



Estudio de materiales de construcción a partir de simulación Monte Carlo, transmisión y retrodispersión de rayos gamma.

Edisson Leonardo Peralta Bernal.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física.
Bogotá, Colombia
2020

Estudio de materiales de construcción a partir de simulación Monte Carlo, transmisión y retrodispersión de rayos gamma

Edisson Leonardo Peralta Bernal

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Físico

Director:

Ph.D. Fernando Cristancho Mejía

Línea de Investigación:

Física Nuclear

Grupo de Investigación:

Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia (GFNUN)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2020

A mis padres

Agradecimientos

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización de la tesis o trabajo de investigación. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al documento.

Resumen

El resumen es una presentación abreviada y precisa (la NTC 1486 de 2008 recomienda revisar la norma ISO 214 de 1976). Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Se recomienda que este resumen sea analítico, es decir, que sea completo, con información cuantitativa y cualitativa, generalmente incluyendo los siguientes aspectos: objetivos, diseño, lugar y circunstancias, pacientes (u objetivo del estudio), intervención, mediciones y principales resultados, y conclusiones. Al final del resumen se deben usar palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), las cuales permiten la recuperación de la información.

Palabras clave: (máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado).

A continuación se presentan algunos ejemplos de tesauros que se pueden consultar para asignar las palabras clave, según el área temática:

Artes: AAT: Art y Architecture Thesaurus.

Ciencias agropecuarias: 1) Agrovoc: Multilingual Agricultural Thesaurus - F.A.O. y 2) GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus.

Ciencias sociales y humanas: 1) Tesauro de la UNESCO y 2) Population Multilingual Thesaurus.

Ciencia y tecnología: 1) Astronomy Thesaurus Index. 2) Life Sciences Thesaurus, 3) Subject Vocabulary, Chemical Abstracts Service y 4) InterWATER: Tesauro de IRC - Centro Internacional de Agua Potable y Saneamiento.

Tecnologías y ciencias médicas: 1) MeSH: Medical Subject Headings (National Library of Medicine's USA) y 2) DECS: Descriptores en ciencias de la Salud (Biblioteca Regional de Medicina BIREME-OPS).

Multidisciplinarias: 1) LEMB - Listas de Encabezamientos de Materia y 2) LCSH- Library of Congress Subject Headings.

También se pueden encontrar listas de temas y palabras claves, consultando las distintas bases de datos disponibles a través del Portal del Sistema Nacional de Bibliotecas¹, en la sección Recursos bibliográficos.^opción "Bases de datos".

Abstract

Es el mismo resumen pero traducido al inglés. Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Al final del Abstract se deben traducir las anteriores palabras claves tomadas del

¹ver: www.sinab.unal.edu.co

texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), llamadas keywords. Es posible incluir el resumen en otro idioma diferente al español o al inglés, si se considera como importante dentro del tema tratado en la investigación, por ejemplo: un trabajo dedicado a problemas lingüísticos del mandarín seguramente estaría mejor con un resumen en mandarín.

Keywords: palabras clave en inglés(máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado)

Índice general

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
1. Introducción	1
2. Efectos relevantes de la física de rayos Gamma.	3
2.1. Emisión Gamma	3
2.2. Efecto fotoeléctrico.	3
2.3. Efecto Compton.	5
2.4. Producción de pares.	6
2.5. Transmisión.	7
2.6. Retrodispersión.	7
2.7. Método Monte Carlo.	7
2.8. Geant4.	7
3. Aspectos generales de los Morteros.	8
3.1. Características.	8
3.2. Construcción.	11
4. Simulación en Geant4.	13
4.1. Transmisión.	13
4.2. Retrodispersión.	18
5. Experimentos.	23
6. Comparación entre simulación y experimento.	24
7. Conclusiones y recomendaciones	25
7.1. Conclusiones	25
7.2. Recomendaciones	25
A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido	26
B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido	27

C. Anexo: Nombrar el anexo C de acuerdo con su contenido	28
Bibliografía	30

1. Introducción

En la introducción, el autor presenta y señala la importancia, el origen (los antecedentes teóricos y prácticos), los objetivos, los alcances, las limitaciones, la metodología empleada, el significado que el estudio tiene en el avance del campo respectivo y su aplicación en el área investigada. No debe confundirse con el resumen y se recomienda que la introducción tenga una extensión de mínimo 2 páginas y máximo de 4 páginas.

La presente plantilla maneja una familia de fuentes utilizada generalmente en LaTeX, conocida como Computer Modern, específicamente LMRomanM para el texto de los párrafos y CMU Sans Serif para los títulos y subtítulos. Sin embargo, es posible sugerir otras fuentes tales como Garomond, Calibri, Cambria, Arial o Times New Roman, que por claridad y forma, son adecuadas para la edición de textos académicos.

La presente plantilla tiene en cuenta aspectos importantes de la Norma Técnica Colombiana - NTC 1486, con el fin que sea usada para la presentación final de las tesis de maestría y doctorado y especializaciones y especialidades en el área de la salud, desarrolladas en la Universidad Nacional de Colombia.

Las márgenes, numeración, tamaño de las fuentes y demás aspectos de formato, deben ser conservada de acuerdo con esta plantilla, la cual esta diseñada para imprimir por lado y lado en hojas tamaño carta. Se sugiere que los encabezados cambien según la sección del documento (para lo cual esta plantilla esta construida por secciones).

Si se requiere ampliar la información sobre normas adicionales para la escritura se puede consultar la norma NTC 1486 en la Base de datos del ICONTEC (Normas Técnicas Colombianas) disponible en el portal del SINAB de la Universidad Nacional de Colombia¹, en la sección Recursos bibliográficos.^opcción "Bases de datos". Este portal también brinda la posibilidad de acceder a un instructivo para la utilización de Microsoft Word y Acrobat Professional, el cual está disponible en la sección "Servicios", opción "Trámites" enlace .Entrega de tesis".

La redacción debe ser impersonal y genérica. La numeración de las hojas sugiere que las páginas preliminares se realicen en números romanos en mayúscula y las demás en números

¹ver: www.sinab.unal.edu.co

arábigos, en forma consecutiva a partir de la introducción que comenzará con el número 1. La cubierta y la portada no se numeran pero si se cuentan como páginas.

Para trabajos muy extensos se recomienda publicar más de un volumen. Se debe tener en cuenta que algunas facultades tienen reglamentada la extensión máxima de las tesis o trabajo de investigación; en caso que no sea así, se sugiere que el documento no supere 120 páginas.

No se debe utilizar numeración compuesta como 13A, 14B ó 17 bis, entre otros, que indican superposición de texto en el documento. Para resaltar, puede usarse letra cursiva o negrilla. Los términos de otras lenguas que aparezcan dentro del texto se escriben en cursiva.

2. Efectos relevantes de la física de rayos Gamma.

En este capítulo se describen los aspectos generales de los rayos Gamma, se incluye su producción, tipos de fuentes y principales formas de interacción. También se describen los dos métodos utilizados, los cuales son transmisión y retrodispersión. Por otro lado, se da una breve explicación acerca del método Monte Carlo y del conjunto de herramientas llamado Geant4.

2.1. Emisión Gamma

En esta diferencia de los decaimientos alfa, beta o emisión espontánea no hay ningún cambio en la cantidad de nucleones en el núcleo, es decir, tanto N como A se mantienen. Como se puede inferir, no hay transmutación de elementos. Esta emisión consiste únicamente en perder energía de excitación restante, que por lo general es un subproducto del decaimiento alfa o beta. La radiación Gamma es radiación electromagnética, así como la luz visible, microondas y ondas de radio. Todas estas conforman el espectro electromagnético. Los gammas se encuentran en el sector más energético del espectro, por ende su longitud de onda es la más pequeña.

2.2. Efecto fotoeléctrico.

Este efecto consiste en lo siguiente, un fotón sufre una interacción con un átomo, en esta el fotón desaparece por completo. Posteriormente es expulsado un fotoelectrón de las capas superiores. Algo importante que vale la pena destacar es que la interacción mencionada se da con el átomo como un todo, pues no es posible que se dé con los electrones libres. La energía del fotoelectrón expulsado es $E_e = E_\gamma - E_b$, donde E_γ es la energía del rayo gamma incidente y E_b es la energía que mantiene al electrón ligado a su nivel de energía. [1]

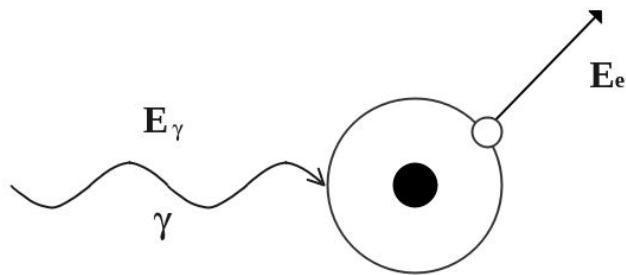


Figura 2-1.: Gráfica de la fórmula de Klein-Nishina para varios ángulos.

Luego esto, el átomo queda en un estado excitado ya que posee un exceso de energía E_b . Para quedar nuevamente en su estado de equilibrio es necesario que ocurra una de la dos posibilidades. La primera consiste en que la energía se redistribuye entre los electrones existentes, lo que puede llevar a una liberación masiva de electrones del átomo; a esto se le conoce como cascada Auger. La segunda radica en que el hueco dejado por el fotoelectrón es llenado por un electrón de mayor energía, esto conlleva a una emisión de un rayo X que se conoce como fluorescencia de rayos X.[2],

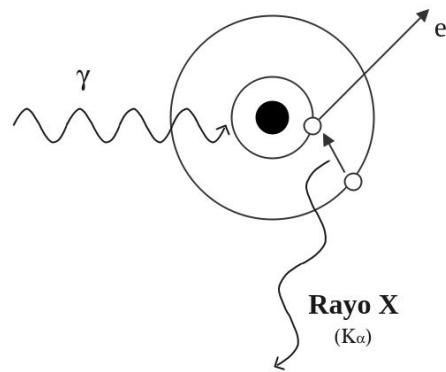


Figura 2-2.: Gráfica de la fórmula de Klein-Nishina para varios ángulos.

2.3. Efecto Compton.

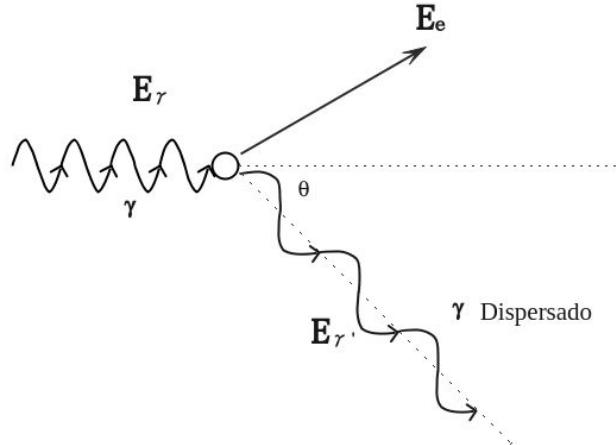


Figura 2-3.: Gráfica de la fórmula de Klein-Nishina para varios ángulos.

Se da cuando un rayo gamma interactúa con un electrón, transfiriéndole parte de su energía. Luego de la interacción tanto el rayo gamma como el electrón cambian su trayectoria. Por el principio de la conservación de la energía, se llega a que después del choque el electrón tendrá la energía

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}; \quad \text{o escrito de otra manera,}$$

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{1 + E_\gamma(1 - \cos\theta)/m_e c^2} \right\}. \quad (2-1)$$

Como se puede ver, la cantidad de energía transferida al electrón depende del ángulo de dispersión (scattering). Adicionalmente, bajo ninguna circunstancia el total de la energía del fotón es transferida al electrón, no obstante, la máxima energía transferida al electrón se logra cuando $\theta = 180^\circ$.

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

Finalmente, existe una fórmula que muestra la sección eficaz diferencial de fotones dispersados por un electrón. Esta se conoce como fórmula de Klein-Nishina, ecuación (2-2), donde r_e es el radio clásico del electrón y $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$. [3] [4]

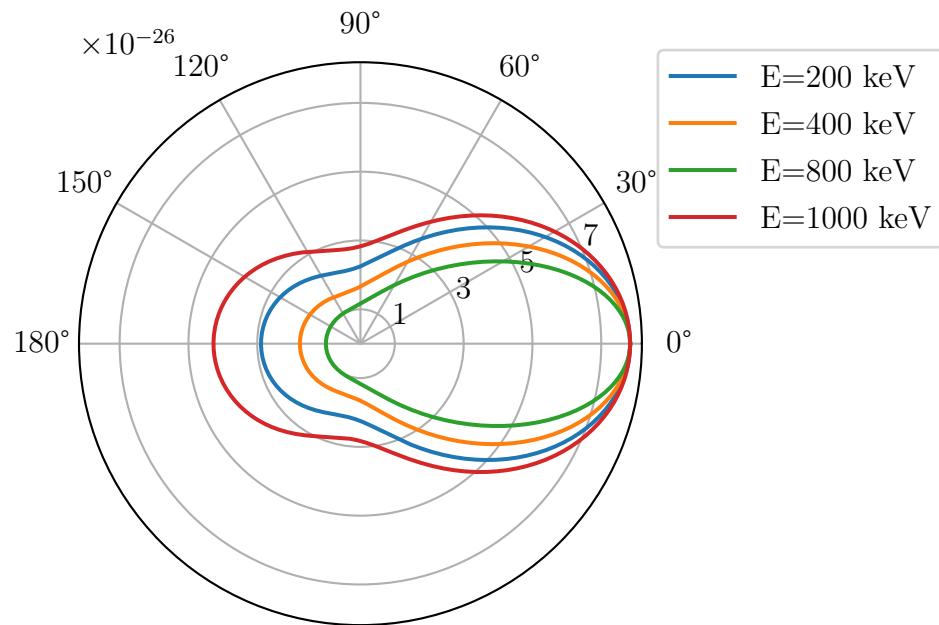


Figura 2-4.: Gráfica de la fórmula de Klein-Nishina para varios ángulos.

2.4. Producción de pares.

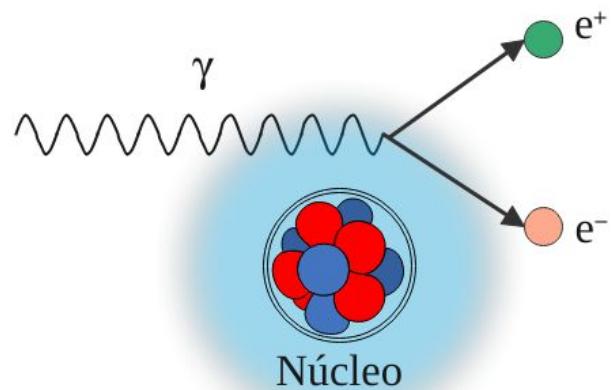


Figura 2-5.: Producción de pares.

Este efecto es bastante peculiar, ya que a diferencia de los anteriores, en este el rayo gamma interactúa con el átomo como un todo. Esta interacción tiene lugar en el rango del campo

de Coulomb ocasionado por el núcleo, y tiene como resultado la transformación de un rayo gamma en un par positrón-electrón. Es importante añadir que este efecto solo se da cuando el rayo gamma lleva una energía mayor a la masa en reposo de las dos partículas creadas. La masa del electrón y del positrón es de 511 keV, cada una, juntándolas es 1022 keV. Por otro lado, la producción de pares puede ocurrir en el campo del electrón; pero debido intensidad de este, la probabilidad que ocurra es muy baja y el umbral de energía muy grande. [1]

2.5. Transmisión.

2.6. Retrodispersión.

$$I_B(x) = i_0[1 - e^{-\mu_T x}] \quad (2-3)$$

2.7. Método Monte Carlo.

Es una técnica numérica utilizada para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios. La efectividad de este método depende en gran medida de un buen generador de números aleatorios, por ende, dicho método tomó importancia a partir de la producción en masa de las computadoras. Pues éstas son buenas generadoras de números aleatorios. [5]

2.8. Geant4.

Geant4 es un conjunto de herramientas que se utilizan en el estudio de interacción materia. Tiene una gran variedad de áreas de aplicación, las cuales incluyen la física de altas energías, nuclear y de aceleradores, así como estudios en ciencias médicas y espaciales. No es objetivo de este documento explicar de manera detallada el uso y funcionamiento de Geant4, sin embargo, se hará una breve explicación de los aspectos más relevantes.

3. Aspectos generales de los Morteros.

3.1. Características.

Como un primer acercamiento al estudio de materiales de construcción se elaboraron 5 lotes de morteros, cuyas composiciones son distintas. Inicialmente cada lote consta de 4 placas. Es importante mencionar que estos no cumplen ningún tipo de reglamentación oficial. En las simulaciones realizadas para transmisión se colocan 10 placas y para retrodispersión 13. El lote de morteros 5 se empezará a analizar en detalle en el capítulo 6, pues en este se hacen las comparaciones entre simulación y experimento.

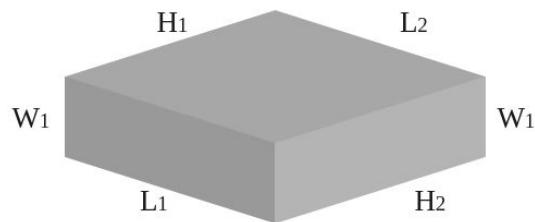


Figura 3-1.: Forma de los morteros.

En las siguientes tablas se muestran las dimensiones de las placas correspondientes a cada lote. Estos tienen la forma que se muestra en la figura 3-1.

Laminas de Morteros1							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	136.28	9.666	9.745	9.663	9.647	0.886	0.916
2	142.01	9.684	9.714	9.636	9.681	0.858	0.959
3	145.92	9.726	9.572	9.579	9.546	0.880	1.069
4	138.57	9.736	9.704	9.581	9.585	0.934	1.016

Tabla 3-1.: Medidas experimentales del lote morteros1.

Laminas de Morteros2							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	149.35	9.760	9.706	9.518	9.523	0.757	0.974
2	157.36	9.742	9.753	9.564	9.624	0.955	0.991
3	151.53	9.742	9.722	9.615	9.493	0.923	0.956
4	136.97	9.757	9.794	9.577	9.528	0.871	0.921

Tabla 3-2.: Medidas experimentales del lote morteros2.

Laminas de Morteros3							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	148.71	9.825	9.820	9.583	9.712	0.975	0.935
2	150.32	9.672	9.616	9.528	9.577	0.968	0.929
3	139.83	9.613	9.640	9.463	9.521	0.949	0.916
4	133.72	9.864	9.839	9.526	9.550	0.852	0.916

Tabla 3-3.: Medidas experimentales del lote morteros3.

Laminas de Morteros4							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	156.90	9.774	9.804	9.557	9.563	0.938	10.20
2	145.96	9.687	9.653	9.620	9.550	0.914	0.940
3	140.52	9.657	9.693	9.579	9.589	1.079	0.902
4	147.33	9.814	9.772	9.546	9.589	1.075	0.953

Tabla 3-4.: Medidas experimentales del lote morteros4.

Laminas de Morteros5							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	136.58	9.762	9.734	96.67	96.10	1.009	0.877
2	133.28	9.660	9.646	96.00	96.42	0.850	0.887
3	128.12	9.629	9.673	95.11	95.30	0.927	0.824
4	130.35	9.670	9.677	95.77	96.93	0.869	0.912

Tabla 3-5.: Medidas experimentales del lote morteros5.

Otro dato importante es la densidad del material, por ello se calcula de densidad de los morteros mediante la ecuación (3-1). Es importante mencionar que esta densidad es calculada para todas las placas por mortero, es decir, se tomó un lote y se le calculó el promedio de la masa y de las diferentes dimensiones, y con estos nuevos valores se hizo el cálculo. Este mismo proceso se repite para todos.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (3-1)$$

Lote de Morteros	densidad (g/cm ³)
1	1.62(4)
2	1.75(5)
3	1.62(7)
4	1.62(3)
5	1.60(6)

Tabla 3-6.: Densidad de los diferentes Morteros.

También es necesario saber cuales son las composiciones y el porcentaje empleado en cada lote, así que en las tablas **3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11** muestras dichas composiciones. La composición para cada lote fue elegida de acuerdo a la utilidad que tiene en la práctica, es decir, se escogieron las mezclas mas usadas en las construcciones. Pues de acuerdo a lo que se desee construir se tiene una u otra mezcla. Todas las características proporcionadas son necesarias para construir las placas de morteros en Geant4.

Material Mortero1	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	320	39.02
Arena Peña	300	36.58
Agua	200	24.34

Tabla 3-7.: Proporción porcentual en la elaboración de morteros1.

Material Mortero2	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	160	22.53
Arena Peña	450	63.38
Agua	100	14.08

Tabla 3-8.: Proporción porcentual en la elaboración de morteros2.

Material Mortero3	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	110	15.49
Arena Sílice	500	70.42
Agua	100	14.08

Tabla 3-9.: Proporción porcentual en la elaboración de morteros3.

Material Mortero4	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	100	10.99
Arena Sílice	700	76.92
Agua	110	12.08

Tabla 3-10.: Proporción porcentual en la elaboración de morteros4.

Material Morteros5	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	600	75
Arena Sílice	0	0
Agua	200	25

Tabla 3-11.: Proporción porcentual en la elaboración de morteros5.

3.2. Construcción.

Como se puede apreciar la variación entre sus composiciones es notable, sin embargo, mas adelante veremos que las características a estudiar no varían significativamente entre los primeros 4 morteros, pues para el lote 5 las diferencias se hacen notables. Por esta razón se decide tomar estos últimos para hacer una comparación entre simulación y experimento.

La construcción del lote de morteros 5 se hizo de la siguiente manera; se toman las proporciones mencionadas en la tabla **3-11** para el lote de morteros 5 y se vierten en un recipiente, posteriormente se mezclan. Una vez la mezcla es homogénea, es esparcida en unos moldes previamente hechos. Es importante mencionar que antes de hacer esto, a los moldes se les aplicó una capa de aceite (AGREGAR QUE TIPO DE ACEITE), esto con la idea de evitar que al endurecerse la mezcla fuese imposible retirar las placas sin ser dañadas.

Una vez hecho esto, se pusieron bolsas plásticas sobre el cemento preparado. De esta manera se mantiene la humedad, y así obtener placas con buena resistencia y mantener su integridad estructural intacta. En las construcciones, luego de hacer columnas, planchas, pisos y demás, es costumbre aplicar agua a estas con el fin de mantener la integridad de dichas estructuras. Por alguna razón que no entiendo, si no se hace esto empiezan a aparecer una serie de grietas. Esto se ve principalmente en los pisos, planchas y pañetes.

Después de los procesos mencionados, se dejaron secar en el laboratorio por 3 días. Fueron 3 días porque no se tenía ingreso a la UN días antes. Es importante mencionar que al ser

piezas pequeñas no requieren de tanto tiempo para secarse y endurecerse. Pasados estos días, se procedió a sacar las placas de los moldes. Se lograron extraer sin mayores complicaciones. Ya retiradas se midió el grosor y lados a cada una de ellas, Pues aunque los moldes tienen medidas bien definidas durante la elaboración y secado es posible que las dimensiones se alteren. En la siguiente tabla se muestran las dimensiones. Además el mas imágenes se muestra en proceso descrito anteriormente



Figura 3-2.: Elaboración de la mezcla.



Figura 3-3.: Distribución de la mezcla en los moldes.



Figura 3-4.: Placas listas para extraer.



Figura 3-5.: Resultado final.

4. Simulación en Geant4.

De acuerdo a las propiedades de los morteros, estos son construidos en Geant4 y se procede a hacer las simulaciones correspondientes.

4.1. Transmisión.

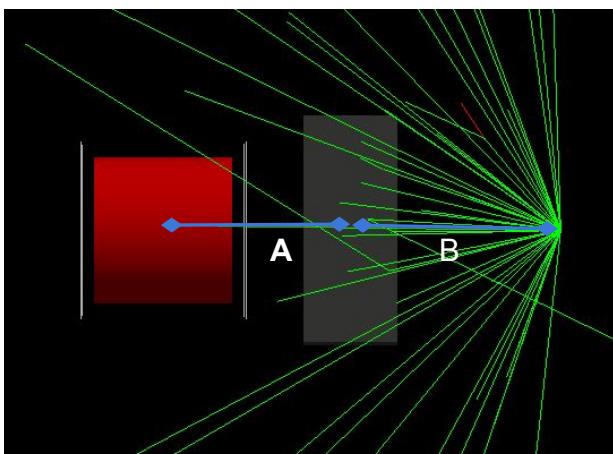


Figura 4-1.: Montaje de transmisión en Geant4. distancias

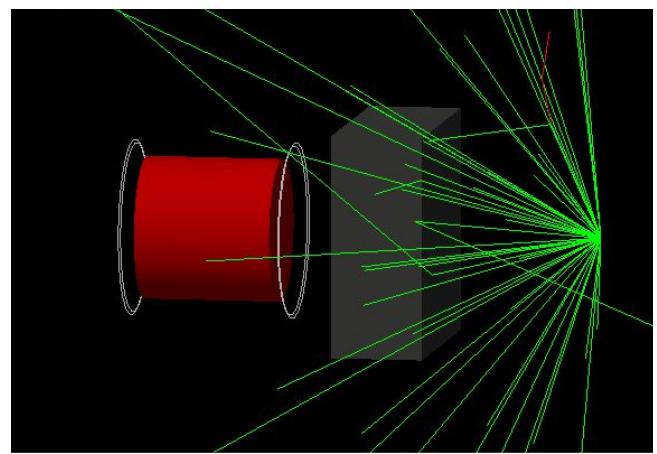


Figura 4-2.: Montaje de transmisión en Geant4. Vista diagonal.

En las figuras 4-1 y 4-2 se puede apreciar el montaje construido en Geant4 para hacer la transmisión de rayos gamma en los distintos morteros. El cilindro de color rojo es el detector de Ge-HP utilizado, el mortero es la caja de color gris y las líneas verdes son los rayos gammas expedidos de las fuentes usadas. En la figura 4-1 se logran ver dos distancias destacadas, las cuales son bastante relevantes. $A + B$ (11cm) y A es constante, por ende B no lo es, esto se debe a que se incrementa el grosor de la muestra para cada medición. La primera medición se hace sin placa, es decir, se mide I_0 , luego se empieza a aumentar el grosor centímetro por centímetro ya que la idea es simular que para cada medición se agrega una placa.

Las energías utilizadas en la simulación son (picos de izquierda a derecha) 81 keV, 122 keV, 356 keV, 511 keV, 662 keV, 1173 keV, 1273 keV y 1332 keV. Se usaron estas ya que en el laboratorio se tienen fuentes de ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{57}Co y ^{22}Na las cuales emiten fotones a las energías mencionadas.

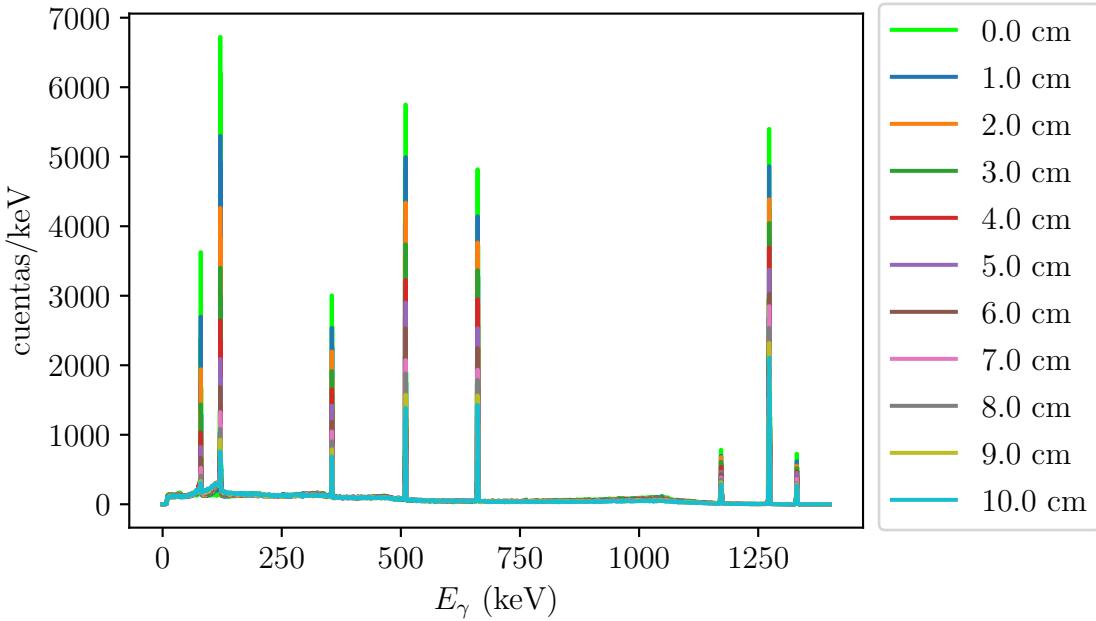


Figura 4-3.: Espectro de 10 láminas de Morteros1. Transmisión

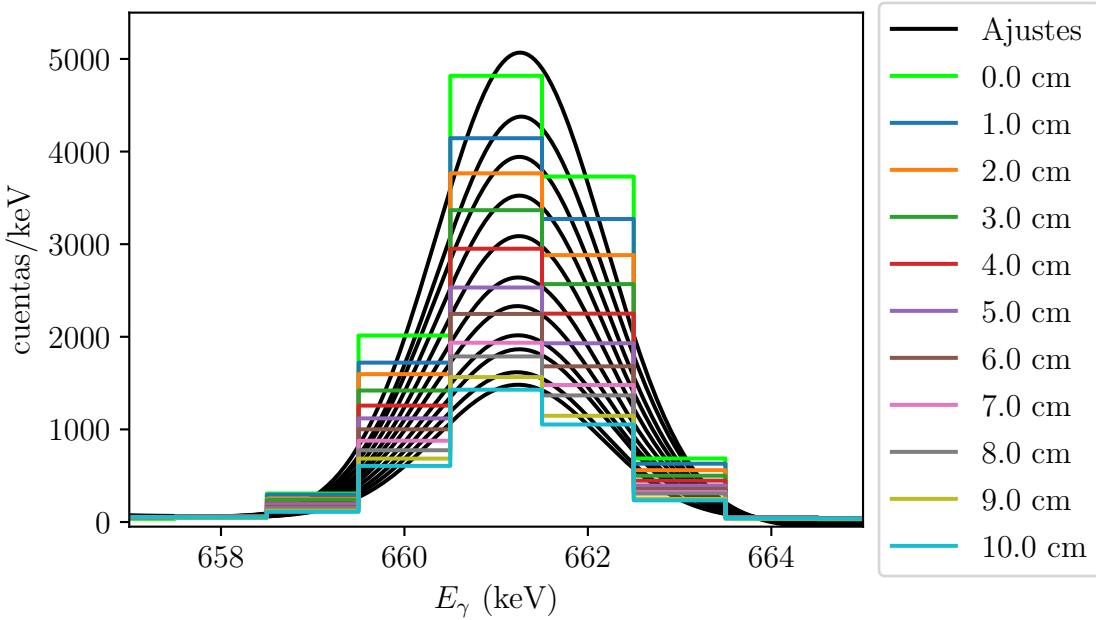


Figura 4-4.: Ajustes realizados para los fotopicos. Morteros1.

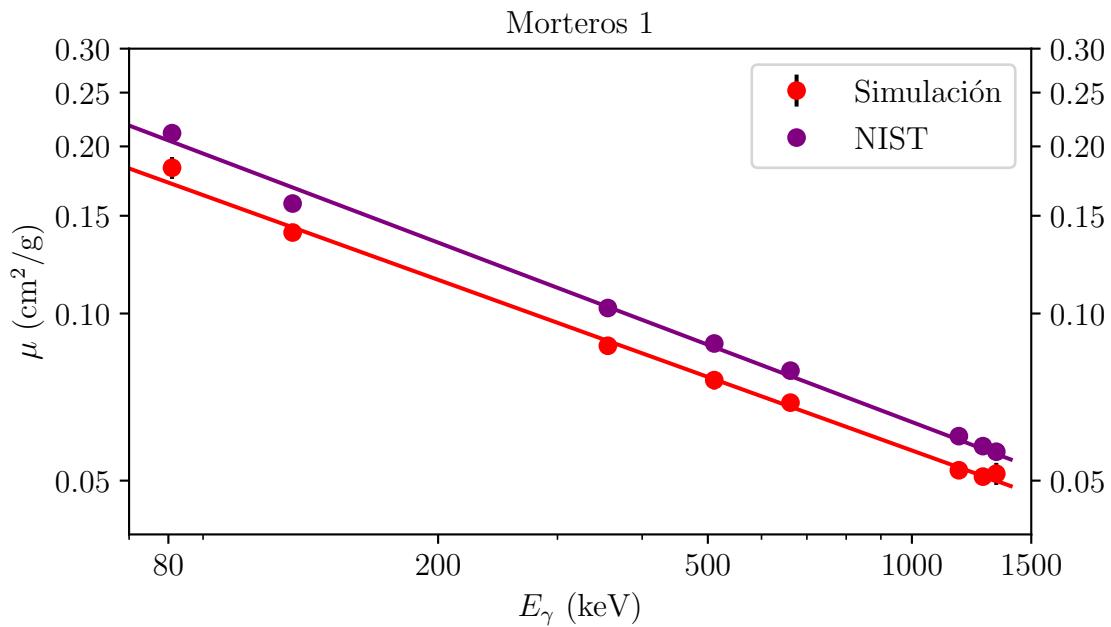
Se obtienen 5 conjuntos de espectros en total, uno para cada lote de morteros, pero solo es necesario mostrar uno de ellos, pues los demás son similares y aportan muy poca información.

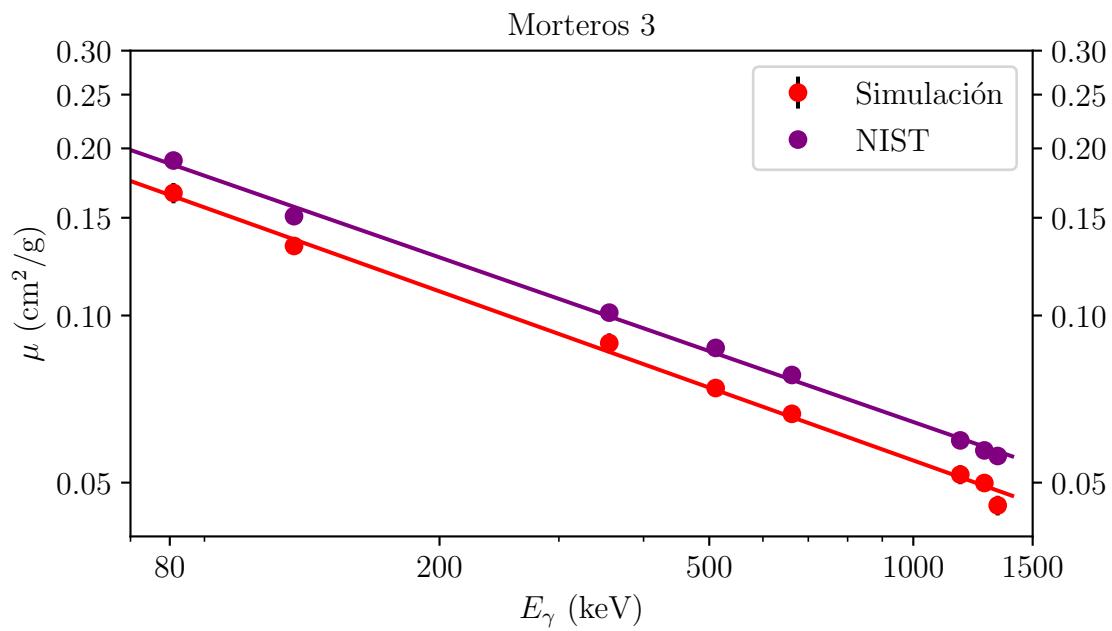
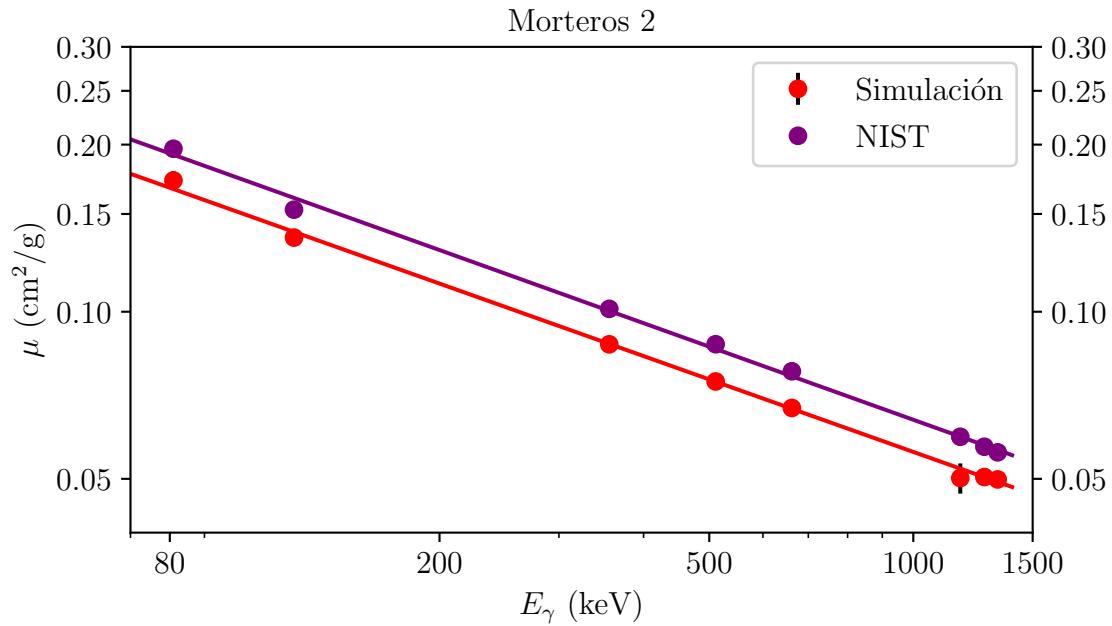
Las alturas son distintas ya que las actividades de las fuentes son distintas. Como se puede ver en la figura 4-3, cuanto mas grueso el material, la intensidad disminuye. Esto se debe a que obedece la ecuación 4-1,

$$I = I_0 e^{-\mu x}; \quad (4-1)$$

donde I_0 es la intensidad inicial, μ el coeficiente de atenuación y x el grosor del material. Esta ultima es la variable, en el presente texto será llamada t [1]. El valor de μ es encontrado para cada fotopico usando un ajuste Gaussiano como el de la figura 4-4. Ya que gracias a este se encuentran las distintas intensidades, con ellas se hace un ajuste y se encuentra el valor de μ . Es fácil ver que se tendrán 8 valores, pues se tendrá uno para cada fotopico. Una vez encontrados los valores de μ , se realiza un ajuste que tiene la forma de la ecuación (4-2). Estos valores de α y n con da información acerca de como varía el coeficiente de atenuación másico en función de la energía.

$$\frac{\mu}{\rho} = \alpha \times E^{-n}; \quad [6] \quad (4-2)$$





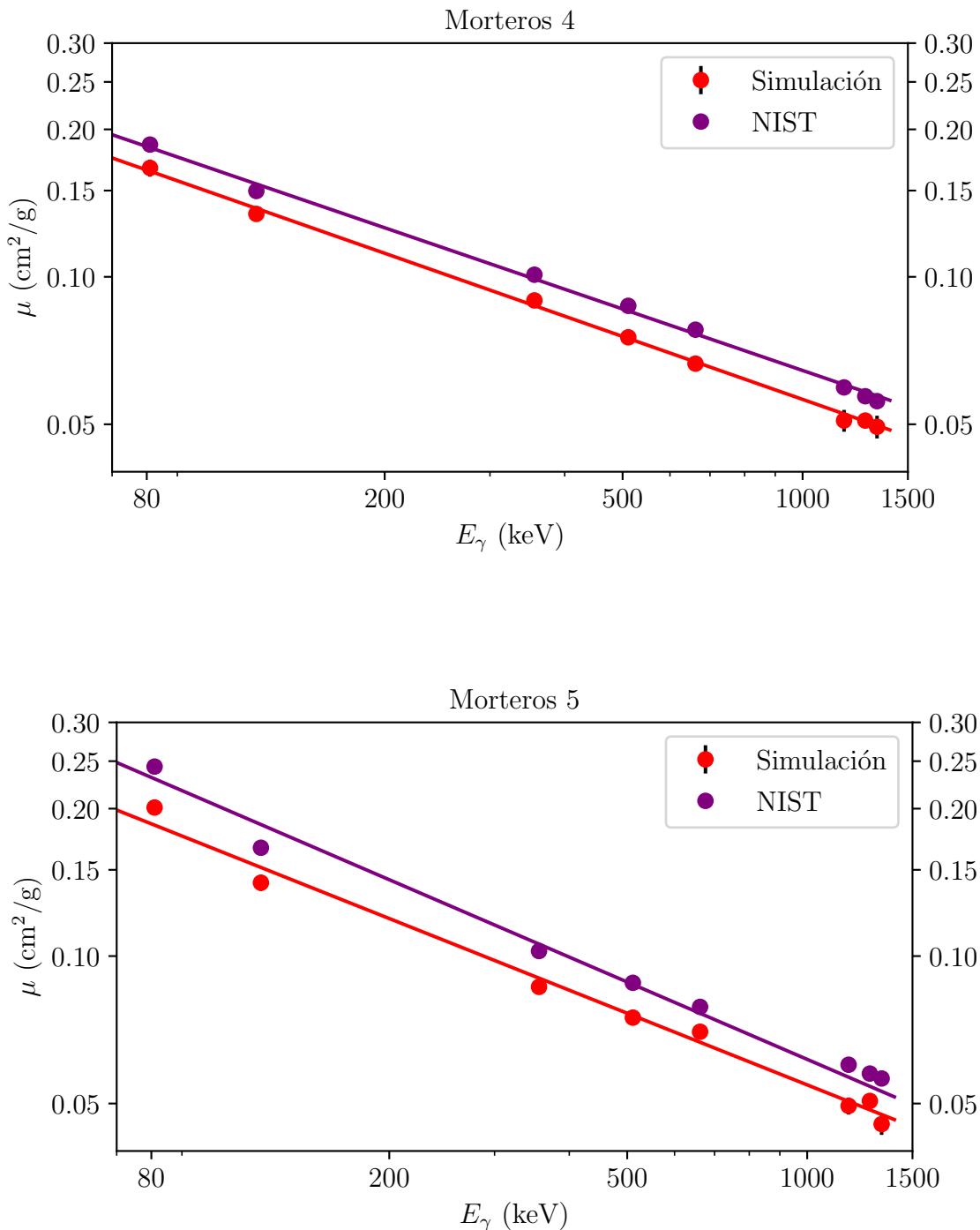


Figura 4-5.: Ajuste para encontrar α y n a partir de los diferentes μ/ρ .

En las figuras anteriores podemos ver los ajustes, es importante mencionar que allí se gráfica el coeficiente de atenuación másico μ/ρ , el cual fue definido anteriormente. Como se puede observar, los resultados obtenidos con la simulación son similares a los de la base de datos

NIST [7]. Por otro lado, la incertidumbre para los datos de NIST esta asociada únicamente al ajuste. En la tabla 4-1 se muestra la comparación entre los valores de α y n .

	α_{Geant4}	α_{NIST}	Discrepancia	n_{Geant4}	n_{NIST}	Discrepancia
Morteros 1	1.18(8)	1.56(15)	24 %	0.44(1)	0.46(2)	4 %
Morteros 2	1.12(5)	1.31(9)	14 %	0.43(1)	0.44(1)	2 %
Morteros 3	1.11(8)	1.20(7)	7 %	0.44(1)	0.42(1)	5 %
Morteros 4	1.07(5)	1.15(6)	7 %	0.43(1)	0.42(1)	2 %
Morteros 5	1.57(21)	2.31(39)	32 %	0.49(2)	0.52(3)	6 %

Tabla 4-1.: Comparación entre los valores obtenidos de Geant4 y NIST.

4.2. Retrodispersión.

La figura 4-6 se muestra el montaje utilizado para la retrodispersión. El cilindro azul es el detector de NaI, la caja gris el mortero y las líneas verdes los rayos gammas disparados por una fuente de ^{137}Cs empleada. Esta fuente emite fotones a una energía de 662 keV. Adicionalmente se tiene la figura 4-7 la cual deja ver el arreglo desde una perspectiva que permite ver claramente la forma que tiene. Las distancias A (AGREGAR VALOR) y B (6cm) y el ángulo permanecen constantes. Cabe mencionar que la distancia B comprende la distancia que hay desde la fuente hasta la superficie del mortero. Para este montaje se toman 13 espectros; uno para cada placa, es decir, por cada medición el grosor aumenta aprox. 1 cm.

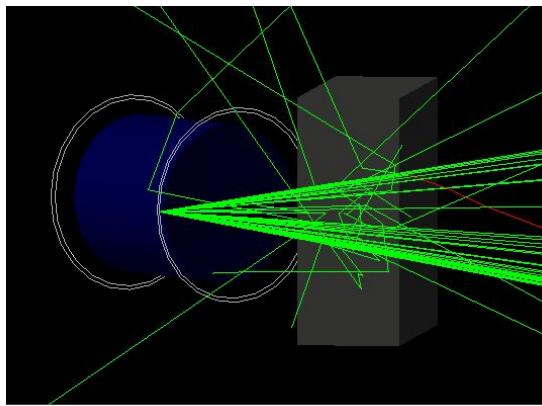


Figura 4-6.: Vista lateral del montaje de retrodispersión.

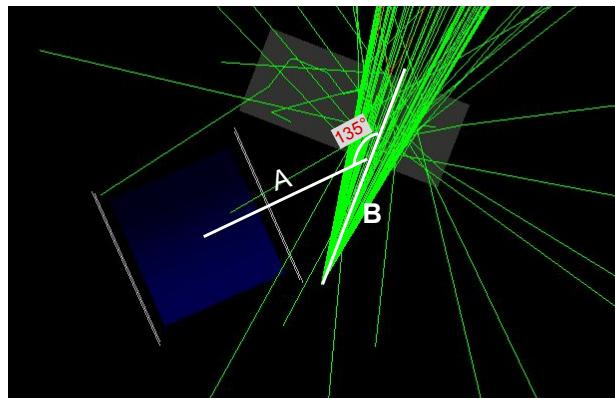


Figura 4-7.: Vista superior del montaje de retrodispersión y algunas distancias importantes.

Cada simulación se realizó disparando 10 millones de rayos gamma a cada uno de los morteros para cada grosor distinto. Esto deja como resultado una gran cantidad de espectros

agrupados por cada tipo de mortero. De acuerdo a la teoría, cuanto mas aumente el grosor, mayor será la intensidad del pico asociado a la retrodispersión. Sin embargo, después de determinado grosor la intensidad deja de incrementar; pues los rayos gamma que entran no vuelven a salir. A este grosor se le llamará distancia de saturación. En la figura 4-8 se puede apreciar el comportamiento de las intensidades a medida que aumenta el grosor del material.

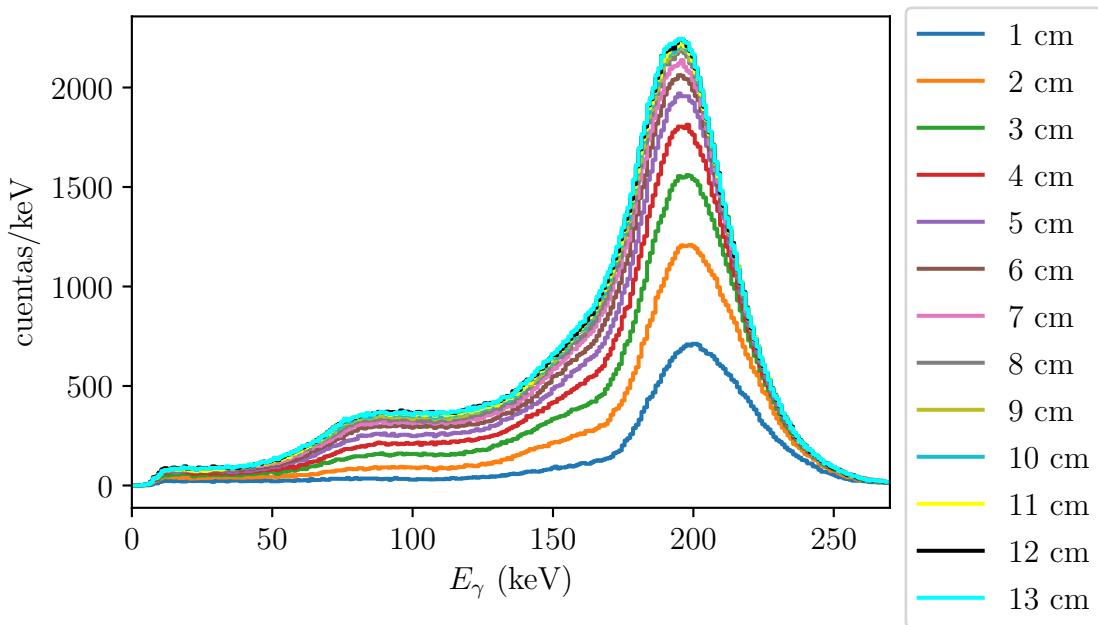


Figura 4-8.: Espectro de 10 láminas de Morteros1.

De acuerdo a la figura 4-7 y a las dimensiones del detector, es posible encontrar que los ángulos que abarca la cara del detector mas próxima a las placas son desde 105° hasta 164° , y las energías asociadas son 262 keV y 197 keV respectivamente. Estás energías son encontradas usando la ecuación (PONER LA ECUACION CUANDO HAGA EL MARCO TEÓRICO.)

Una vez encontradas las intensidades asociadas a cada grosor, se hace un ajuste tal y como se ve en la figura 4-9. Este ajuste permite encontrar el valor de μ_T , además, la distancia de saturación, la cual se encuentra normalizando las intensidades a la mayor de ellas y localizando el valor de intensidad 0,9. Adicionalmente se encuentran estos mismos valores pero usando la base de datos NIST.

	μ_T Geant4	μ_T NIST	Discrepancia
Morteros 1	0.159(6)	0.275	38.1 %
Morteros 2	0.147(5)	0.252	41.6 %
Morteros 3	0.145(8)	0.253	42.6 %
Morteros 4	0.144(5)	0.252	42.8 %
Morteros 5	0.172(7)	0.258	33.3 %

Tabla 4-2.: Comparación entre los valores obtenidos de Geant4 y NIST.

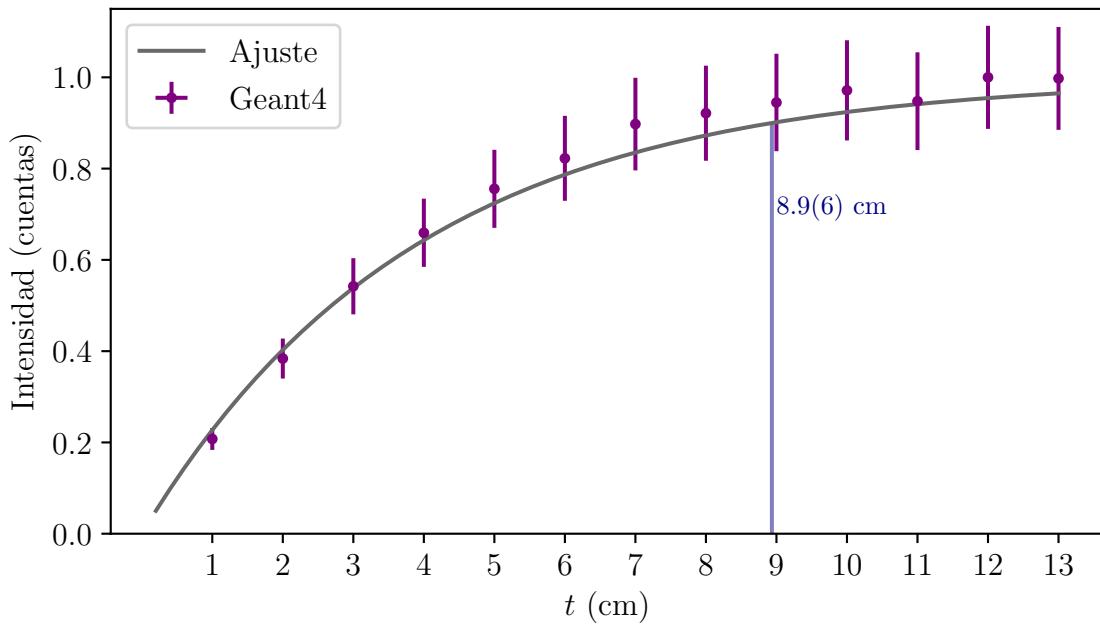


Figura 4-9.: Valores de μ_T para Morteros 1.

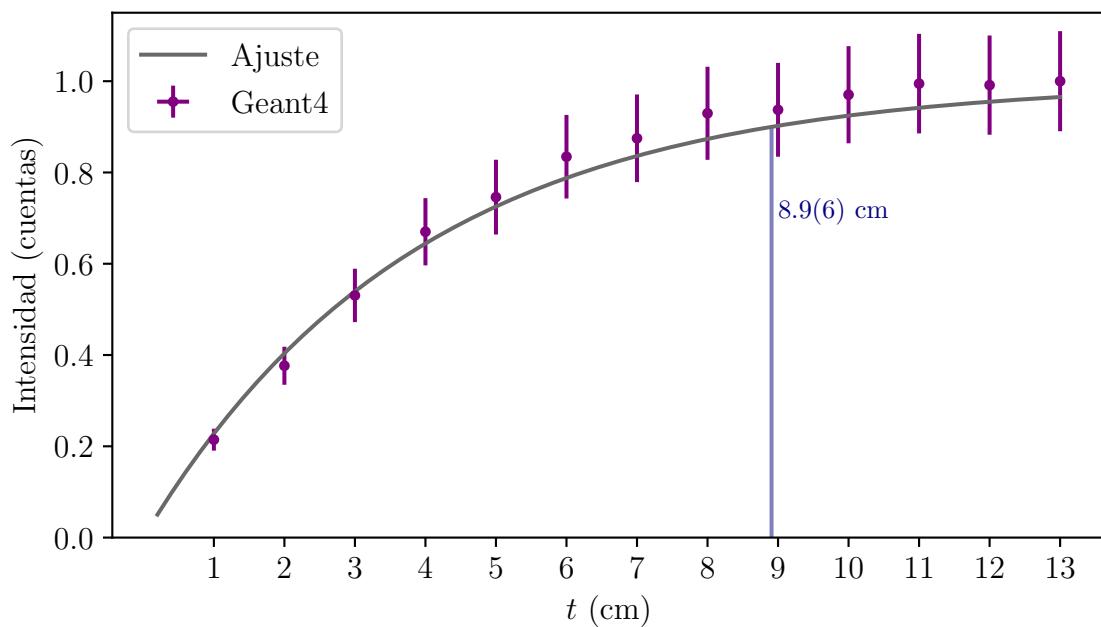


Figura 4-10.: Valores de μ_T para Morteros 2.

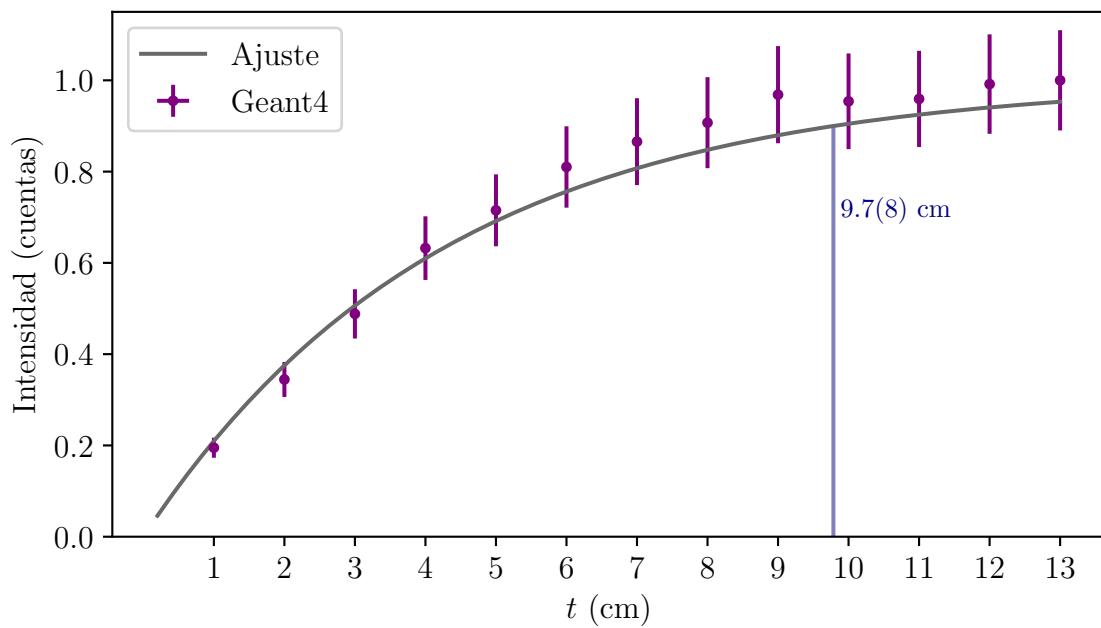


Figura 4-11.: Valores de μ_T para Morteros 3.

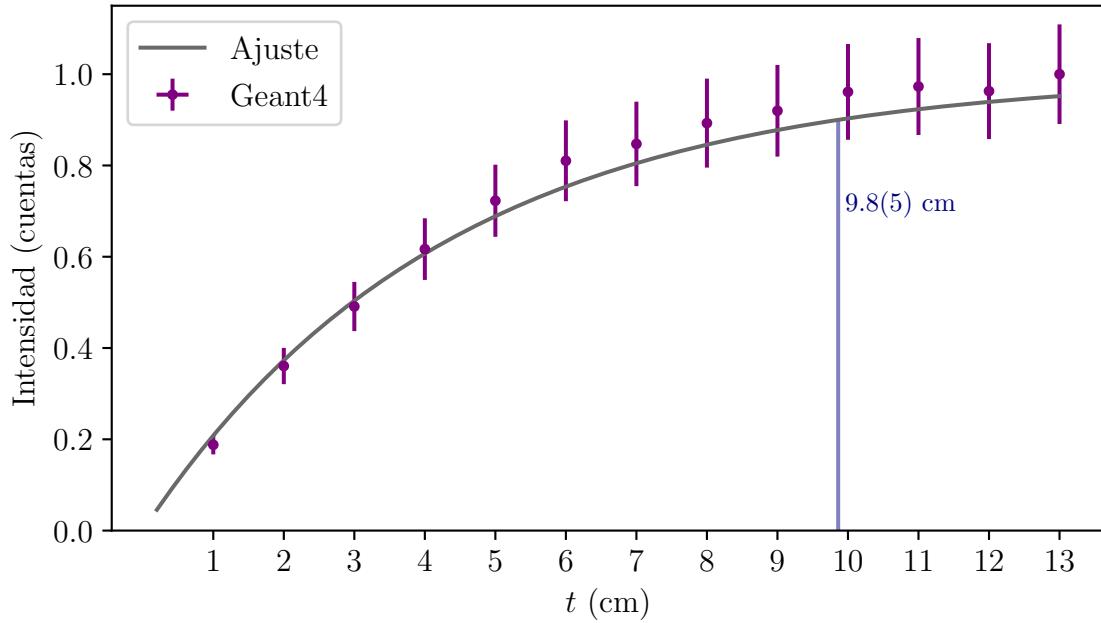


Figura 4-12.: Valores de μ_T para Morteros 4.

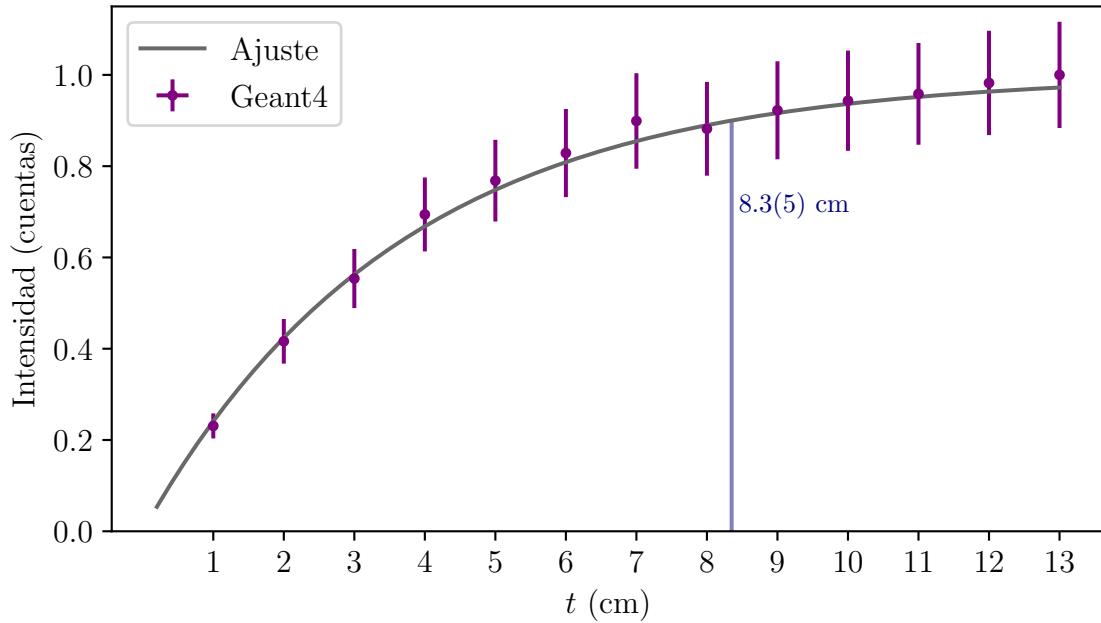


Figura 4-13.: Valores de μ_T para Morteros 5.

5. Experimentos.

6. Comparación entre simulación y experimento.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Las conclusiones constituyen un capítulo independiente y presentan, en forma lógica, los resultados de la tesis o trabajo de investigación. Las conclusiones deben ser la respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Se deben titular con la palabra conclusiones en el mismo formato de los títulos de los capítulos anteriores (Títulos primer nivel), precedida por el numeral correspondiente (según la presente plantilla).

7.2. Recomendaciones

Se presentan como una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada. Deben contemplar las perspectivas de la investigación, las cuales son sugerencias, proyecciones o alternativas que se presentan para modificar, cambiar o incidir sobre una situación específica o una problemática encontrada. Pueden presentarse como un texto con características argumentativas, resultado de una reflexión acerca de la tesis o trabajo de investigación.

A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido

Los Anexos son documentos o elementos que complementan el cuerpo de la tesis o trabajo de investigación y que se relacionan, directa o indirectamente, con la investigación, tales como acetatos, cd, normas, etc.

B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido

A final del documento es opcional incluir índices o glosarios. Éstos son listas detalladas y especializadas de los términos, nombres, autores, temas, etc., que aparecen en el mismo. Sirven para facilitar su localización en el texto. Los índices pueden ser alfabéticos, cronológicos, numéricos, analíticos, entre otros. Luego de cada palabra, término, etc., se pone coma y el número de la página donde aparece esta información.

C. Anexo: Nombrar el anexo C de acuerdo con su contenido

MANEJO DE LA BIBLIOGRAFÍA: la bibliografía es la relación de las fuentes documentales consultadas por el investigador para sustentar sus trabajos. Su inclusión es obligatoria en todo trabajo de investigación. Cada referencia bibliográfica se inicia contra el margen izquierdo.

La NTC 5613 establece los requisitos para la presentación de referencias bibliográficas citas y notas de pie de página. Sin embargo, se tiene la libertad de usar cualquier norma bibliográfica de acuerdo con lo acostumbrado por cada disciplina del conocimiento. En esta medida es necesario que la norma seleccionada se aplique con rigurosidad.

Es necesario tener en cuenta que la norma ISO 690:1987 (en España, UNE 50-104-94) es el marco internacional que da las pautas mínimas para las citas bibliográficas de documentos impresos y publicados. A continuación se lista algunas instituciones que brindan parámetros para el manejo de las referencias bibliográficas:

Institución	Disciplina de aplicación
Modern Language Association (MLA)	Literatura, artes y humanidades
American Psychological Association (APA)	Ambito de la salud (psicología, medicina) y en general en todas las ciencias sociales
Universidad de Chicago/Turabian	Periodismo, historia y humanidades.
AMA (Asociación Médica de los Estados Unidos)	Ambito de la salud (psicología, medicina)
Vancouver	Todas las disciplinas
Council of Science Editors (CSE)	En la actualidad abarca diversas ciencias
National Library of Medicine (NLM) (Biblioteca Nacional de Medicina)	En el ámbito médico y, por extensión, en ciencias.
Harvard System of Referencing Guide	Todas las disciplinas
JabRef y KBibTeX	Todas las disciplinas

Para incluir las referencias dentro del texto y realizar lista de la bibliografía en la respectiva sección, puede utilizar las herramientas que Latex suministra o, revisar el instructivo desa-

rrollado por el Sistema de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Colombia¹, disponible en la sección "Servicios", opción "Trámites" enlace ".Entrega de tesis".

¹Ver: www.sinab.unal.edu.co

Bibliografía

- [1] Gordon Gilmore. *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] F Cristancho. Instrumentación nuclear. notas de clase. sin publicar, 2019.
- [4] William R. Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. American Association of Physics Teachers, 1990.
- [5] Geant4 Collaboration. Geant4, a simulation toolkit. physics reference manual. Technical report, CERN, 2020.
- [6] R.C Hurtado. Caracterización de mortero mediante transmisión y retrodispersión de rayos gamma. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [7] National Institute of Standards NIST and Technology. Xcom nist.element compound mixture selection. url <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, 2020.