm
Zn	15 ppm
Pb	11 ppm
Rb	9 ppm

**Tabla 2-2.:** Composición de la arena obtenida por XFR. El mayor componente de la arena es SiO<sub>2</sub> [3].

# 3

## Metodología

Para estudiar la interacción de la radiación  $\gamma$  con la materia, se realizaron pruebas experimentales con aluminio y arena. Para ello se estudia tanto la transmisión como la retrodispersión de radiación proveniente de una fuente monoenergética de  $^{137}\text{Cs}$  con una actividad de 35.6 MBq a la fecha de septiembre de 2017. Esta fuente emite una radiación  $\gamma$  de 662 keV, la cual se registra con un detector de centelleo de NaI ( $3'' \times 3''$ ) acoplado fijamente a un fotomultiplicador, el cristal del detector está protegido contra la entrada de luz externa por medio de un recubrimiento delgado de aluminio. El detector de NaI está conectado a una base de tubo digital TB-5 que contiene toda la electrónica necesaria para la espectroscopía de alto rendimiento con un centellador, un pre-amplificador y un procesador de pulso digital con todas las funciones con MCA. Finalmente se hace uso del software DppMCA que es una aplicación que proporciona adquisición, visualización y control de datos para procesadores de señal de referencia Amptek.

Inicialmente se realizan las pruebas experimentales en aluminio, ya que es un material monoelemental que ha sido estudiado con anterioridad haciendo uso de la radiación  $\gamma$  [3, 4]. Con esto se pretende poner a prueba el modelo teórico propuesto antes de experimentar con un compuesto granular como lo es la arena.

Se realizan experimentos de transmisión variando el grosor del material para determinar el coeficiente de atenuación lineal  $\mu$ . El tiempo de medida es de 20 minutos para cada grosor.

En los experimentos de retrodispersión se hace uso del coeficiente de atenuación lineal  $\mu$  y la densidad  $\rho$  (para cada material) determinados en los experimentos de transmisión. Con este experimento se determina la intensidad relativa de los fotones dispersados en función del espesor. Como la estadística de recuento resulta ser más baja comparada con la estadística de recuento en el experimento de transmisión, el tiempo de medida para cada grosor es de 24 horas.

En la siguiente Sección se describe la configuración experimental geométrica utilizada y los resultados obtenidos para los experimentos de transmisión y retrodispersión en aluminio y arena.

## **Parte II.**

# **Desarrollo Experimental y Análisis de los resultados**

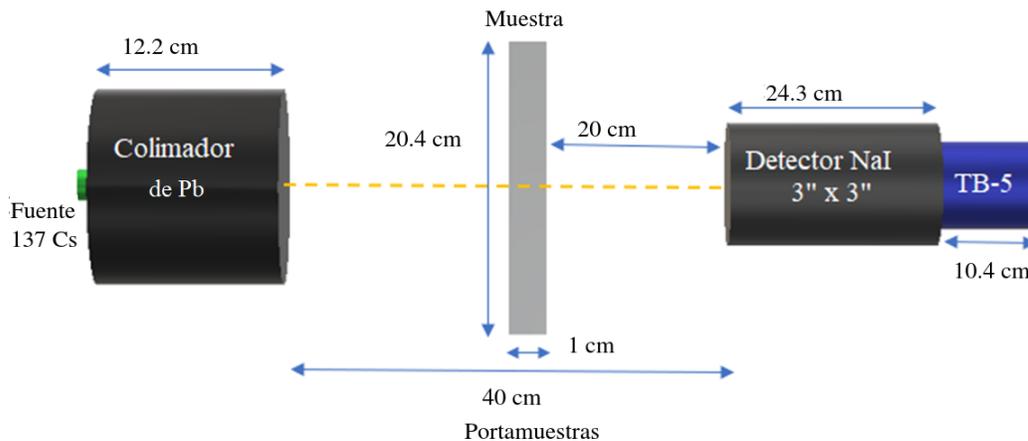
# 4

## Aluminio

### 4.1. Experimento de transmisión de radiación $\gamma$ .

#### 4.1.1. Arreglo experimental.

Una vista esquemática de la configuración experimental utilizada para los experimentos de transmisión se muestra en la Figura 4-1.



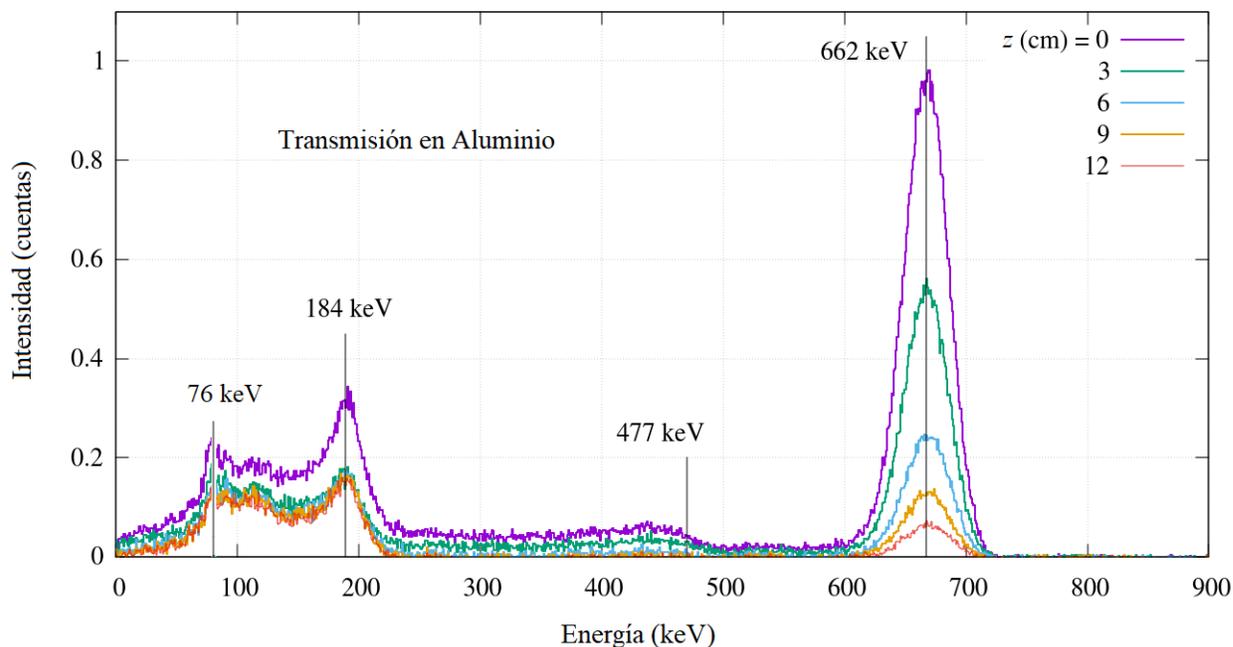
**Figura 4-1.:** Prototipo del montaje experimental de transmisión  $\gamma$  en aluminio.

En la parte izquierda se encuentra un colimador de Pb con un radio de 6.25 cm, en la cara frontal un pequeño orificio de 2 mm de radio y en la parte posterior con un canal de profundidad 0.7 cm que sirve para alojar la fuente radiactiva de  $^{137}\text{Cs}$  y extraerla del montaje con facilidad. En el centro del arreglo experimental encontramos un portamuestras donde se ubican las láminas de aluminio de dimensiones  $(33.5 \times 20.4 \times 1.0) \text{ cm}^3$  y al costado derecho se encuentra un detector de NaI ( $3'' \times 3''$ ), conectado a una base de tubo digital TB-5.

Inicialmente se toma un espectro de energía sin la lámina de aluminio con el fin de obtener un espectro de referencia ( $z = 0 \text{ cm}$ ) y luego se van agregando una a una láminas de aluminio desde el centro (portamuestras) hacia la parte izquierda del montaje hasta completar los 12 cm de grosor. El tiempo de medida por cada grosor es de 20 minutos.

### 4.1.2. Resultados

La Figura 4-2 muestra los espectros de transmisión de energía correspondientes al montaje experimental cuando:  $z = 0$  cm, 3 cm, 6 cm, 9 cm y 12 cm de grosor.



**Figura 4-2.:** Espectro de energía de transmisión en Al con  $z$  (cm) = 0, 3, 6, 9 y 12. Datos normalizados

Los datos correspondientes a la Figura 4-2 han sido normalizados. En la normalización al valor más alto del espectro obtenido se le asigna el valor de 1. Todos los datos que se encuentren en este trabajo han sido normalizados de la misma manera.

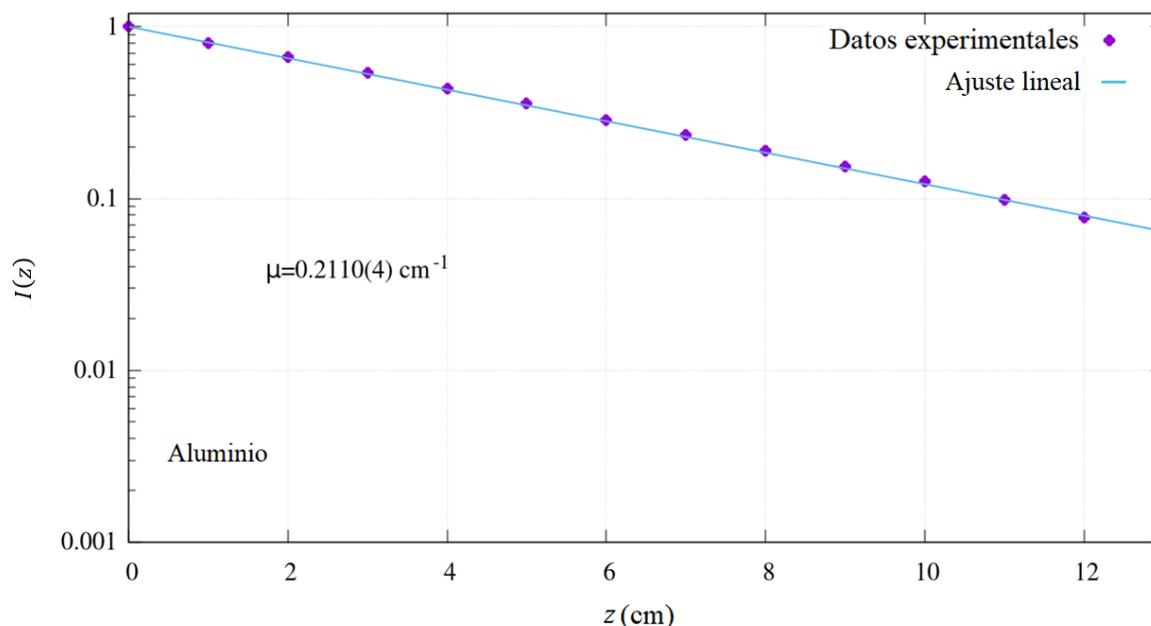
En la región correspondiente a las energías más bajas podemos ver un pico en 76 keV que representa la fluorescencia del plomo. También se observa un pico a los 184 keV que se asocia a la retrodispersión total. En la región entre los 184 keV y los 477 keV se observa la región de Compton descrita en la Ec. (2-4) asociada a la retrodispersión simple. Entre los 610 keV y los 710 keV tenemos el fotopico.

En la Figura 4-2 se puede observar que el fotopico que describe la intensidad de la radiación  $\gamma$  ha sido atenuado aproximadamente a la mitad de la intensidad inicial con solo 3 cm de grosor y en una cuarta parte con 6 cm de grosor.

### 4.1.3. Análisis

Para determinar la densidad haciendo uso del experimento de transmisión se calcula el área de cada uno de los fotopicos obtenidos (Figura 4-2). Estas áreas serán las intensidades de

la radiación detectada para los diferentes grosores de la muestra. Graficando las intensidades en función del grosor de cada una de las muestras se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 4-3.



**Figura 4-3.:** La pendiente de la gráfica corresponde al coeficiente de atenuación lineal del aluminio,  $\mu = 0.2110(4) \text{ cm}^{-1}$ . Datos normalizados.

Al hacer el ajuste lineal, se calcula un promedio del coeficiente de atenuación lineal para todas las láminas.

Obteniendo experimentalmente  $\mu$  y tomando de una base de datos [7] el valor correspondiente para 662 keV de  $\mu_m = 0.074 \text{ cm}^2/\text{g}$ , se determina la densidad experimental haciendo uso de la Ec. (2-10),

$$\rho = 2.851(3) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \quad (4-1)$$

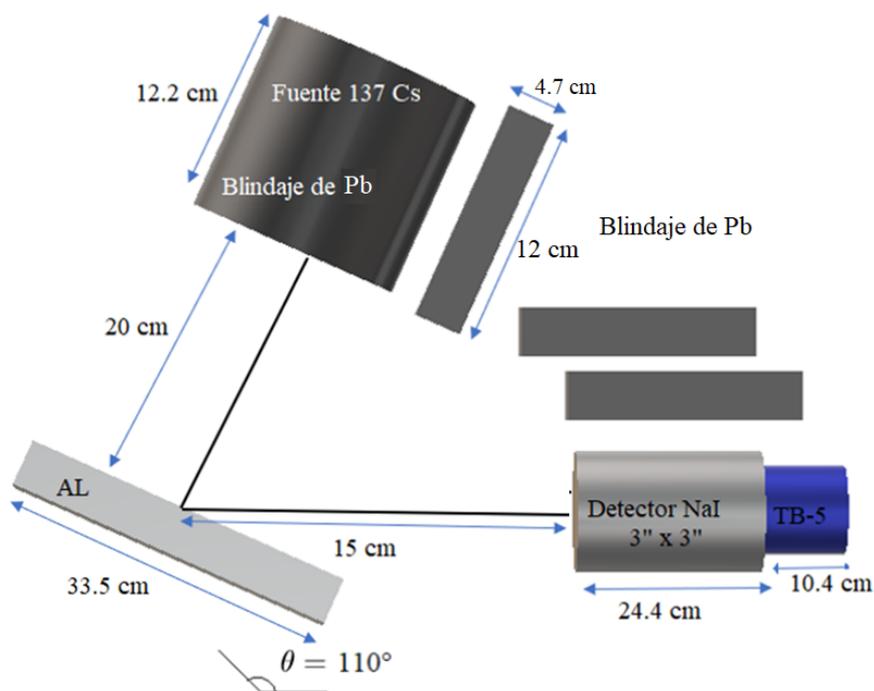
La diferencia porcentual entre el valor de la densidad del aluminio obtenido experimentalmente con el valor establecido en la literatura [10]  $\rho_{\text{Teórico}} = 2.7 \text{ g/cm}^3$  es del 5.6 %.

## 4.2. Experimento de retrodispersión $\gamma$ .

### 4.2.1. Arreglo experimental

Una vista esquemática de la configuración experimental utilizada para los experimentos de retrodispersión se muestra en la Figura 4-4. En este caso, la fuente de  $^{137}\text{Cs}$  se coloca

adyacente al detector. Entre el haz colimado proveniente de la fuente y el haz retrodispersado hacia el centro del detector hay un ángulo de  $110^\circ$ .



**Figura 4-4.:** Esquema del montaje experimental de retrodispersión  $\gamma$  en aluminio

Para este caso el rayo  $\gamma$  de 662 keV que va a la muestra de aluminio puede interactuar y retrodispersarse en la dirección del detector. Se colocan tres bloques de plomo de  $(12 \times 12 \times 4,7) \text{ cm}^3$  para un mejor blindaje.

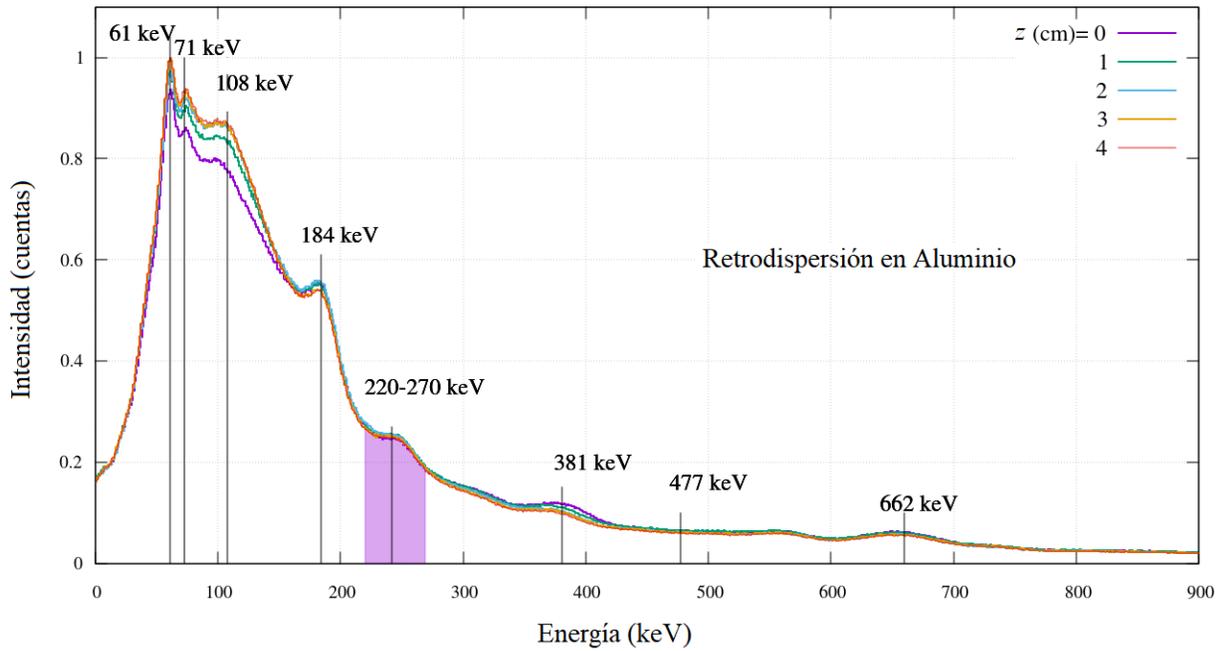
Inicialmente se toma un espectro de energía sin la lámina de aluminio con el fin de obtener un espectro de referencia ( $z = 0 \text{ cm}$ ) y luego se van agregando una a una láminas de aluminio hacia la parte baja-izquierda del montaje hasta completar los 4 cm de grosor. Como la estadística de recuento resulta ser más baja respecto al experimento de transmisión. El tiempo de medida por cada lámina de aluminio es de 24 horas.

### 4.2.2. Resultados

La Figura 4-5 muestra un espectro de retrodispersión sin muestra ( $z = 0 \text{ cm}$ ) y para una muestra de  $z = 1, 2, 3$  y  $4 \text{ cm}$  de grosor.

Lo primero que se hace es dividir el espectro obtenido (Figura 4-5) en regiones de energía y se estudia cómo varía el número de conteos en cada región cuando se modifica el grosor de la muestra.

De 0 a 184 keV tenemos la región de retrodispersión múltiple, de 184 keV a 288 keV la región de retrodispersión simple correspondiente a la energía encontrada entre  $\theta = 90^\circ$  y



**Figura 4-5.:** Espectro de retrodispersión en aluminio con  $z = 0, 1, 2, 3$  y  $4$  cm. Datos normalizados.

$180^\circ$  y más allá de esta energía tenemos la región de transmisión. Si, después de la primera dispersión, el fotón interactúa nuevamente con el material, el fotón dispersado llegará al detector con una energía inferior a  $184$  keV. Esta es la región de dispersión múltiple.

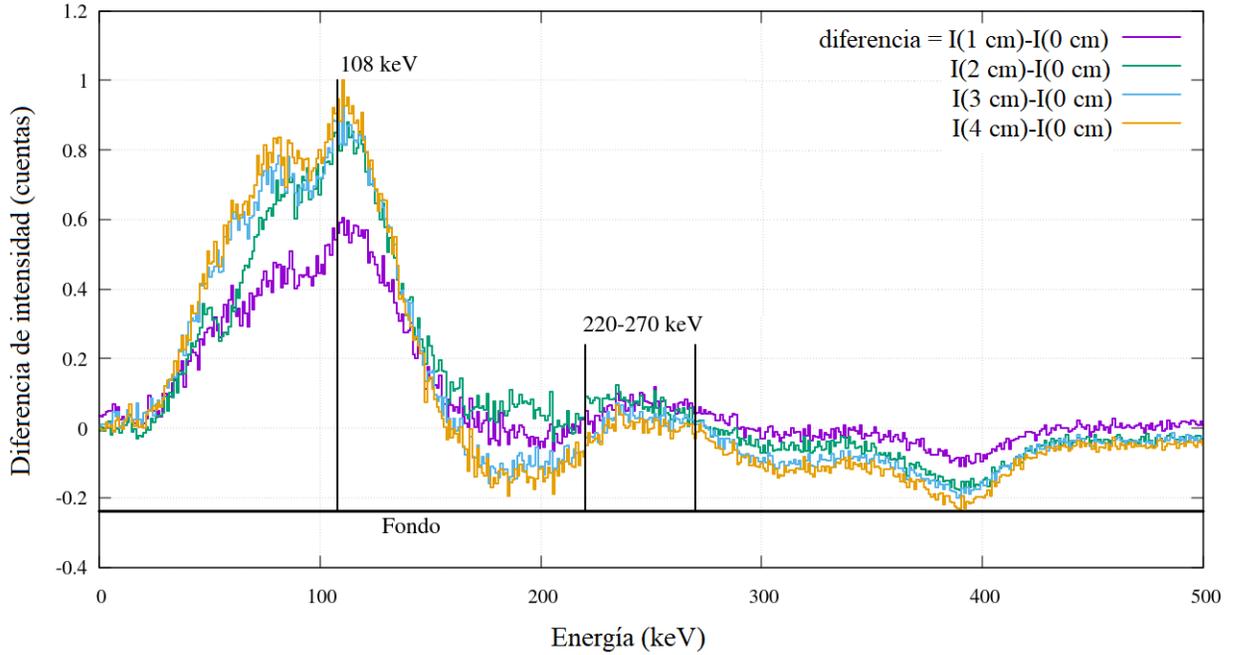
Debido a que el ángulo que hay entre el haz colimado proveniente de la fuente y el haz retrodispersado hacia el centro del detector es  $110^\circ$ , se espera observar un pico en los  $242$  keV dado por la Ec.(2-4)

$$E'_\gamma = \frac{662 \text{ keV}}{1 + \epsilon(1 - \cos 110^\circ)} = 242 \text{ keV}.$$

Es importante tener en cuenta que existe la posibilidad de que el rayo  $\gamma$  retrodispersado no colisione en el centro del detector, tal como se explica muestra en la figura 2-9(b) con  $\theta_a = 97^\circ$  y  $\theta_b = 123^\circ$ . Esta variación del ángulo abarca toda la cara del detector, es decir que esperamos encontrar un pico entre los  $220$  keV y los  $270$  keV (región sombreada).

### 4.2.3. Análisis

Con el fin de analizar los espectros obtenidos (Figura 4-5), se quiere ver el efecto del grosor de la lámina sobre el espectro de retrodispersión, por lo tanto se realiza una resta de los espectros obtenidos con  $1, 2, 3$  y  $4$  cm respecto al espectro de referencia ( $0$  cm). Obteniendo los resultados que se explican a continuación.



**Figura 4-6.:** Diferencia entre los espectros obtenidos para cada una de las placas de aluminio con espesor de 1, 2, 3 y 4 cm respecto al espectro de referencia (0 cm). Datos normalizados.

En el espectro obtenido (Figura 4-6) se observa un pico con posición media en 108 keV correspondiente a retrodispersión múltiple y un exceso sobre el fondo con posición media en 242 keV correspondiente a retrodispersión simple. Debido a que el número de conteos del pico correspondiente a los 242 keV están por debajo de 0, se ha decidido tomar como fondo en el eje de las ordenadas = -0.24, ya que nuestro interés es calcular el área correspondiente entre los 220 keV y 270 keV y graficarla en función del grosor de cada una de las muestras.

Para comprender las observaciones experimentales, hacemos uso del modelo de retrodispersión descrito por la Ec.(2-18)

$$I_B(z) = \left( \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) I_0 \frac{\mu_{C1}}{\mu_T} [1 - e^{(-\mu_T z)}].$$

Considerando que el haz  $\gamma$  incidente sobre la muestra tiene una energía  $E_\gamma = 662$  keV con un coeficiente de atenuación másico  $\mu_{m1}$  y según la Ec.(2-4) se espera una energía de retrodispersión  $E'_\gamma = 242$  keV con un  $\mu_{m2}$ .

En las bases de datos [7] encontramos los coeficientes de atenuación másico  $\mu_m$  de los materiales a estudiar. Se obtuvieron los valores correspondientes para los coeficientes de atenuación lineal que se encuentran en la Ec. (2-17) haciendo uso de  $\mu$  y  $\rho$  obtenidos en el experimento de transmisión descrito con anterioridad (Figura 4-3, Ec. (4-1)). **Finalmente**

correlacionamos los resultados obtenidos experimentalmente en transmisión, con los datos obtenidos experimentalmente en retrodispersión.

En el experimento de transmisión se determinó  $\mu$  para una energía de 662 keV,

$$\mu_1 = \mu(E_\gamma = 662 \text{ keV}) = 0.2110(3) \text{ cm}^{-1}.$$

Calculando  $\mu_2 = \mu_m(E_\gamma = 242 \text{ keV}) \cdot \rho$

$$\mu_2 = 0.1134 \text{ cm}^2/\text{g} \cdot 2.851(3) \text{ g/cm}^3 = 0.3233(3) \text{ cm}^{-1} \quad (4-2)$$

Haciendo del factor de aproximación propuesto en la Ec.(2-16),  $\nabla \mu_2$  con  $\theta = 110^\circ$  se tiene

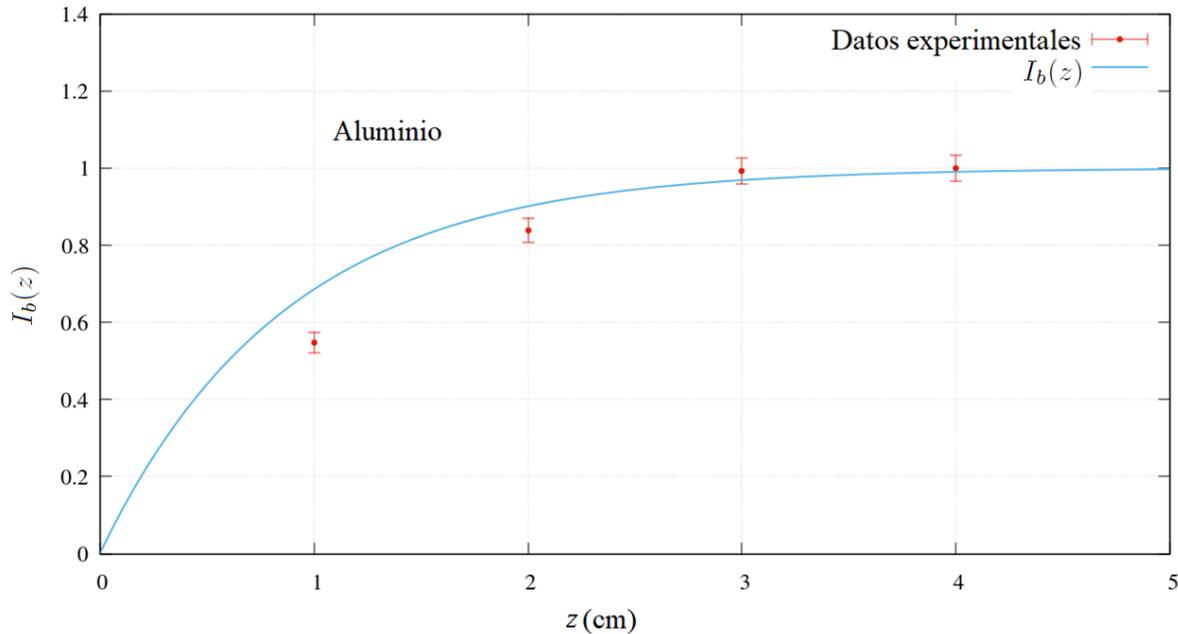
$$\nabla \mu_2 = \frac{\mu_2}{|\cos \theta|} = 0.945(1) \text{ cm}^{-1}. \quad (4-3)$$

Podemos obtener  $\mu_T$  según la Ec.(2-17)

$$\mu_T = 0.2110(3) \text{ cm}^{-1} + 0.945(1) \text{ cm}^{-1} = 1.156(1) \text{ cm}^{-1}. \quad (4-4)$$

Con este valor de  $\mu_T$  se grafica la intensidad de retrodispersión (obtenida experimentalmente) en función del grosor y se hace la comparación con la expresión

$$I_b(z) = 1 - e^{(-\mu_T z)}. \quad (4-5)$$



**Figura 4-7.:** Gráfica de  $I_b(z)$  en función del grosor de las láminas de aluminio  $z(\text{cm})$  con sus incertidumbres. Datos normalizados.

---

En la Figura 4-7 se observa que los dos primeros puntos experimentales están por debajo de la predicción teórica. Posiblemente se debe a que el exceso del fondo para 1 y 2 cm en la Figura 4-6 no están totalmente definidos. Los puntos de 3 y 4 cm se ajustan mejor a la predicción teórica, alcanzando una saturación aproximadamente a los 4 cm en la región de retrodispersión simple como se observa en la Figura 4-6, por esta razón los experimentos en arena se realizarán hasta los 6 cm.

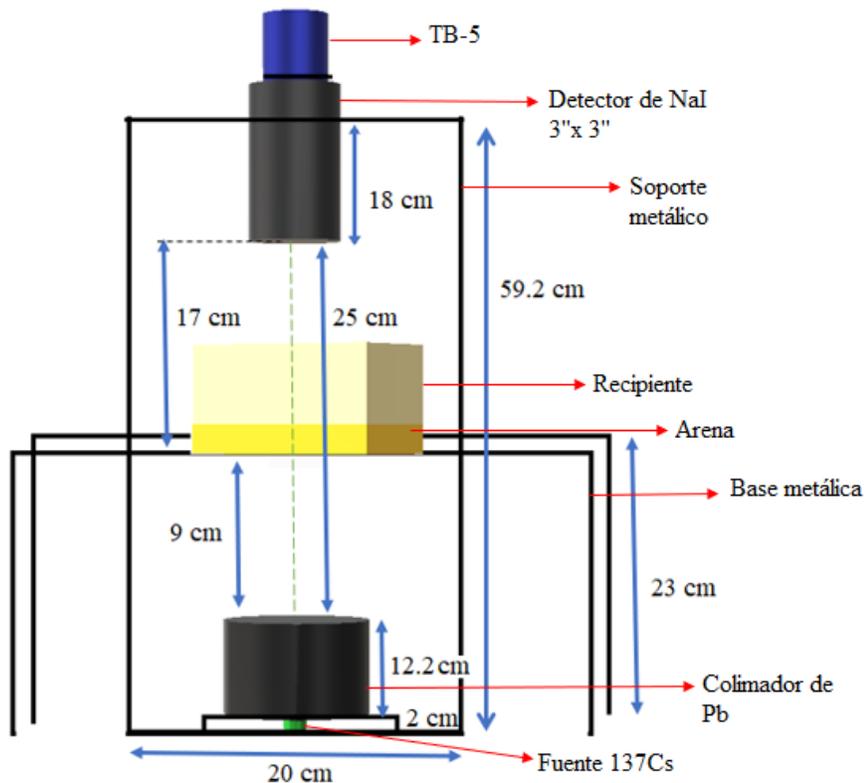
# 5

## Arena

### 5.1. Experimento de transmisión $\gamma$

#### 5.1.1. Arreglo experimental

Una vista esquemática de la configuración experimental utilizada para los experimentos de transmisión se muestra en la Figura 5-1.

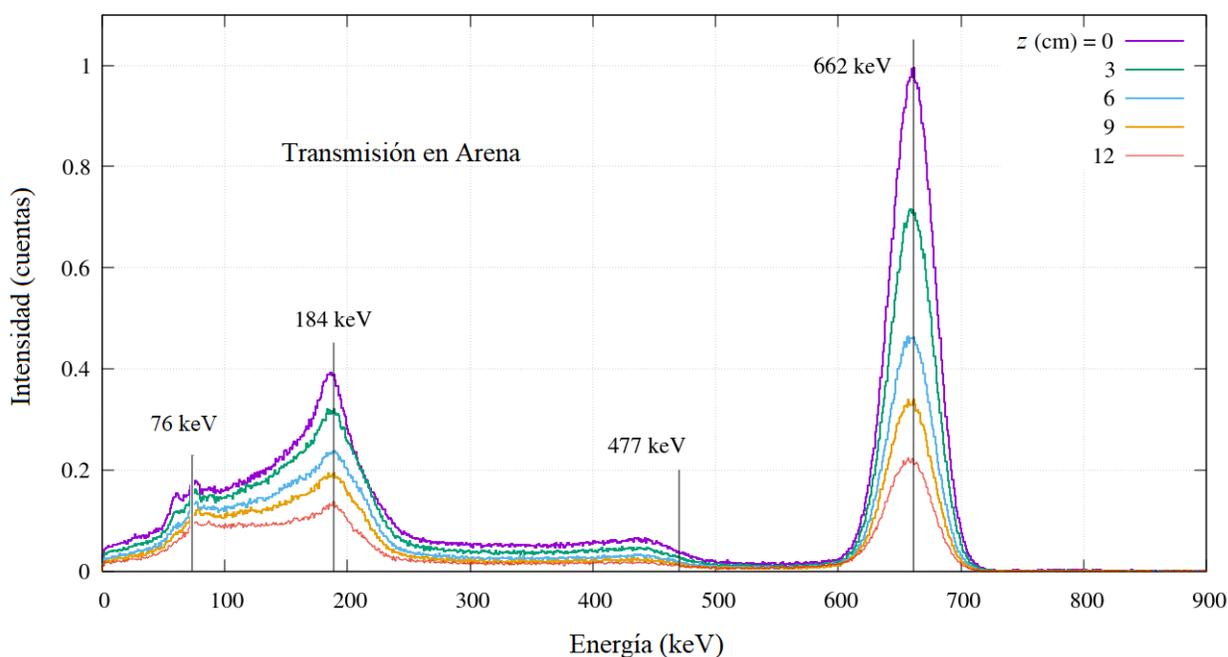


**Figura 5-1.:** Esquema del montaje experimental de transmisión  $\gamma$  en arena.

En la parte superior del montaje experimental se encuentra un detector de NaI (3" x 3"), conectado a la base digital TB-5. Para sostener la arena se utilizó un recipiente de polietileno

de 24 cm de largo, 15.6 cm de ancho y 13 cm de alto. El grosor de las paredes de la caja es de aproximadamente 4 mm. Es importante que el contenedor tenga materiales de bajo número atómico, para que el fondo proveniente debido a la interacción de la radiación con las paredes de la caja no tenga una contribución significativa en el experimento. Aunque  $\sigma_{ph}$  es bajo para plástico,  $\sigma_C$  no es despreciable y, por lo tanto, generará un fondo constante en todas las mediciones [3]. Este recipiente se apoya en dos soportes metálicos, tal y como lo indica la figura. En la parte inferior se encuentra un colimador de Pb que rodea una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ .

### 5.1.2. Resultados

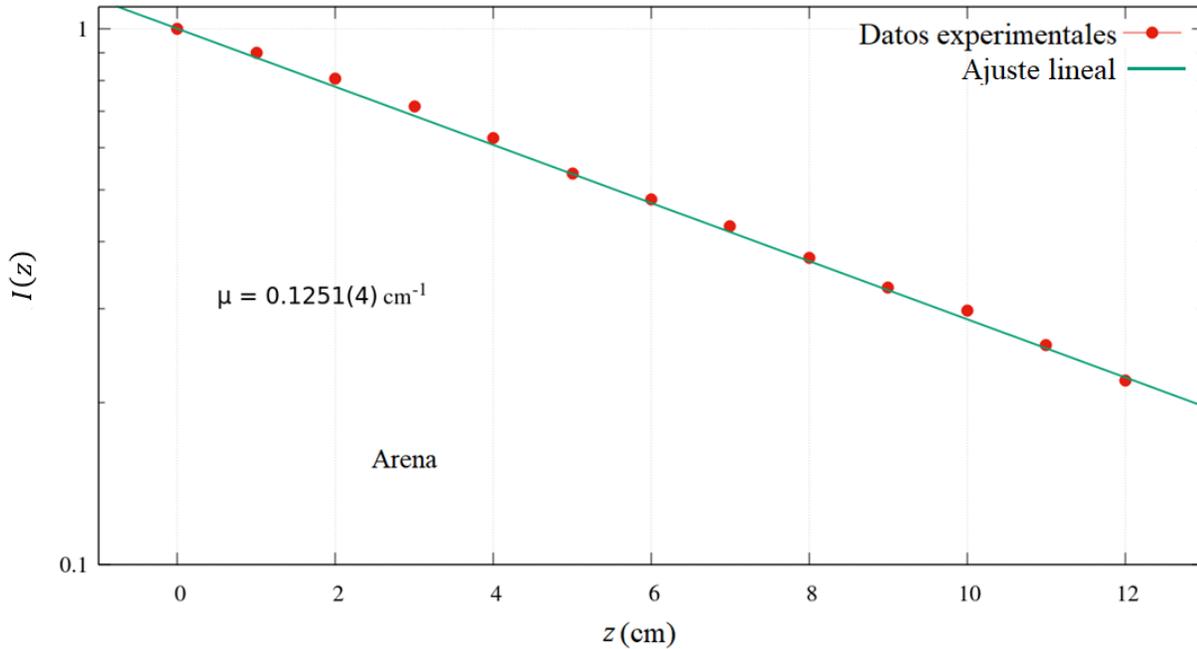


**Figura 5-2.:** Espectro de energía de transmisión en arena con  $z = 0, 3, 6, 9$  y  $12$  cm de grosor. Datos normalizados

Observando la Figura 5-2 se puede deducir que la intensidad del fotopico correspondiente al espectro para 3 cm de grosor se ha reducido aproximadamente en una tercera parte en relación con el espectro para 0 cm. Haciendo la misma comparación en el espectro de aluminio (Figura 4-2) se deduce que para el mismo grosor hay una reducción de aproximadamente la mitad respecto al espectro para 0 cm. Estas reducciones se deben a que la radiación presenta mayor atenuación en el aluminio que en la arena, debido que el camino libre medio del aluminio ( $\lambda \approx 4.7$  cm) es menor que el camino libre medio de la arena ( $\lambda \approx 7.9$  cm).

### 5.1.3. Análisis

Al hacer el ajuste lineal, se calcula un promedio del coeficiente de atenuación lineal para todas las capas de arena.



**Figura 5-3.:** La pendiente de la gráfica corresponde al coeficiente de atenuación lineal de arena  $\mu = 0.1251(4) \text{ cm}^{-1}$ . Datos normalizados.

Haciendo uso de la Ec. (2-10) se determina la densidad experimental a partir del coeficiente de atenuación lineal  $\mu = 0.1251(4) \text{ cm}^{-1}$  para la muestra de arena. Teniendo en cuenta que la composición de la arena es 96.18 % de  $\text{SiO}_2$  tomamos de la base de datos [7] el valor correspondiente de  $\mu_m = 0.07731 \text{ cm}^2/\text{g}$  a los 662 keV y obtenemos la densidad para la arena

$$\rho = 1.6181(3) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \quad (5-1)$$

Debido a que la densidad de la arena depende diferentes factores (compactación, granulación, humedad) en la literatura se encuentra una clasificación de los diferentes valores de densidad dependiendo de las condiciones de la arena [11]. El resultado obtenido experimentalmente se puede clasificar como arena seca.

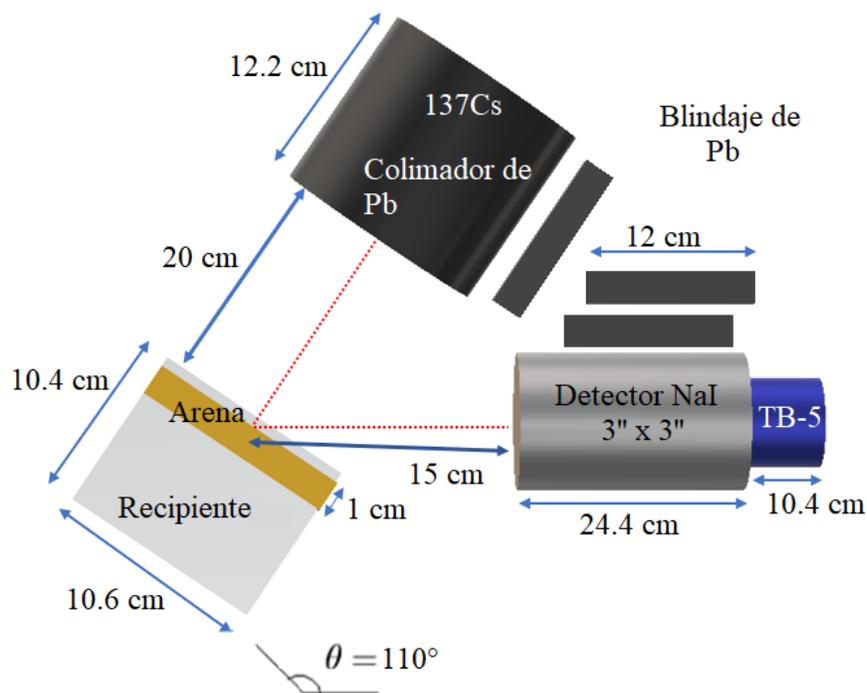


Figura 5-4.: Esquema del montaje experimental de retrodispersión  $\gamma$  en arena.

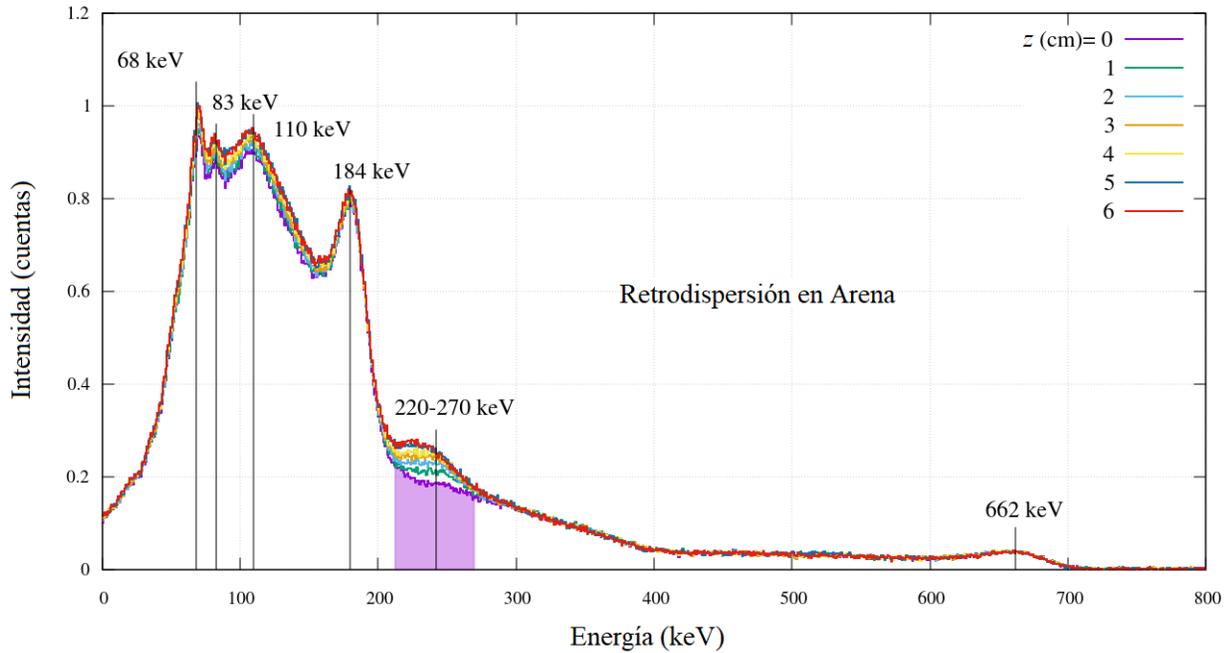
## 5.2. Experimento de retrodispersión $\gamma$

### 5.2.1. Arreglo experimental

Una vista esquemática de la configuración experimental utilizada para los experimentos de retrodispersión se muestra en la Figura 5-4. En este caso, la fuente de  $^{137}\text{Cs}$  se coloca adyacente al detector. Entre el haz colimado proveniente de la fuente y el haz retrodispersado hacia el centro del detector hay un ángulo de  $110^\circ$ .

Para sostener la arena se utilizó un recipiente de polietileno de 10.4 cm de largo, 10.6 cm de ancho y 10.5 cm de alto. El grosor de las paredes de la caja es de 4 mm. La radiación  $\gamma$  que va a la muestra de arena puede interactuar y retrodispersarse en la dirección del detector. Se colocan tres bloques de plomo de  $(12 \times 12 \times 4.7) \text{ cm}^{-1}$  entre la fuente y el detector para un mejor blindaje.

Inicialmente se toma un espectro de energía sin el recipiente que sostiene la arena, luego se toma un espectro con el recipiente vacío, esto para observar la contribución del recipiente a la prueba experimental y obtener un espectro de referencia ( $z = 0 \text{ cm}$ ) y luego se van agregando una a una capas de arena hacia la parte baja-izquierda del montaje hasta completar los 6 cm de grosor. El tiempo de medida por cada capa de arena es de 24 horas.



**Figura 5-5.** Espectro de energía de retrodispersión en arena con  $z = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  cm de grosor. Datos normalizados.

### 5.2.2. Resultados

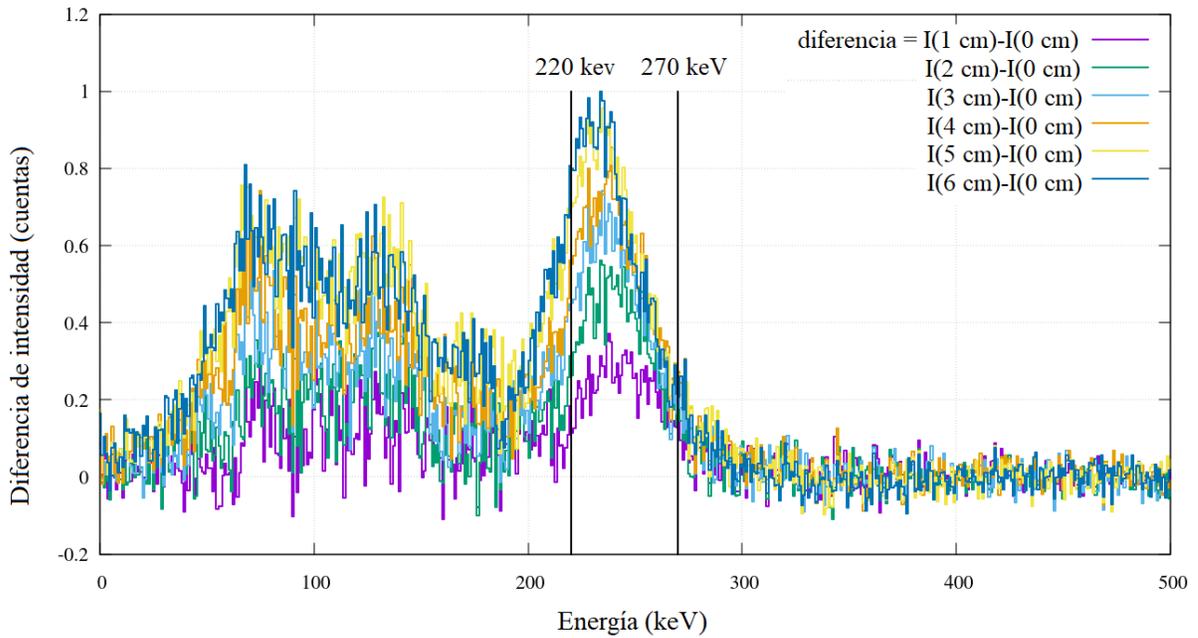
La Figura 5-5 muestra un espectro de retrodispersión sin muestra ( $z = 0$  cm) y para una muestra de arena de  $z = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  cm de grosor. Se estudia cómo varía el número de conteos en cada región cuando se modifica el grosor de la muestra.

De 0 a 184 keV se encuentra la región de retrodispersión múltiple, el espectro de la Figura 5-5 muestra que en esta región no hay una variación significativa en función del grosor de las capas de arena. De 184 keV a 288 keV se encuentra la región de retrodispersión simple correspondiente a la energía encontrada entre  $\theta = 90^\circ$  y  $180^\circ$ , en esta región se observa una variación más significativa en comparación con el espectro de retrodispersión obtenido con el aluminio (Figura 4-5). Por último tenemos la región de transmisión.

Debido a que el ángulo que hay entre el haz colimado proveniente de la fuente y el haz retrodispersado hacia el centro del detector es de  $110^\circ$ , se espera observar un pico en los 242 keV dado por la Ec.(2-4)

$$E'_\gamma = \frac{662 \text{ keV}}{1 + \epsilon(1 - \cos 110^\circ)} = 242 \text{ keV}.$$

Teniendo en cuenta que existe la posibilidad de que el rayo  $\gamma$  retrodispersado no colisione en el centro del detector, tal como se explica en la Figura 2-9(b) con  $\theta_a = 97^\circ$  y  $\theta_b = 123^\circ$ , esta variación del ángulo abarca toda la cara del detector, es decir que esperamos encontrar un pico entre los 220 keV y los 270 keV (región sombreada).



**Figura 5-6.:** Diferencia entre los espectros obtenidos para cada una de las capas de arena con espesor de 1,2, 3, 4, 5 y 6 cm respecto al espectro de referencia (0 cm). Datos normalizados.

### 5.2.3. Análisis

Con el fin de analizar los espectros obtenidos (Figura 5-5), se quiere ver el efecto del grosor de las capas de arena sobre el espectro de retrodispersión, por lo tanto se realiza una resta de los espectros obtenidos con 1,2, 3, 4, 5 y 6 cm respecto al espectro de referencia (0 cm). Obteniendo los resultados que se explican a continuación.

En el espectro obtenido (Figura 5-6) se denota un pico con posición media en 234 keV correspondiente a retrodispersión simple. Determinando el área correspondiente a cada pico entre los 220 y los 270 keV, se grafica el área en función del grosor de cada una de las muestras.

Para comprender las observaciones experimentales, hacemos uso del modelo de retrodispersión descrito por la Ec.(2-18)

$$I_B(z) = \left( \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) I_0 \frac{\mu_{C1}}{\mu_T} [1 - e^{(-\mu_T z)}].$$

Siguiendo el lineamiento del análisis de retrodispersión en el aluminio se analizan los datos obtenidos en retrodispersión en la arena. Según la Ec. (2-4) se espera una energía de retrodispersión  $E'_{\gamma 2} = 242$  keV con un  $\mu_{m2}$ .

Para determinar el coeficiente de atenuación lineal cuando la energía es de 242 keV se

hace uso de los datos obtenidos en los experimentos de transmisión de radiación  $\gamma$  en arena (Figura 5-3, Ec. 5-1) y del coeficiente de atenuación másico  $\mu_m$  que se encuentra en las bases de datos [7].

En el experimento de transmisión se determinó  $\mu$  para una energía de 662 keV.

$$\mu_1 = \mu(E_\gamma = 662 \text{ keV}) = 0.1251(4) \text{ cm}^{-1}$$

Calculando el coeficiente de atenuación lineal para la arena

$$\mu_2 = \mu_m(E_\gamma = 242 \text{ keV}) \cdot \rho$$

$$\mu_2 = 0.18901 \text{ cm}^2/\text{g} \cdot 1.618131(3) \text{ g}/\text{cm}^3 = 0.189018(4) \text{ cm}^{-1} \quad (5-2)$$

Haciendo la aproximación propuesta en la Ec.(2-16),  $\nabla \mu_2$  con  $\theta = 110^\circ$  se tiene

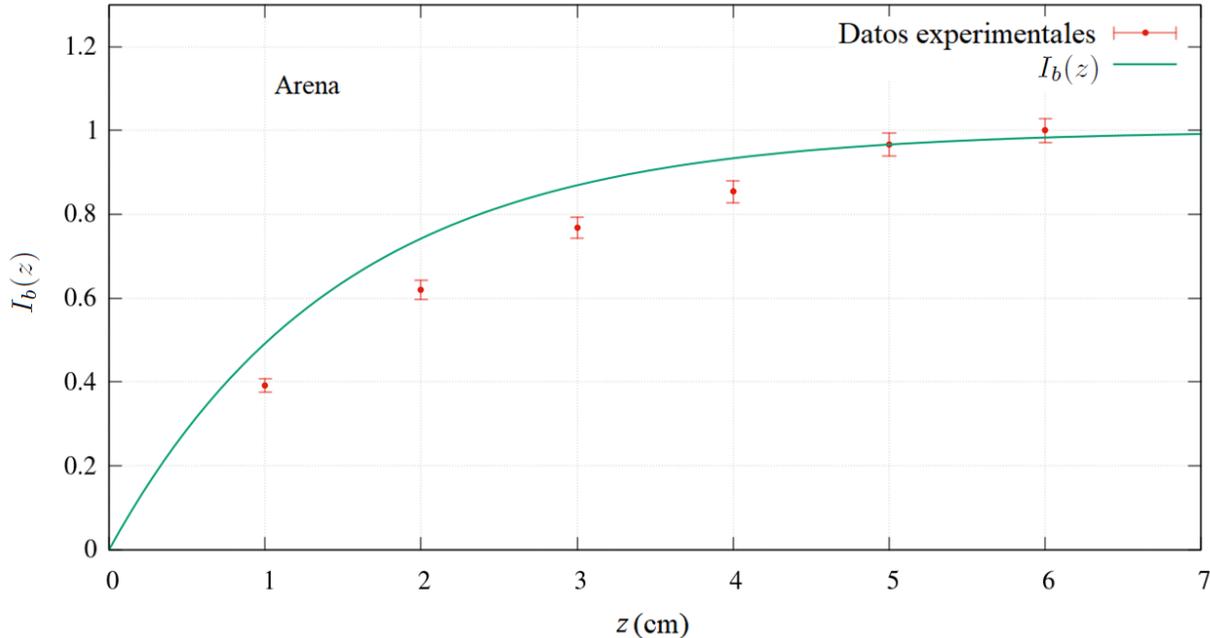
$$\nabla \mu_2 = \frac{\mu_2}{|\cos \theta|} = 0.55265(1) \text{ cm}^{-1}, \quad (5-3)$$

podemos obtener  $\mu_T$  según Ec. (2-17)

$$\mu_T = 0.1251(4) \text{ cm}^{-1} + 0.55265(1) \text{ cm}^{-1} = 0.6777(4) \text{ cm}^{-1}. \quad (5-4)$$

Con este valor de  $\mu_T$  se gráfica la intensidad de retrodispersión obtenida experimentalmente en función del grosor y se hace la comparación con la expresión

$$I_b(z) = 1 - e^{(-\mu_T z)}.$$



**Figura 5-7.:** Gráfica de  $I_b(z)$  en función del grosor de las láminas de Al  $z(\text{cm})$  con sus incertidumbres. Datos normalizados.

---

En la Figura **5-7** se observa que los cuatro primeros puntos experimentales están por debajo de la predicción teórica. Los puntos de 5 y 6 cm se ajustan mejor a la predicción teórica, alcanzando una saturación aproximadamente a los 5 cm y esto también se puede observar en la Figura **5-6** ya que se observa una saturación en el espectro correspondiente a la diferencia de (5-0) y (6-0) tanto en la región de retrodispersión simple como en la región de retrodispersión múltiple.

## **Parte III.**

# **Conclusiones y recomendaciones**

# 6

## Conclusiones

- Se determinó experimentalmente el coeficiente de atenuación lineal de los materiales (arena y aluminio). Con el coeficiente de atenuación obtenido se calculó la densidad de los materiales con una diferencia porcentual baja respecto a los valores de densidad encontrados en la literatura.
- Evaluamos el valor de  $\mu_2$  correlacionando los resultados obtenidos por el experimento de transmisión  $\mu$  y  $\rho$  y los valores encontrados en la base de datos.
- En la arena encontramos que para espesores mayores a 5 cm los espectros de retrodispersión no muestran diferencia significativa alcanzando un nivel de saturación. En el aluminio se presenta el mismo fenómeno a los 3 cm de espesor.
- El fenómeno de retrodispersión simple fue observado con mayor claridad en la arena que en el aluminio. Esto se puede observar cuando se compara la Figura 5-6 correspondiente a la retrodispersión de la arena, en donde se observa un pico entre los 220 keV y los 270 keV, con la Figura 4-6 donde apenas se observa un exceso de fondo en la misma región.

# 7

## Recomendaciones

- Si se desea estudiar el fenómeno de retrodispersión múltiple se recomienda hacer uso de aluminio, ya que en este material se observó un pico significativo en la región de retrodispersión múltiple (entre los 0 y los 184 keV) (Figura **3-6**). También se recomienda hacer estas medidas con más de 6 cm de grosor; para poder corroborar la saturación.
- Se recomienda estudiar el fenómeno de retrodispersión en grosores menores a 1 cm para poder estudiar el comportamiento de la radiación con espesores delgados.

# Bibliografía

- [1] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Cristancho F. Modelos analíticos para la retrodispersión gamma, 2017.
- [3] Cortes M. and Cristancho F. Caracterización en tiempo y energía de la respuesta del suelo a rayos gamma. Master's thesis, 2010.
- [4] Gomez J. and Cristancho F. Estudio de la retrodispersion gamma en capas de suelo con diferente espesor y contenido de agua. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [5] Leo W. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] Hubbell JH. and Veigele Wm. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections, 1975.
- [7] National Institute of Standards and Technology NIST. Xcom nist.element compound mixture selection. url <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [8] Flechas D, Fajardo E, and Cristancho F. The application possibilities of the gamma-ray compton backscattering technique. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1529, pages 40–44. AIP, 2013.
- [9] L Rucks, F García, A Kaplán, J Ponce de León, and M Hill. Propiedades físicas del suelo, 2004.
- [10] Lenntech BV. Elementos químicos ordenados por su densidad. url <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.htm>, 1998.
- [11] Universidade da Coruña. Clasificación de suelos. url <http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Suelos/suelos.pdf>.