

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Física

**Caracterización de Dispersiones
Compton Simples y Múltiples en
Suelo mediante Simulación Numérica**

por

Claudia Marcela Garzón Flórez

Director

Dr. Fernando Cristancho

Caracterización de Dispersiones Compton Simples y
Múltiples en Suelo mediante Simulación Numérica

Claudia Marcela Garzón Flórez

6 de febrero de 2012

Índice general

Introducción	i
1. Fundamentos Teóricos	1
1.1. Rayos γ	1
1.1.1. Efecto Fotoeléctrico.	1
1.1.2. Dispersión Compton.	2
1.1.3. Probabilidad de Dispersión Compton	3
1.1.4. Compton simple y múltiple.	4
1.1.5. Producción de Pares.	6
1.2. Estudio Teórico de la Retrodispersión γ - Suelo	6
1.2.1. Coeficiente de Atenuación Total	6
1.3. Fuente Radiactiva de ^{22}Na	7
1.4. Detector de Centelleo	9
2. GEANT4	11
2.1. Geometría y Materiales	11
2.1.1. Geometría	11
2.1.2. Materiales	12
2.1.3. Fuente	13
3. Resultados	15
3.1. Simulación	15
3.1.1. Espectro de Retrodispersión.	17
3.1.2. Número de interacciones.	19
3.2. Resultados	21
4. Conclusiones	27

Índice de cuadros

1.1.	Coefficientes de absorción Fotoeléctrico para rayos E_γ de 511 keV, número atómico y densidad para el Polipropileno, Hierro y el Plomo. [3]	2
1.2.	Rango de energías para las diferentes combinaciones de θ_1 y θ_2 entre 90° y 180° .	6
1.3.	Composición química arena.	8
1.4.	Composición química suelo franco.	8
1.5.	Coefficientes de absorción Fotoeléctrica (μ_f), Compton (μ_C) y Total (μ) para E_γ de 511 keV. [3]	9
1.6.	Coefficientes de absorción Fotoeléctrica, Compton, Pares y Total para detectores de Ge y CsI para E_γ de 511 keV. [3]	10
3.1.	Materiales de los elementos en la simulación.	15
3.2.	Valores para el coeficiente de atenuación total, densidad y camino libre medio en arena y suelo franco. [3]	18

Índice de figuras

1.	Esquema dispositivo Cámara Compton.	I
1.1.	Sección eficaz de absorción fotoeléctrica para el C_2H_4 , Fe y Pb. [3]	2
1.2.	Colisión entre un fotón y un electrón en reposo.	3
1.3.	Sección eficaz diferencial angular de Klein-Nishina.	4
1.4.	Dispersiones Compton Simples y Múltiples.	4
1.5.	Ángulos de dispersión θ_1 y θ_2 para un fotón que realiza dos dispersiones Compton.	5
1.6.	Energía del rayo γ que realiza dos dispersiones Compton (E''_γ) en función del ángulo de dispersión para un rayo γ incidente de 511 keV.	5
1.7.	Coeficiente másico de atenuación por dispersión Compton y efecto fotoeléctrico en (a) arena y (b) suelo franco para rayos γ entre [1-511] keV. [3]	7
1.8.	Esquema de decaimiento del ^{22}Na	9
1.9.	Aniquilación positrón-electrón.	9
1.10.	Coeficientes de absorción γ para detectores de Ge y CsI. [3]	10
3.1.	Esquema del arreglo experimental simulado.	16
3.2.	Blindaje de plomo.	16
3.3.	Dimensiones utilizadas; d , distancia muestra-objeto y h , distancia muestra-detector de retrodispersión.	17
3.4.	Representación del ángulo mínimo θ_{min} y $\theta_{máx}$ de retrodispersión para los rayos γ que realizan Compton simple y pueden ser registrados por el DR, según la geometría simulada.	18
3.5.	(a) Espectro de retrodispersión total para mina en Fe inmersa en suelo franco, (b) espectro retrodispersiones Compton simples, (c) espectro retrodispersión Compton múltiple.	19
3.6.	Número de dispersiones que sufren los fotones antes de ser registrado en el DR.	20
3.7.	Contribución de dispersiones Compton simples y múltiples al espectro de retrodispersión de objeto de Fe inmerso en suelo franco a una profundidad de 2 cm y el DR a una altura de 2 cm.	20
3.8.	Espectro de retrodispersión para objeto de Polipropileno inmerso en a) arena y b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d) válidas para las dos columnas.	21

3.9. Espectro de retrodispersión para objeto de Hierro inmerso en: (a) arena y (b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d).	22
3.10. Espectro de retrodispersión para objeto de Plomo inmerso en: (a) arena y (b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d)	23
3.11. Número de retrodispersiones Compton simples en a) Arena y b) Suelo franco para los tres materiales del objeto.	24
3.12. Número de retrodispersiones Compton múltiples en a) Arena y b) Suelo franco para los tres materiales del objeto.	24
3.13. Número de interacciones que realiza el fotón antes de ser registrado por el detector de retrodispersión cuando el objeto de Fe se encuentra a 2 cm de profundidad y el DR a 2 cm de altura en a) arena y b) suelo franco.	25

Introducción

La retrodispersión de rayos γ es usada en el funcionamiento del dispositivo denominado *Cámara Compton*. Ésta se encuentra constituida por una fuente de ^{22}Na rodeada de un blindaje cónico de plomo y dos detectores de CsI, uno de posición y el otro de retrodispersión [1].

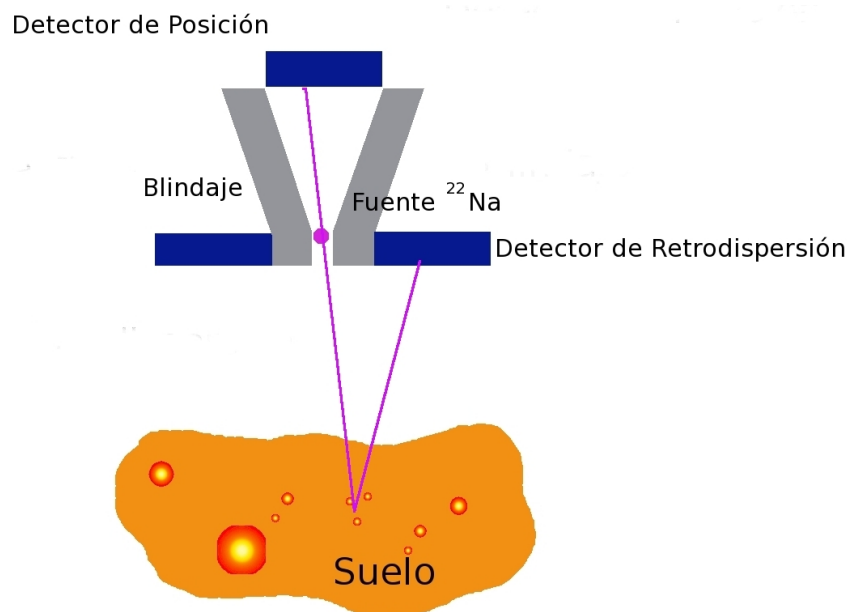


Figura 1: Esquema dispositivo Cámara Compton.

Tras decaer el ^{22}Na , uno de los dos rayos γ de 511 keV se dirige directamente hacia el detector de posición y el otro interactúa con el suelo y puede ser retrodispersado una o más veces. Dicha radiación es recolectada mediante coincidencias temporales por el detector de posición, el cual muestra un mapa bidimensional relacionado con la imagen del blanco u objeto a analizar.

Dichas coincidencias temporales hacen referencia al hecho de que la diferencia entre los tiempos que toman cada uno de los fotones, tanto el que viaja directamente al detector de posición como el que interactúa con la muestra y es dispersado una o más veces, debe ser pequeño. Para ello el dispositivo *Cámara Compton* cuenta con una ventana de tiempo variable entre [40-400] ns, rango de tiempo en el cual es considerada la coincidencia temporal de los fotones.

La calidad de la imagen depende del número de eventos coincidentes de retrodispersión acumulada en el tiempo de medición y según trabajos anteriores la construcción de la misma se debe a los fotones contabilizados por el detector y que realizan una sola dispersión Compton.

Para verificar dicha hipótesis se podría trabajar analíticamente a partir de la fórmula de Klein-Nishina, con la cual podemos obtener información sobre la probabilidad de dispersión de un solo fotón que viaja con una energía E_γ y posteriormente sea dispersado por un electrón, lo cual no brinda una solución satisfactoria, ya que son muchos los fotones que se deben considerar y además después de cada colisión se debería realizar nuevamente el cálculo de la probabilidad, por lo cual resulta bastante complicado.

En cuanto a la parte experimental, en [2] se realizó una calibración en energía del detector de retrodispersión de la Cámara Compton para distintos valores de ganancia, lo cual permitió filtrar los fotones que realizaban múltiples dispersiones y que formaban el ruido de cada una de las imágenes, pero no es posible obtener un filtrado de las dispersiones Compton simples para así demostrar que éstas son las que verdaderamente contribuyen a la formación de la imagen.

En éste trabajo se simuló con Geant4 una versión mínima de la Cámara Compton con el ánimo de realizar un análisis espectral de las dispersiones Compton en suelo. El montaje simulado incluyó un detector de retrodispersión, una fuente emisora de rayos γ de 511 keV y dos muestras (suelo franco y arena), en cuyo interior se ubicaron objetos de Polipropileno (C_2H_4), Fe y Pb.

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos

1.1. Rayos γ

Entre los fenómenos físicos que se manifiestan en la interacción de los fotones con la materia con mayor probabilidad se encuentran, el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares, los cuales dependen de la energía del fotón.

- *Efecto Fotoeléctrico*: Para energías menores a 100 keV.
- *Dispersión Compton*: Energías entre 100 - 1022 keV.
- *Producción de pares*: Energías superiores a 1022 keV.

1.1.1. Efecto Fotoeléctrico.

En este proceso se presenta la absorción del fotón incidente por parte del electrón ligado al material sobre el cual se hace incidir la radiación. La energía del fotón debe ser mayor que la energía de ligadura del electrón, por lo cual al producirse la desexcitación del átomo, el electrón es expulsado con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente (E_γ) y la energía de ligadura del electrón (E_b).

La energía del fotoelectrón es:

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1.1)$$

La probabilidad de presentarse una absorción fotoeléctrica se expresa en términos de la *sección eficaz fotoeléctrica* σ_f , cuyas unidades son área y mediante la aproximación de Born, asumiendo $h\nu \ll m_e c^2$, está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_f = 4\alpha^4 \sqrt{2} Z^5 \phi_0 (m_e c^2 / h\nu)^{7/2} \quad (1.2)$$

con $\phi_0 = 8\pi r_e^2 / 3$, $\alpha = 1/137$.

La Figura 1.1 muestra el coeficiente de absorción fotoeléctrico para Polipropileno, Hierro y Plomo como función de la energía, el cual aumenta a medida que la energía disminuye para los tres materiales. Se observa un aumento considerable en el coeficiente de absorción para el Pb, el cual presenta una diferencia de un orden de magnitud con respecto al Fe y de cinco ordenes con respecto al polipropileno, debido a la fuerte dependencia de

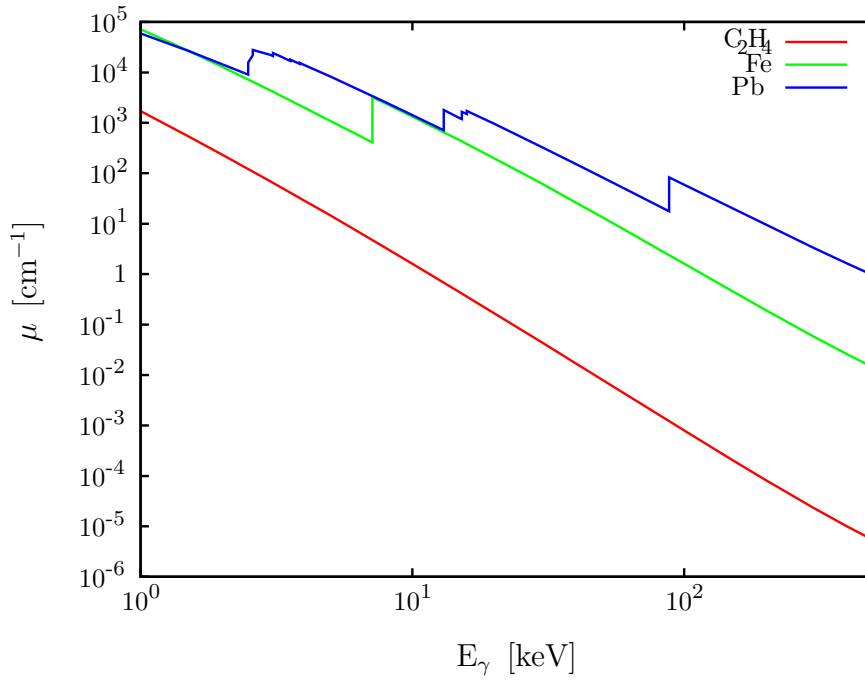


Figura 1.1: Sección eficaz de absorción fotoeléctrica para el C_2H_4 , Fe y Pb. [3]

Material	Z	μ [cm^{-1}]	Densidad [g/cm^3]
C_2H_4	8	4.97×10^{-6}	0.9
Fe	26	1.31×10^{-2}	7.9
Pb	82	8.89×10^{-1}	11.35

Cuadro 1.1: Coeficientes de absorción Fotoeléctrico para rayos E_γ de 511 keV, número atómico y densidad para el Polipropileno, Hierro y el Plomo. [3]

la sección eficaz para el efecto fotoeléctrico con el número atómico del material sobre el cual incide la radiación (Ver ecuación 1.2).

1.1.2. Dispersión Compton.

La dispersión de fotones por electrones libres o débilmente ligados, se presenta cuando la energía del fotón incidente, la cual es mucho mayor que la energía de ligadura de los electrones en el material, no es transmitida completamente al electrón, generando así una dispersión tanto del fotón como del electrón con menor energía y frecuencia.

Según la Figura 1.2, E_γ y E'_γ corresponden a las energías del fotón antes y después de la colisión con el electrón respectivamente, E_e es la energía del electrón (diferencia entre la energía del rayo antes y después del choque) y utilizando las leyes de conservación de la energía y de momentum se obtiene:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \epsilon(1 - \cos \theta)}, \quad (1.3)$$

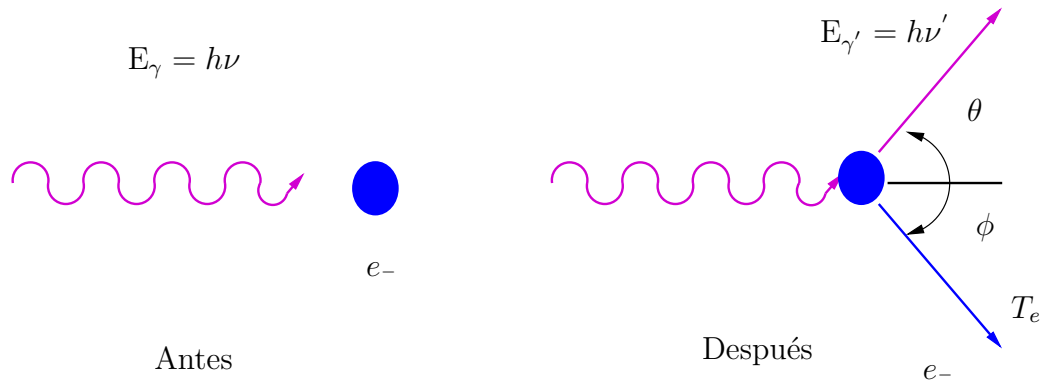


Figura 1.2: Colisión entre un fotón y un electrón en reposo.

$$E_e = E_\gamma \frac{\epsilon(1 - \cos \theta)}{1 + \epsilon(1 - \cos \theta)}, \quad (1.4)$$

donde ϵ es la energía del rayo γ incidente en unidades de la masa del electrón, $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$.

Al hablar de un rayo γ que es *retrodispersado*, nos referimos a un fotón cuyo ángulo de dispersión θ tiene valores entre 90° y 180° , presentándose una transferencia máxima de energía al electrón cuando θ es 180° .

1.1.3. Probabilidad de Dispersión Compton

La probabilidad de dispersión Compton de un fotón incidente con energía E_γ debida a un electrón libre a un ángulo sólido $d\Omega$, se obtiene a partir de la fórmula de Klein-Nishina:

$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \epsilon(1 - \cos \theta)]^2} \left(1 + \cos^2 \theta + \frac{\epsilon^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \epsilon(1 - \cos \theta)} \right), \quad (1.5)$$

donde r_e es el radio clásico del electrón.

La Figura 1.3 muestra la representación polar de la fórmula de Klein-Nishina para diferentes energías del fotón incidente, donde el centro de la gráfica representa el punto de colisión, p_γ representa el momento lineal del rayo γ , la flecha indica la dirección de incidencia del fotón, θ es el ángulo entre la dirección de movimiento del fotón incidente y dispersado.

Si E_γ corresponde a 1000 keV, se logra una mayor penetración del rayo γ en la muestra pero se presenta también una disminución en la probabilidad de retrodispersión. En el caso de E_γ igual a 100 keV, existe una menor penetración y un aumento considerable en la probabilidad de que dicho rayo sea retrodispersado. En un caso intermedio, un rayo γ de 511 keV presenta una dirección preferencial de dispersión hacia adelante (penetración), pero también aumenta su probabilidad de ser retrodispersado, por esta razón es utilizada esa energía para obtener información sobre el objeto que se encuentre enterrado en suelo.

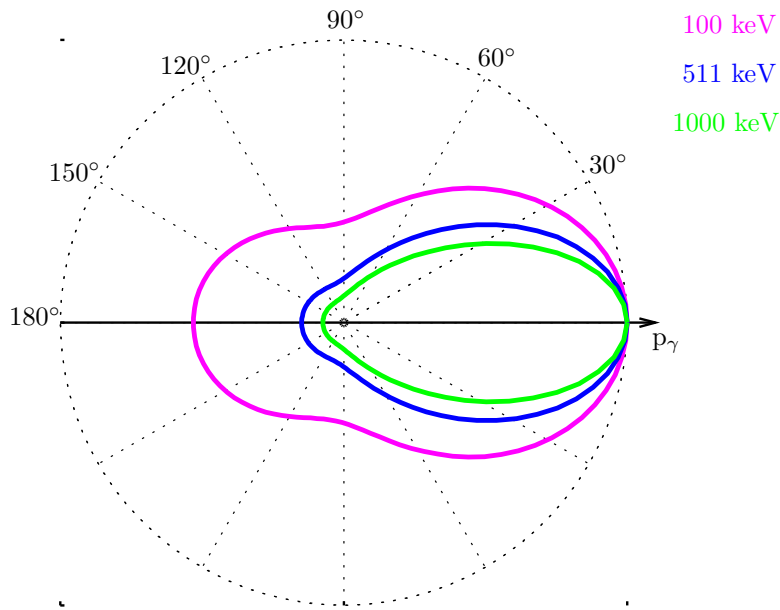


Figura 1.3: Sección eficaz diferencial angular de Klein-Nishina.

1.1.4. Compton simple y múltiple.

Se hace referencia a *Compton simple* cuando el rayo γ realiza solamente una interacción Compton con el material. La máxima energía que es transferida al electrón por parte del fotón es conocida como *Borde Compton* (ecuación 1.4), el cual se obtiene calculando la diferencia entre la energía incidente y la energía de retrodispersión, que es la energía mínima del fotón después de la dispersión (ecuación 1.3). Después de que el fotón ha realizado una dispersión Compton es probable que interactúe nuevamente con otro electrón dos o más veces, a lo que denominamos *Compton múltiple*. Figura 1.4

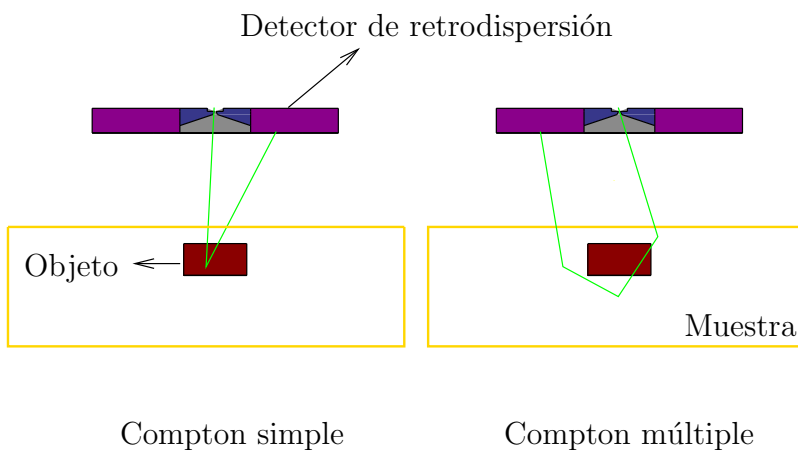


Figura 1.4: Dispersiones Compton Simples y Múltiples.

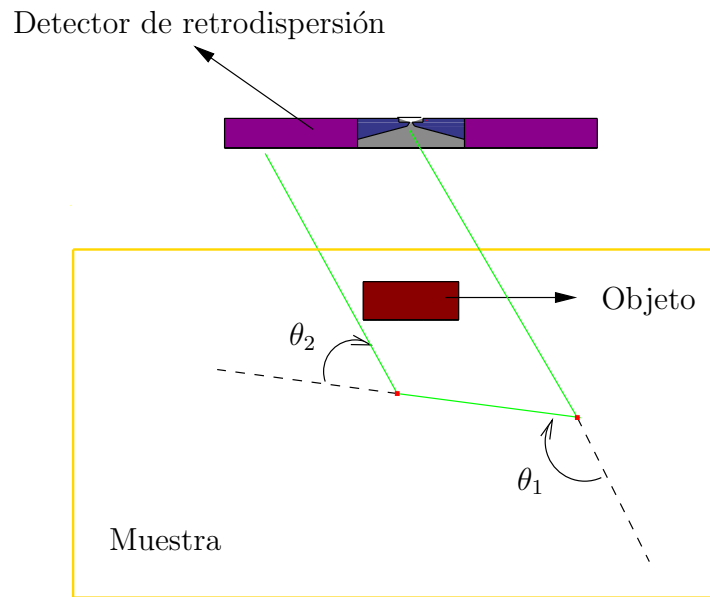


Figura 1.5: Ángulos de dispersión θ_1 y θ_2 para un fotón que realiza dos dispersiones Compton.

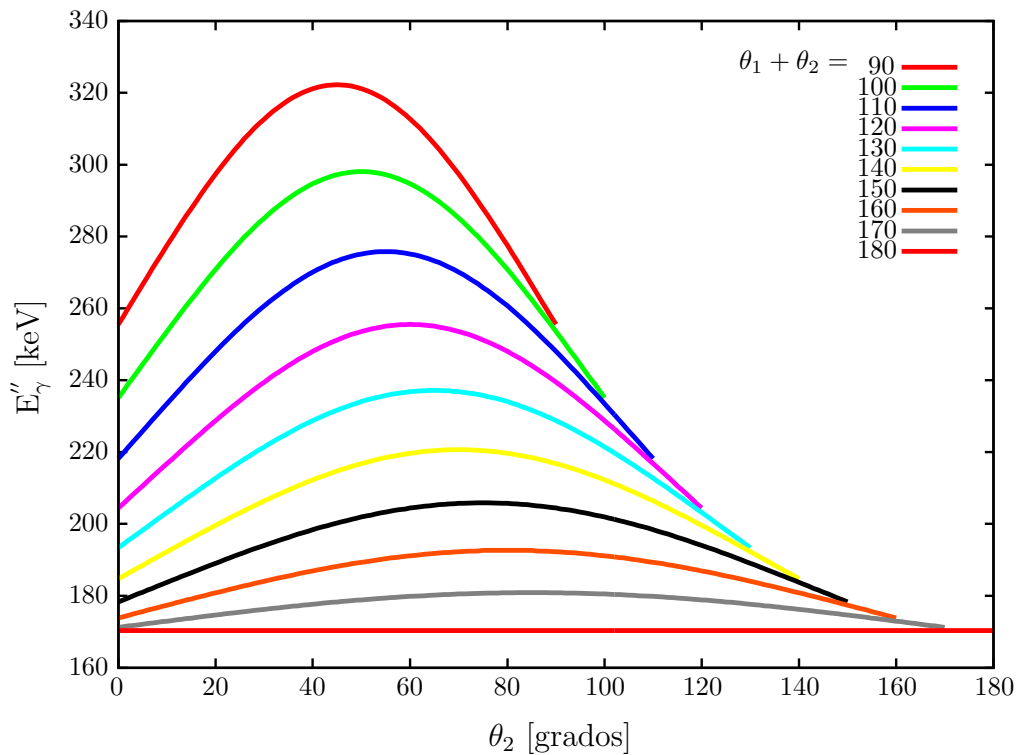


Figura 1.6: Energía del rayo γ que realiza dos dispersiones Compton (E''_{γ}) en función del ángulo de dispersión para un rayo γ incidente de 511 keV.

Si un fotón al interactuar con la muestra es dispersado a un ángulo θ_1 , cuyo valor se encuentra entre $90^{\circ} \leq \theta_1 \leq 180^{\circ}$ y luego realiza una segunda dispersión con $90^{\circ} \leq \theta_2 \leq 180^{\circ}$

$\theta_1 + \theta_2$	Energías [keV]
90	256-322
100	235-298
110	218-276
120	204-255
130	193-237
140	185-220
150	178-206
160	174-193
170	171-181
180	170

Cuadro 1.2: Rango de energías para las diferentes combinaciones de θ_1 y θ_2 entre 90° y 180° .

(Ver Figura 1.5), la energía que ha de ser registrada por el detector de retrodispersión es resultado de la suma de las dos energías obtenidas con ángulos θ_1 y θ_2 . La Figura 1.6 muestra los diferentes valores para la energía total de retrodispersión del fotón después de realizar dos dispersiones Compton.

En el Cuadro 1.2 se observa el rango de energías de dispersión posibles cuando un fotón con E_γ de 511 keV realiza dos dispersiones Compton con ángulos θ_1 y θ_2 entre 90° y 180° .

1.1.5. Producción de Pares.

Este tercer mecanismo de absorción de la radiación electromagnética con la materia aparece cuando la energía de los fotones incidentes alcanza el doble de la energía en reposo de los electrones, es decir, $2m_0c^2 = 1022$ keV, la cual interactúa con el campo eléctrico generado por el núcleo produciendo un par electrón-positrón tras la desaparición del fotón, donde para cumplir con la conservación del momentum los nuevos rayos γ que se generan salen disparados en direcciones opuestas.

La sección eficaz para la creación de pares es proporcional al cuadrado del número atómico Z del material y al logaritmo natural de la energía [4].

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \ln E \quad (1.6)$$

1.2. Estudio Teórico de la Retrodispersión γ - Suelo

1.2.1. Coeficiente de Atenuación Total

Para determinar la cantidad total de fotones retrodispersados es necesario tener presente la probabilidad de dispersión Compton (μ_C) y la atenuación del haz γ ($\mu_C + \mu_f$), donde μ_f corresponde a la probabilidad de dispersión por efecto fotoeléctrico.

La probabilidad total por unidad de longitud de que un fotón interactúe con el material se conoce como *coeficiente de atenuación lineal* y se puede expresar como:

$$\mu = n(\sigma_f + Z\sigma_c + \sigma_{pp}), \quad (1.7)$$

donde $n = N_A\rho/w$ (N_A es el número de avogadro, ρ es la densidad y w es el peso atómico de la muestra) corresponde al número de centros dispersores por unidad de volumen, Z es el número atómico del material y $\sigma_f, \sigma_c, \sigma_{pp}$ son las secciones eficaces para el efecto fotoeléctrico, Compton y producción de pares respectivamente.

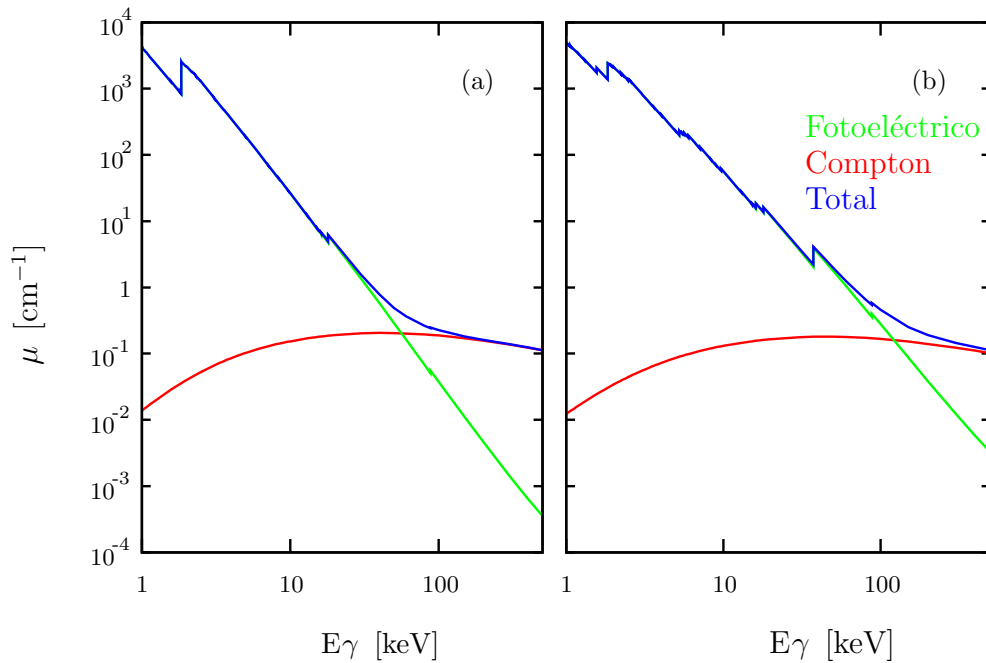


Figura 1.7: Coeficiente másico de atenuación por dispersión Compton y efecto fotoeléctrico en (a) arena y (b) suelo franco para rayos γ entre [1-511] keV. [3]

La composición química de la arena y el suelo franco se encuentra en los Cuadros(1.3-1.4). Dicha composición fue obtenida mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X llevada a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia.

La Figura (1.7) muestra el coeficiente másico de atenuación para arena y suelo franco en función de la energía del rayo γ , el cual alcanza el mismo valor para rayos γ de 511 keV en las dos muestras. Además, cabe resaltar la diferencia de aproximadamente un orden de magnitud (por encima) en la absorción fotoeléctrica para el suelo franco comparada con el de arena (Ver Cuadro 1.5).

1.3. Fuente Radiactiva de ^{22}Na

El ^{22}Na decae emitiendo positrones como se aprecia en la Figura 1.8, los cuales se aniquilan rápidamente (Figura 1.9) con algún electrón presente en el medio dando como

Elemento	Porcentaje(%)
SiO ₂	96.18
Al ₂ O ₃	1.21
TiO ₂	0.23
Fe ₂ O ₃	0.19
CaO	0.05
K ₂ O	0.05
Na ₂ O	0.04
P ₂ O ₅	0.03
Zr	216 ppm
S	37 ppm
Sr	28 ppm
Ni	24 ppm
Zn	15 ppm
Pb	11 ppm
Rb	9 ppm

Cuadro 1.3: Composición química arena.

Elemento	Porcentaje(%)
SiO ₂	60.57
Al ₂ O ₃	12.89
Fe ₂ O ₃	2.40
CaO	1.54
MgO	0.69
TiO ₂	0.57
P ₂ O ₅	0.51
K ₂ O	0.49
Na ₂ O	0.55
MnO	0.04
Ba	476 ppm
S	244 ppm
Zr	191 ppm
Sr	162 ppm
V	118 ppm
Zn	116 ppm
Cr	86 ppm
Pb	44 ppm
Cu	31 ppm
Rb	23 ppm
Ni	20 ppm

Cuadro 1.4: Composición química suelo franco.

Muestra	μ_f [cm^{-1}]	μ_C [cm^{-1}]	Total [cm^{-1}]
Arena	3.36×10^{-4}	1.11×10^{-1}	1.112×10^{-1}
Suelo franco	2.84×10^{-3}	1.003×10^{-1}	1.03×10^{-1}

Cuadro 1.5: Coeficientes de absorción Fotoeléctrica (μ_f), Compton (μ_C) y Total (μ) para E_γ de 511 keV. [3]

resultado dos rayos γ de 511 keV que viajan en direcciones opuestas y un tercer rayo γ con energía de 1275 keV.

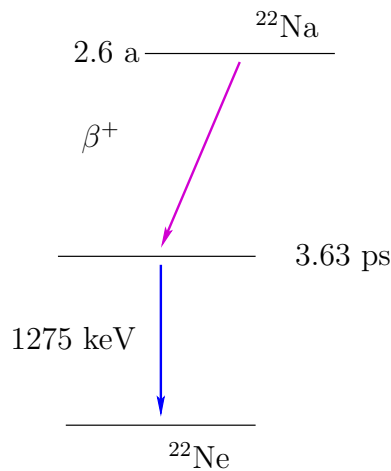


Figura 1.8: Esquema de decaimiento del ^{22}Na .

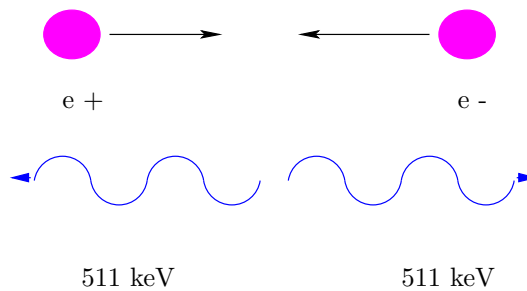


Figura 1.9: Aniquilación positrón-electrón.

1.4. Detector de Centelleo

El detector de centelleo se basa en la emisión de luz como resultado de la desexcitación de los átomos, los cuales son excitados por el paso de la radiación γ a través del detector. Esta luz es recogida y transformada en un pulso eléctrico.

Estos detectores presentan una alta eficiencia debido a que están hechos de materiales con alto número atómico, Z , lo que aumenta su sección eficaz de interacción para rayos γ . En segundo lugar, el proceso de absorción de la radiación y la posterior emisión de la misma, es muy rápido, disminuyendo el tiempo mínimo que debe separar a dos sucesos consecutivos si se desea que ambos sean registrados separadamente. Las secciones eficaces fotoeléctrica y de pares, dependen fuertemente del número atómico del material, proporcional a Z^5 (ecuación 1.2) y Z^2 (ecuación 1.6) respectivamente, mientras para la dispersión Compton su sección eficaz varía linealmente con Z (ecuación 1.7).

Si se desea construir un detector de rayos γ eficiente, es necesario que el material posea coeficientes de absorción fotoeléctrico y de pares mayores que el de absorción Compton. La Figura 1.10 ilustra la diferencia entre los tres coeficientes de absorción para rayos γ en un detector de Ge (detector de estado sólido) y en uno de CsI (detector centellador). Se aprecia una sección Compton similar para los dos materiales, pero con respecto a la sección eficaz fotoeléctrica se encuentra aproximadamente un orden de magnitud más en el CsI, la probabilidad de que el fotón sea absorbido es más grande a que éste sea dispersado (Ver Cuadro 1.6).

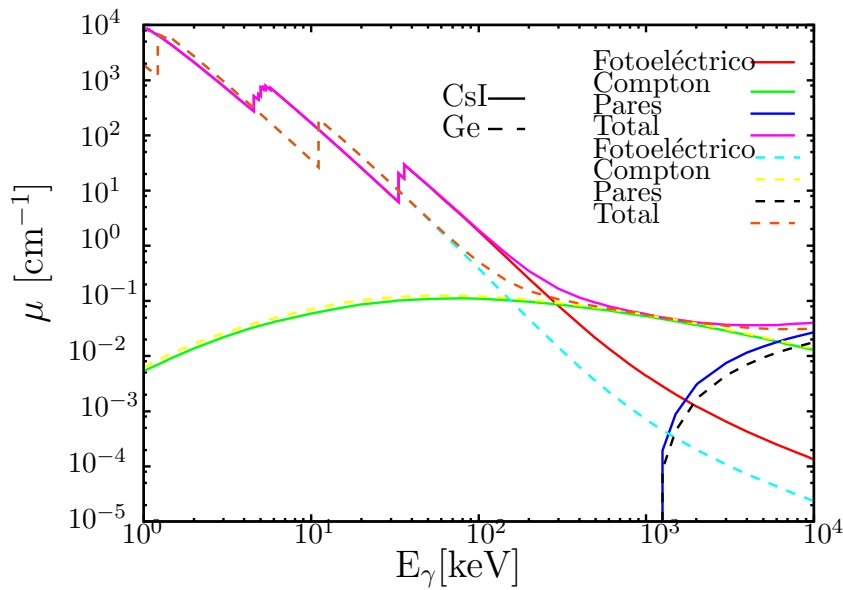


Figura 1.10: Coeficientes de absorción γ para detectores de Ge y CsI. [3]

Detector	Z	Fotoeléctrico [cm^2/g]	Compton [cm^2/g]
Ge	32	3.35×10^{-3}	7.55×10^{-2}
CsI	54	2.004×10^{-2}	7.078×10^{-2}

Cuadro 1.6: Coeficientes de absorción Fotoeléctrica, Compton, Pares y Total para detectores de Ge y CsI para E_γ de 511 keV. [3]

Capítulo 2

GEANT4

Geant4 es un software desarrollado en el CERN para la simulación de la interacción de la radiación y la materia en un amplio rango de energías, permitiendo simular el proceso completo de la realización de un experimento donde se incluye la definición de la geometría, materiales, partículas, trayectorias, entre otras.

Para desarrollar una simulación en Geant4 se debe hacer uso de un programa principal *Main* y tres clases: *DetectorConstruction*, *PhysicsList* y *PrimaryGeneratorAction*.

- *Main*: Incluye clases y líneas de comando que permiten ejecutar la simulación.
- *DetectorConstruction*: Permite definir la geometría: forma, tamaños, materiales y regiones sensibles.
- *PhysicsList*: Involucra procesos físicos tenidos en cuenta en la simulación.
- *PrimaryGeneratorAction*: Incluye los procesos físicos a ser considerados y permite la descripción de la fuente y el haz de radiación.

2.1. Geometría y Materiales

2.1.1. Geometría

El concepto de “*volumen*” es básico para la construcción de una geometría determinada en Geant4. Dicha geometría está constituida por otros volúmenes los cuales se encuentran definidos por su forma tamaño, geometría, material y posición. Cada volumen se encuentra en el interior de un volumen más grande, el cual es conocido como *volumen world*.

En el caso de la construcción de un detector se deben implementar 3 métodos: un sólido, un volumen físico y un volumen lógico.

- *Sólido*: Definición de la forma geométrica y el tamaño.
- *Volumen lógico*: Definición del material y regiones sensibles.
- *Volumen físico*: Definición de la posición, traslación y rotación.

A continuación se muestra la implementación de estos métodos y sus respectivos parámetros de entrada para la construcción del volumen *caja*, el cual consiste en un cubo de dimensiones (40 cm x 40 cm x 40 cm) y que se encuentra lleno de arena (la definición de compuestos como el SiO₂(arena), se explicará en la siguiente sección).

```
G4double x = 20.0*cm;    // se ingresa la mitad de la longitud deseada
G4double y = 20.0*cm;
G4double z = 20.0*cm;
```

Definición del sólido (Box)

```
G4Box* solidCaja = new G4Box("caja" //nombre,x,y,z //dimensiones);
```

Definición del volumen lógico

```
G4LogicalVolume* logicCaja = new G4LogicalVolume(solidCaja, //sólido
                                                    SiO2,      //material
                                                    "caja"     //nombre)
```

Definición del volumen físico

```
G4PhysicalVolume* physCaja = new G4Placement(0           //no rotacion
                                              G4ThreeVector(), //traslacion
                                              logicCaja     //volumen logico
                                              "caja"        //nombre
                                              logicWorld,    //volumen madre
                                              false,         //no operacion
                                                          //booleana
                                              0;            //copia numero)
```

2.1.2. Materiales

En cuanto a la definición de materiales en Geant4, es necesario tener en cuenta variables tales como: número atómico Z , masa atómica, densidad y porción porcentual. Para dicha definición se hace uso de las siguientes clases:

- *G4Element*: Describe las propiedades de los elementos e isótopos: número atómico efectivo, masa atómica, etc.
- *G4Material*: Describe propiedades macroscópicas de la materia: densidad, estado, temperatura, presión, etc.

La forma de definir elementos en Geant4 es la siguiente:

```
G4Element* O  = new G4Element("Oxygen", "O", z=8., a=16.00*g/mole);
G4Element* Si = new G4Element("Silicon", "Si", z=14., a=28.09*g/mole);
```

Después de definir los elementos requeridos se procede a definir los compuestos, por ejemplo para el caso de la arena SiO₂:


```
SiO2 = new G4Material("IodureSilicon", density= 2.32*g/cm3,ncomponentes=2);
```

A continuación se muestra la construcción de la muestra (Suelo franco) utilizada en la simulación de este trabajo, según la composición química del cuadro 1.4:

```
G4Material*FarmSoil = new G4Material("FarmSoil", rho_dry ,21);

FarmSoil->AddMaterial( "SILICON_DIOXIDE",      60.65*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "ALUMINUM_OXIDE",      12.89*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "FERRIC_OXIDE",        2.40*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "CALCIUM_OXIDE",       1.54*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "MAGNESIUM_OXIDE",     0.69*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "TITANIUM_DIOXIDE",    0.57*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "POTASSIUM_OXIDE",     0.49*perCent);
FarmSoil->AddMaterial( "SODIUM_MONOXIDE",     0.55*perCent);
FarmSoil->AddMaterial("PHOSPHORUS_PENTOXIDE", 0.51*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Ba"),6.22*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("S"), 3.19*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Zr"), 2.5*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Sr"),2.11*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("V"), 1.54*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Zn"), 1.5*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Cr"),1.12*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Pb"),0.57*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Cu"), 0.4*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Rb"), 0.3*perCent);
FarmSoil->AddElement(->FindOrBuildElement("Ni"),0.26*perCent);
FarmSoil->AddMaterial(MANGANESE_OXIDE, 0.04*perCent);
G4Material*MANGANESE_OXIDE = new G4Material("MANGANESE_OXIDE",5.37*g/cm3,2);
MANGANESE_OXIDE->AddElement(->FindOrBuildElement("O"), 1);
MANGANESE_OXIDE->AddElement(->FindOrBuildElement("Mn"), 1);
```

2.1.3. Fuente

Para disponer de rayos γ de 511 keV, se utilizó la clase *PrimaryGeneratorAction* la cual permite especificar el espectro de energía, la posición y distribución angular de las partículas de interés.

```
G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();
G4ParticleDefinition* particle = particleTable -> FindParticle("gamma");
particleGun -> SetParticleDefinition ( particle );

particleGun -> SetParticleEnergy( 0.511*MeV )
particleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.*cm,0.*cm,0.*cm));
```


Capítulo 3

Resultados

La Figura 3.1 muestra la versión mínima de la Cámara Compton simulada, que consiste en un detector de retrodispersión de CsI, una fuente de rayos γ de 511 keV, dos muestras (arena y suelo franco) y tres objetos de diferente material (C_2H_4 , Fe y Pb). La fuente se ubicó en el centro del detector de retrodispersión (DR), y ahí mismo se dispuso de un blindaje de plomo el cual posee forma de cono con una abertura de 64° (Figura 3.2) para evitar que los fotones sean detectados directamente por el DR sin haber interactuado con la muestra. Dichos fotones viajan hacia la muestra y en ella pueden ser retrodispersados realizando una o más dispersiones Compton para finalmente llegar al detector de retrodispersión. El Cuadro 3.1 y la Figura 3.3 muestran los diferentes materiales utilizados en la simulación y sus respectivas dimensiones.

Objeto	Material
Detector de retrodispersión	Disco de CsI
Muestra	Arena , Suelo Franco
Ambiente	Aire
Blindaje	Plomo
Objeto	Polipropileno (C_2H_4), Fe, Pb

Cuadro 3.1: Materiales de los elementos en la simulación.

3.1. Simulación

La simulación permite obtener información con respecto a la interacción del fotón con la muestra y el objeto, tal como:

- Espectro de la energía depositada en el detector de retrodispersión.
- Espectro de retrodispersión de dispersiones Compton simples y múltiples.
- Número total de dispersiones de cada evento.

El procedimiento llevado a cabo con la simulación fue el de ubicar en cuatro posiciones (d (cm) = 0, 2, 5, 10) objetos de diferentes materiales (C_2H_4 , Fe y Pb) al interior de las

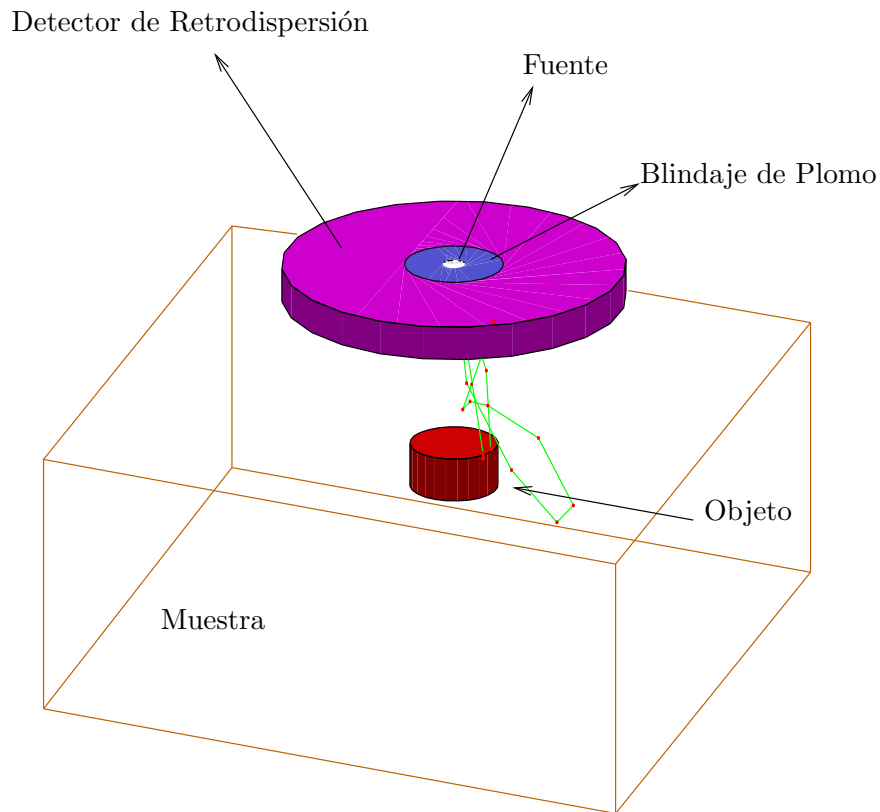


Figura 3.1: Esquema del arreglo experimental simulado.

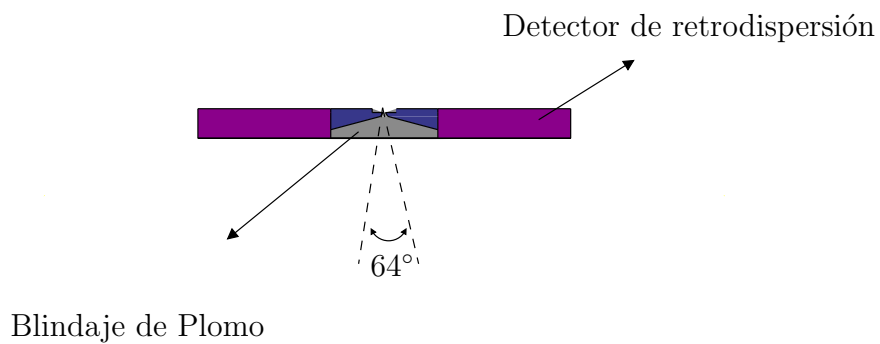


Figura 3.2: Blindaje de plomo.

muestras (arena y suelo franco). De igual manera se ubicó el detector de retrodispersión en cuatro posiciones diferentes (h (cm) = 0.1, 2, 5, 10) (Ver Figura 3.3) con respecto a la superficie de la muestra, con el fin de obtener los respectivos espectros de retrodispersión, los cuales fueron obtenidos con 10^6 fotones cada uno.

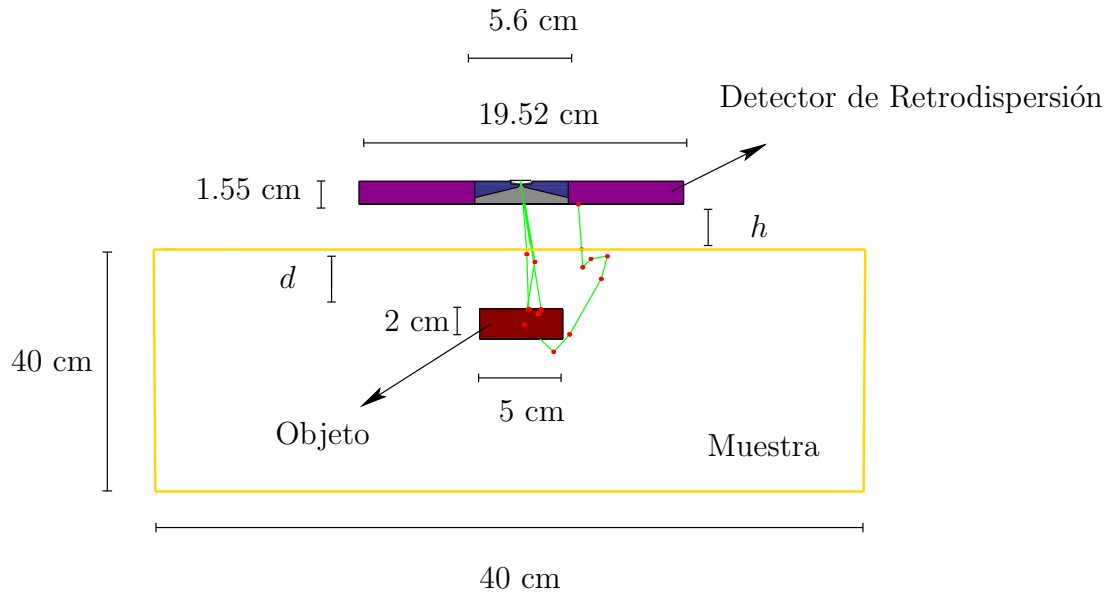


Figura 3.3: Dimensiones utilizadas; d , distancia muestra-objeto y h , distancia muestra-detector de retrodispersión.

3.1.1. Espectro de Retrodispersión.

Según cálculos trigonométricos basados en la geometría simulada se determina que los fotones que después de interactuar una vez con la muestra y posteriormente sean registrados por el DR sean aquellos retrodispersados entre un ángulo mínimo y máximo, θ_{min} y θ_{max} , de $110^\circ \leq \theta \leq 175^\circ$ aproximadamente para arena y $120^\circ \leq \theta \leq 170^\circ$ para suelo franco, es decir, energías entre 171-218 keV para dispersiones en arena y entre 171-200 keV para dispersiones en suelo franco.

La Figura 3.4 muestra los parámetros considerados para la determinación del ángulo mínimo y ángulo máximo de dispersión θ_{min} y θ_{max} (ángulo mínimo y ángulo máximo al cual puede ser retrodispersado el fotón después de una interacción para que incida en el DR y sea registrado) como lo son, el camino libre medio (distancia promedio que recorre el fotón en la muestra antes que interactúe con algún electrón del medio), la densidad de la muestra y su respectivo coeficiente total de atenuación (ver Cuadro 3.2).

La Figura 3.5(a) muestra el espectro de retrodispersión obtenido para un objeto de Fe inmerso en suelo franco a una profundidad de 2 cm y con el DR a una altura de 2 cm sobre la superficie de la muestra. La suma de los espectros (b) y (c), los cuales corresponden a los valores de energía depositada en el DR por parte de las dispersiones Compton simples y múltiples respectivamente, dan como resultado el espectro (a).

La Figura 3.5(b) muestra el espectro de la energía de retrodispersión de aquellos fotones que realizaron una interacción Compton en el suelo, es decir Compton simple. De acuerdo con los cálculos previos sobre las energías esperadas, 171-200 keV suponiendo que el fotón recorre una distancia en la muestra equivalente al camino libre medio, λ , y que posteriormente se dirija al DR, se puede apreciar dicha región en el espectro en la

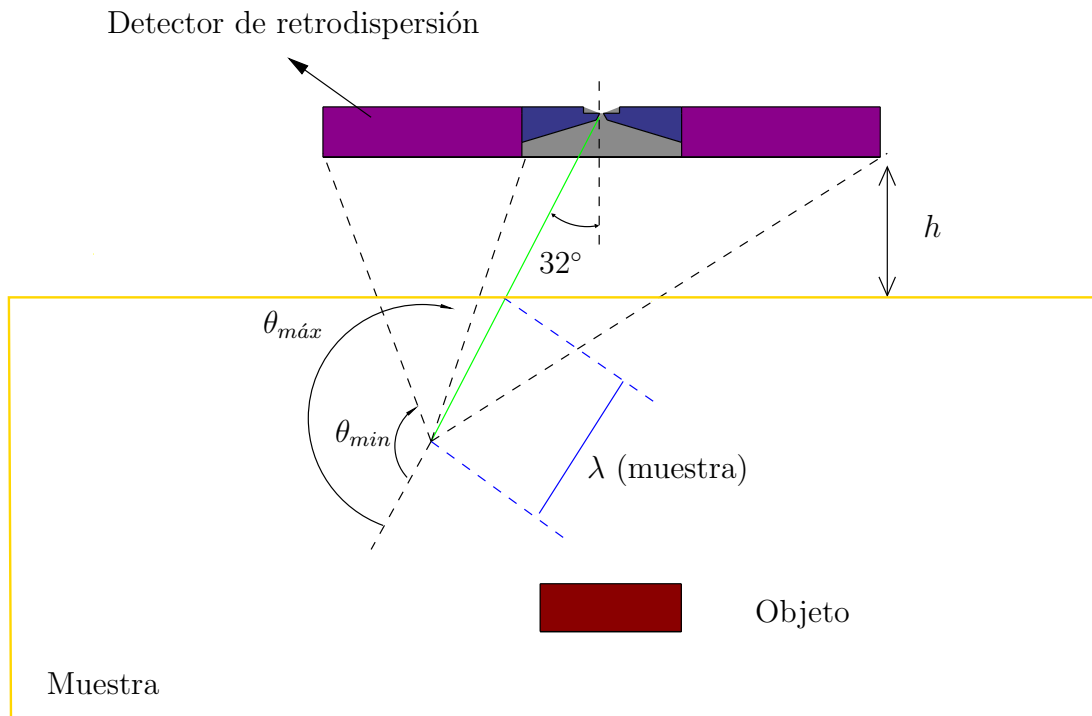


Figura 3.4: Representación del ángulo mínimo θ_{min} y θ_{max} de retrodispersión para los rayos γ que realizan Compton simple y pueden ser registrados por el DR, según la geometría simulada.

Muestra	Coefficiente Atenuación Total [cm^2/g]	Densidad [g/cm^3]	λ [cm]
Arena	8.6×10^{-2}	1.3	8.9
Suelo Franco	8.6×10^{-2}	1.2	9.7

Cuadro 3.2: Valores para el coeficiente de atenuación total, densidad y camino libre medio en arena y suelo franco. [3]

que se presenta el máximo en intensidad. Existen energías fuera de este rango debido a, fotones que recorren distancias diferentes a λ antes de ser dispersados con energías finales cercanas al rango considerado, a la resolución del detector generando un ensanchamiento en el espectro y a efectos Compton en el detector $E'_\gamma \leq 100$ keV aproximadamente.

La Figura 3.5(c) muestra el espectro de la energía de retrodispersión de los fotones que realizaron múltiples dispersiones Compton, entre 0-350 keV aproximadamente. Teniendo en cuenta el efecto que produce la resolución del detector en el espectro y según la Figura 1.6, se asume que las energías entre 175-240 keV se deben a aquellos fotones que realizaron dos dispersiones Compton con $120^\circ \leq \theta_1 + \theta_2 \leq 170^\circ$, y para energías menores a 175 keV, los fotones que realizaron más de dos dispersiones Compton.

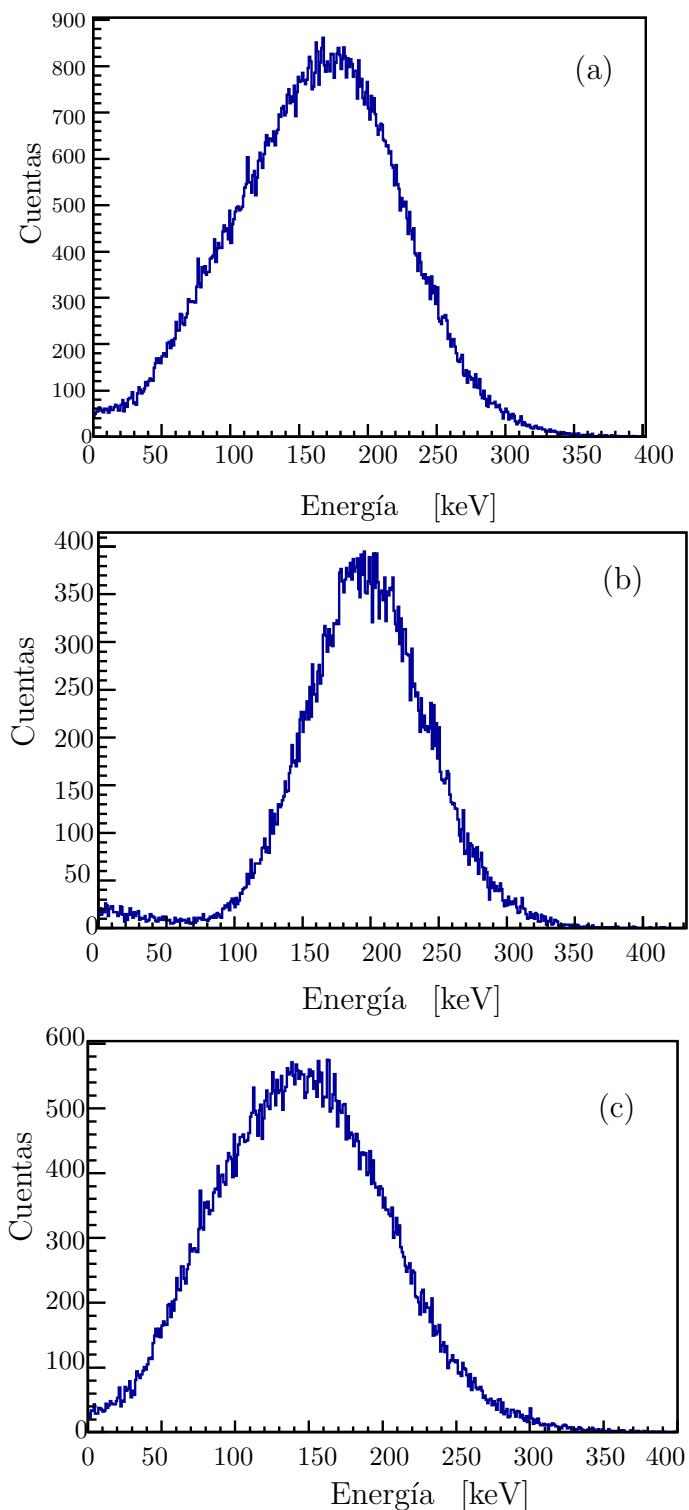


Figura 3.5: (a) Espectro de retrodispersión total para mina en Fe inmersa en suelo franco, (b) espectro retrodispersiones Compton simples, (c) espectro retrodispersión Compton múltiple.

3.1.2. Número de interacciones.

En la Figura 3.6 se observa que para el objeto de Fe inmerso en suelo franco a una profundidad de 2 cm y el DR a una altura de 2 cm, los fotones realizan hasta 7 dispersiones

antes de llegar al detector de retrodispersión. La Figura 3.7 muestra la contribución de cada una de las 11 dispersiones Compton en el espectro de retrodispersión total, y se observa una mayor contribución de los fotones que realizan de una a tres dispersiones en la región de energías correspondientes a Compton simple (171-200 keV) (Ver Figura 3.5(b)) y de cuatro dispersiones en adelante contribuyen a la región de Compton múltiple (0-171 keV).

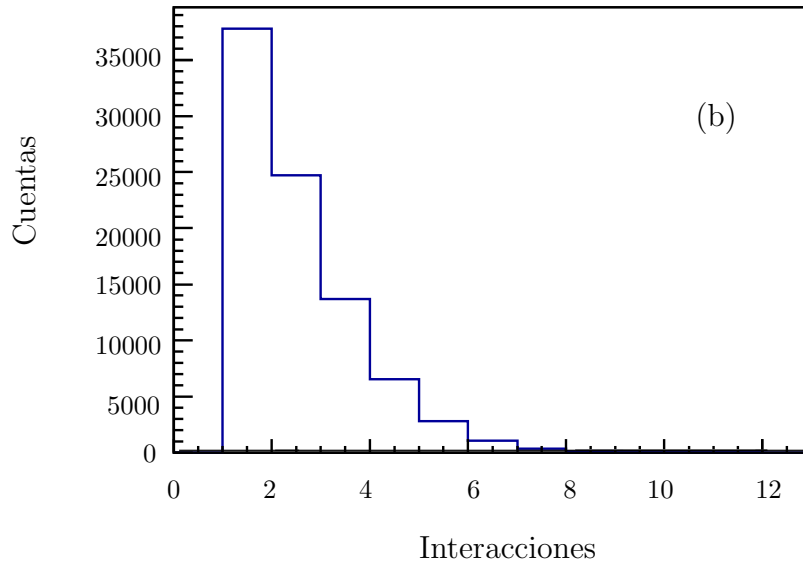


Figura 3.6: Número de dispersiones que sufren los fotones antes de ser registrado en el DR.

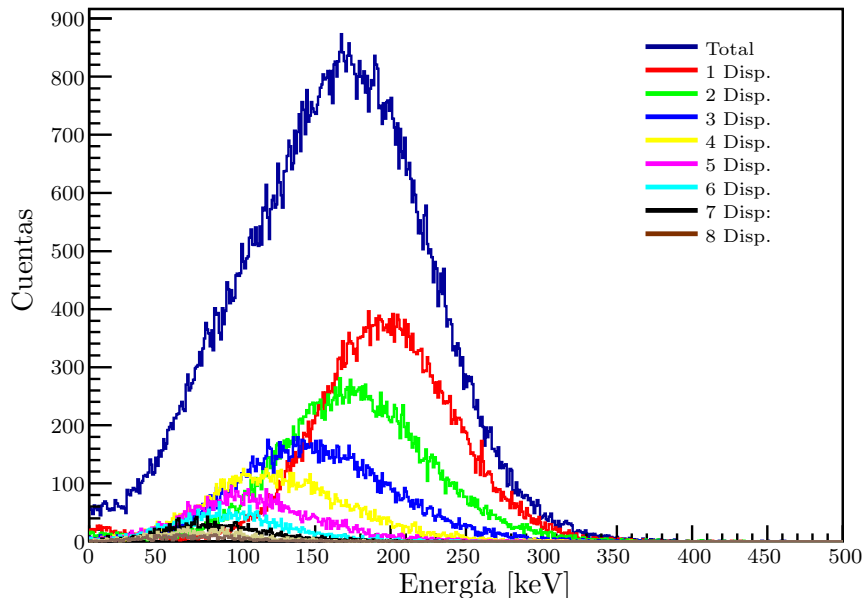


Figura 3.7: Contribución de dispersiones Compton simples y múltiples al espectro de retrodispersión de objeto de Fe inmerso en suelo franco a una profundidad de 2 cm y el DR a una altura de 2 cm.

3.2. Resultados

A continuación en las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10, se muestran cada uno de los espectros de retrodispersión obtenidos para los tres materiales (C_2H_4 , Fe y Pb). Dichas gráficas contienen de dos columnas, la primera a) hace referencia a los espectros de retrodispersión obtenidos en arena y la segunda b) con los espectros en suelo franco. Cada columna contiene 4 filas donde cada una de ellas contiene información respecto a la posición del detector de retrodispersión (h) y del objeto (d), es decir, h y d son válidos para las dos columnas. También se incluye el espectro de retrodispersión proporcionado por la muestra (sin objeto), para hacer la comparación respectiva. En ellos se muestra el número de fotones retrodispersados en función de la energía depositada en el (DR).

Polipropileno

La Figura 3.8 muestra que en cada una de las posiciones del detector de retrodispersión no existe una diferencia notoria con respecto al espectro de retrodispersión obtenido con y sin objeto. Se obtiene el mismo número de cuentas por energía para las 4 profundidades del objeto debido a su densidad $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$ (Ver Cuadro 1.1), por lo que es un material no absorbedor de la radiación γ incidente.

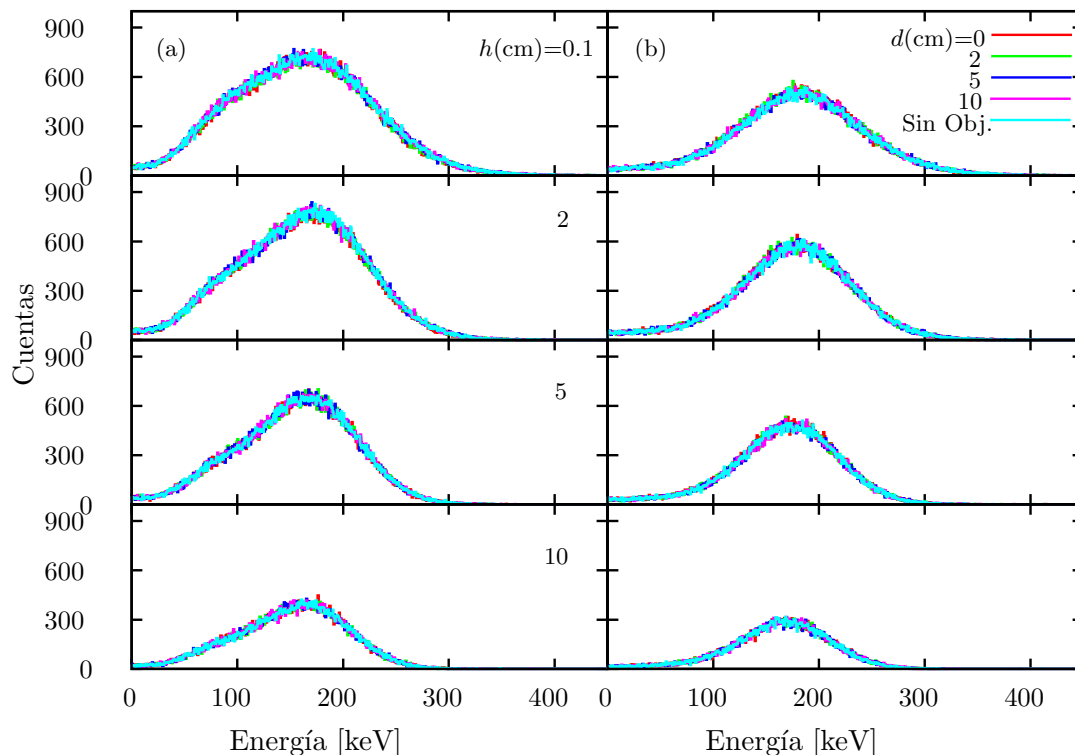


Figura 3.8: Espectro de retrodispersión para objeto de Polipropileno inmerso en a) arena y b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d) válidas para las dos columnas.

Hierro

En la Figura 3.9 encontramos que a medida que el DR se aleja de la superficie de la muestra, disminuye el número de cuentas registradas por el detector de retrodispersión, perdiéndose información del objeto de Fe, tanto en arena como en suelo franco.

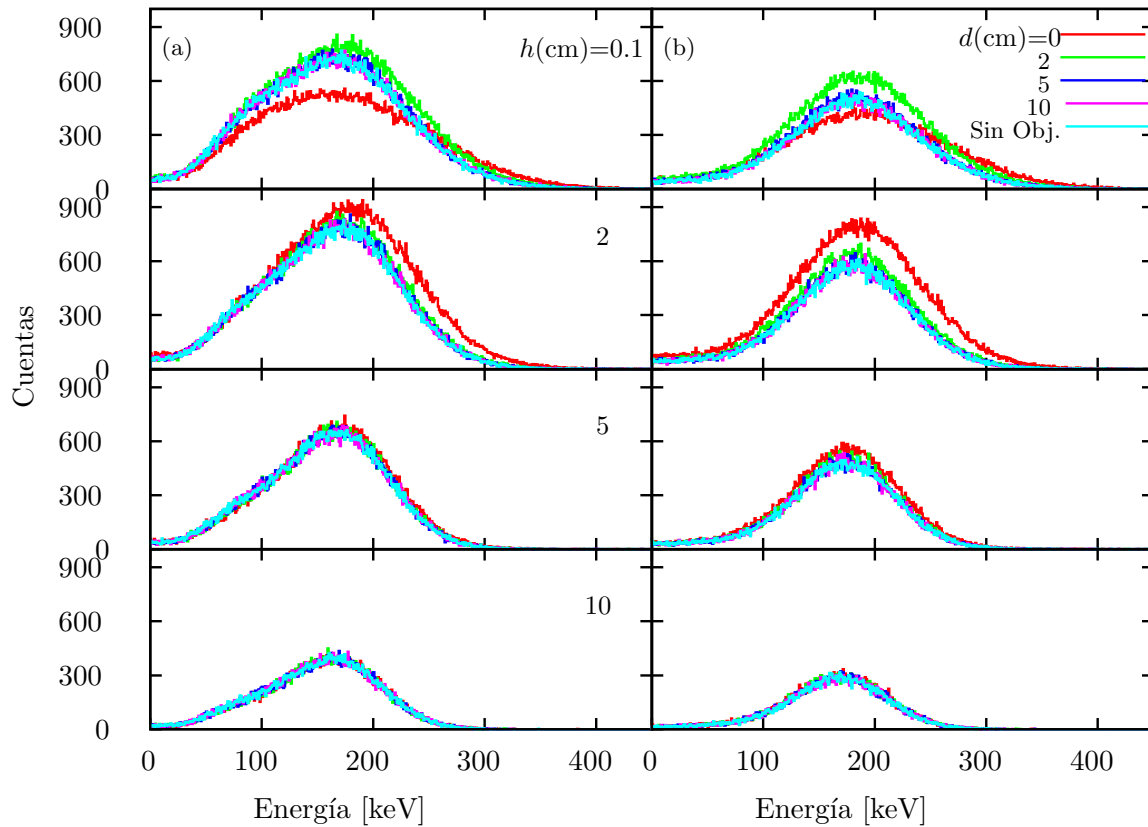


Figura 3.9: Espectro de retrodispersión para objeto de Hierro inmerso en: (a) arena y (b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d).

Plomo

Para el caso del Plomo (Figura 3.10) encontramos un gran contraste cuando el objeto se encuentra muy cerca a la superficie de la muestra (0 y 2 cm) y cuando el DR se encuentra a 0.1 cm de altura, en comparación a los casos del polipropileno y el hierro debido a las diferencias en densidad ρ (0.9, 7.9 y 11.35 [g/cm³]) respectivamente.

La Figura 3.11(a) muestra el número de fotones retrodispersados en arena mediante Compton simple como función de la profundidad d y la densidad electrónica ρ del objeto. Podemos ver que a medida que d aumenta, también se incrementa el número de fotones retrodispersados. Para el plomo se presenta un aumento considerable entre 0-5 cm, para el hierro entre 0-2 cm, pero en el caso del C₂H₄ dicho número se mantiene prácticamente

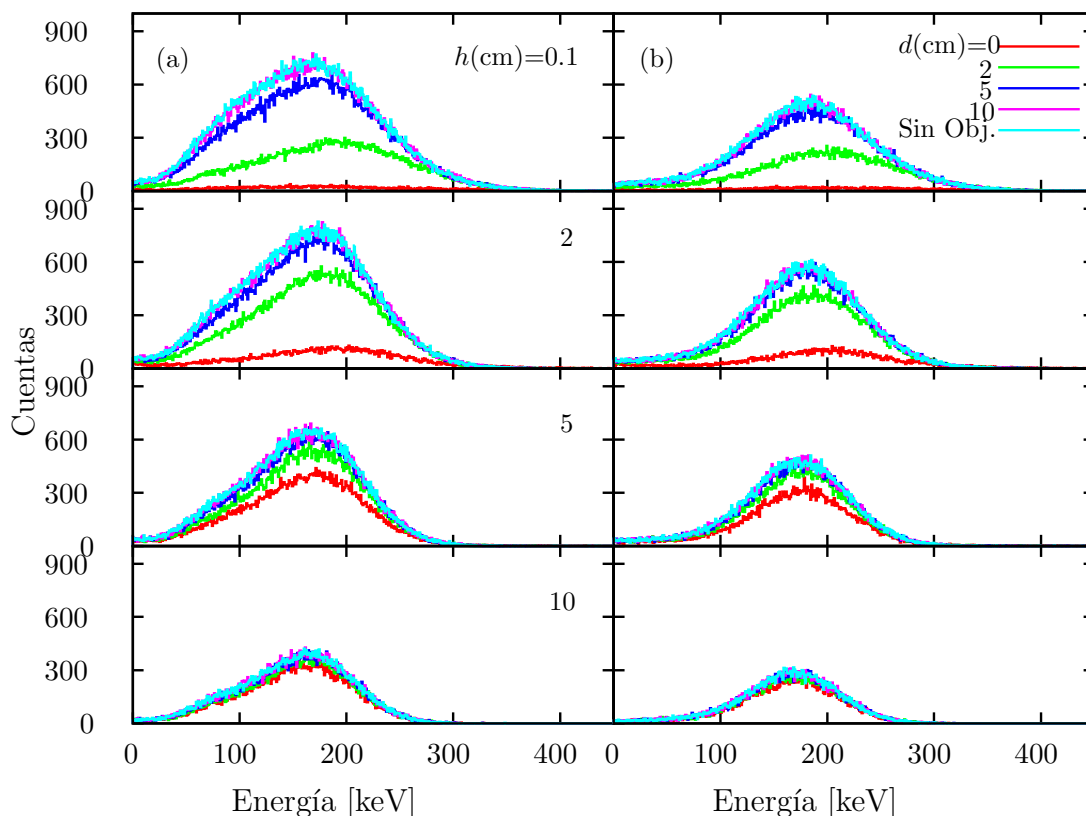


Figura 3.10: Espectro de retrodispersión para objeto de Plomo inmerso en: (a) arena y (b) suelo franco con la respectiva variación de la posición del DR (h) y posición del objeto (d).

constante, alcanzando el mismo valor para los tres materiales a una profundidad de 10 cm.

La Figura 3.11(b) muestra el número de fotones retrodispersados por Compton simple en suelo franco, donde se aprecia un aumento en el número de cuentas (aproximadamente 5×10^3), pero en general el mismo comportamiento que en arena para los tres materiales del objeto.

La Figura 3.12(a) se aprecia un incremento considerable del número de fotones retrodispersados en arena para las tres densidades electrónicas como función de d , a diferencia del suelo franco, en donde disminuyen en 4×10^3 cuentas aproximadamente para Fe y C_2H_4 comparadas con la arena debido a su coeficiente de absorción fotoeléctrico (suelo franco = $2.84 \times 10^{-3} [cm^{-1}]$; arena = $3.36 \times 10^{-4} [cm^{-1}]$).

Se observa en las Figuras 3.11 y 3.12 que no se presenta un cambio notorio en el número de fotones retrodispersados cuando el objeto de plomo se encuentra a ras de la muestra ($d = 0$ cm), ya que su coeficiente de absorción fotoeléctrico es mayor con respecto a los otros materiales ($C_2H_4 = 4.97 \times 10^{-6}$, Fe = 1.31×10^{-2} y Pb = $8.89 \times 10^{-1} [cm^{-1}]$).

La Figura 3.13 muestra de manera más clara el número fotones retrodispersados que realizan una, dos y más interacciones en a) arena y b) suelo franco cuando el objeto de

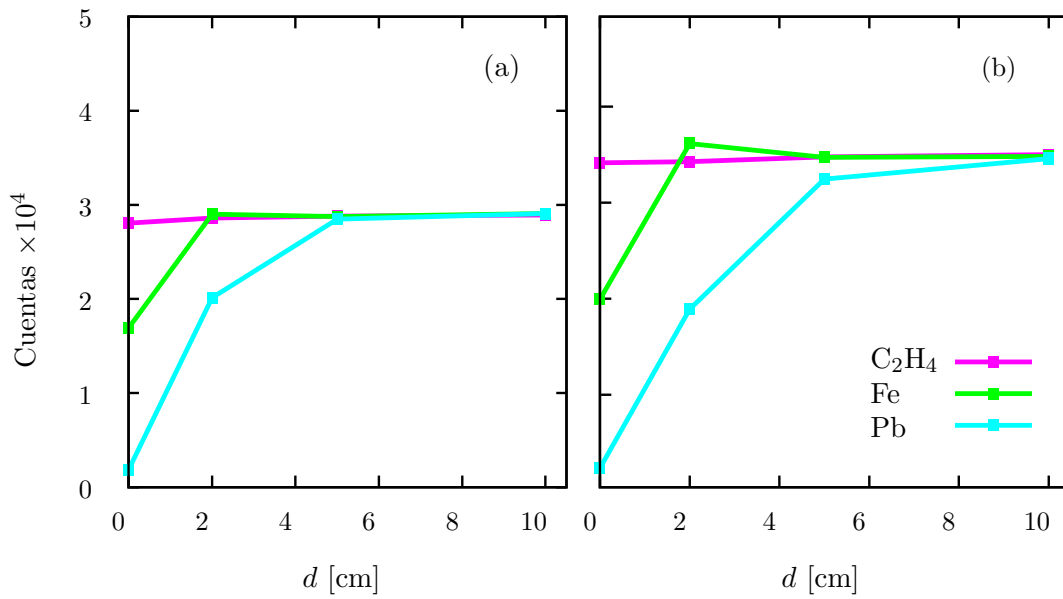


Figura 3.11: Número de retrodispersiones Compton simples en a) Arena y b) Suelo franco para los tres materiales del objeto.

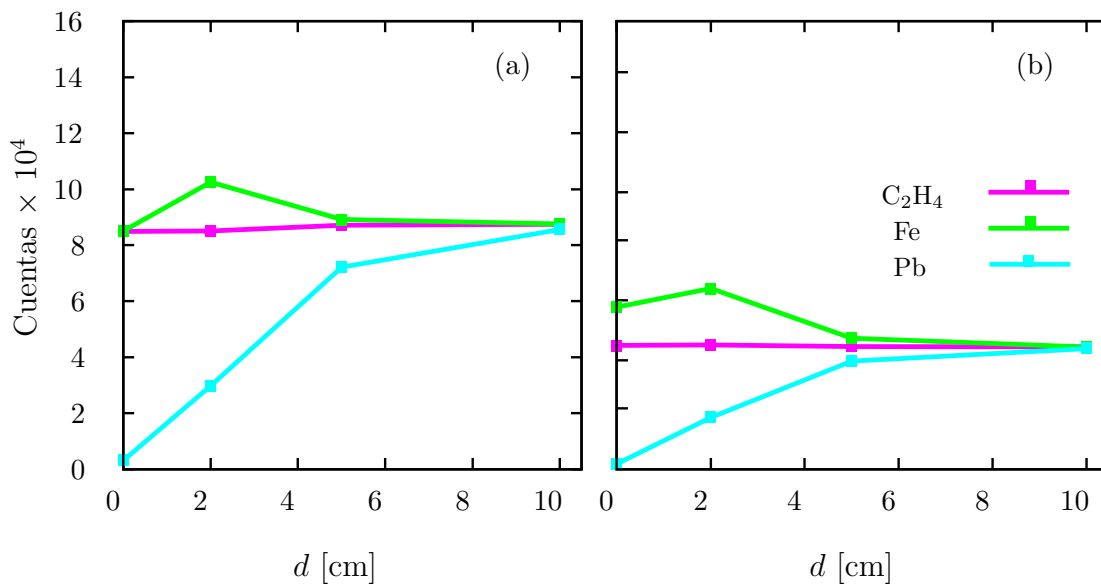


Figura 3.12: Número de retrodispersiones Compton múltiples en a) Arena y b) Suelo franco para los tres materiales del objeto.

Fe se encuentra a 2 cm de profundidad y el DR se encuentra a una altura de 2 cm sobre la superficie de la muestra. Se observa que en a) el número de dispersiones Compton múltiples es mayor que en b), el fotón realiza hasta 11 interacciones a diferencia del caso b), en el que realiza solo 7. También se observa la diferencia en el número de dispersiones simples tanto en arena como en suelo franco.

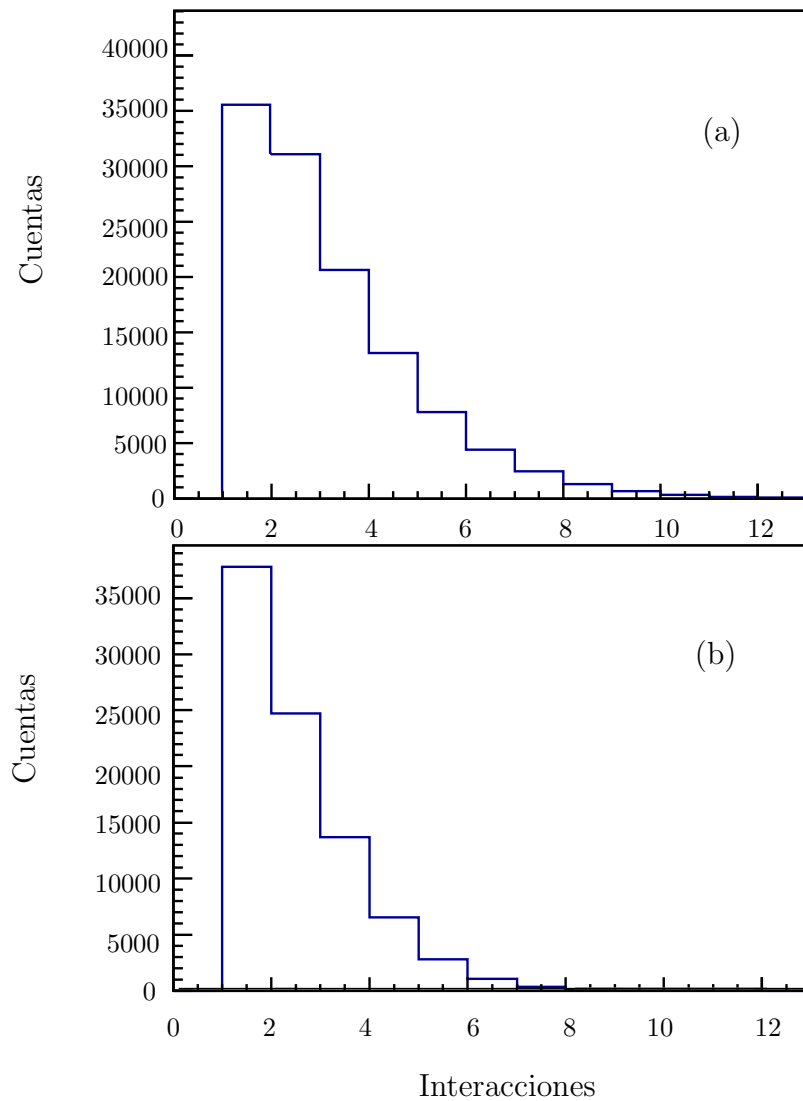


Figura 3.13: Número de interacciones que realiza el fotón antes de ser registrado por el detector de retrodispersión cuando el objeto de Fe se encuentra a 2 cm de profundidad y el DR a 2 cm de altura en a) arena y b) suelo franco.

Capítulo 4

Conclusiones

- Se obtiene mayor contraste del objeto en la medida que su número atómico aumente ($Z > 26$), la profundidad a la cual se encuentre inmerso el objeto sea pequeña (0-5 cm) y que el detector de retrodispersión se encuentre a una altura entre 0.1 cm $\leq h \leq 5$ cm. En el caso de un objeto de bajo Z , como el polipropileno, no se observa contraste significativo.
- El número de fotones retrodispersados mediante Compton múltiple en suelo franco disminuye considerablemente comparado con el correspondiente en arena para las tres densidades del objeto consideradas ($\rho = 0.9, 7.9$ y 11.35 [g/cm³]), debido a la diferencia de sus respectivas probabilidades de dispersión por efecto fotoeléctrico, dicha diferencia corresponde a un orden de magnitud (suelo franco= 2.84×10^{-3} [cm⁻¹]; arena= 3.36×10^{-4} [cm⁻¹]).
- Tanto en arena como en suelo franco, el número de fotones retrodispersados alcanza un valor de saturación a 10 cm. A dicha profundidad no se encuentra diferencia entre el espectro de retrodispersión con o sin objeto en ninguna de las muestras estudiadas, estableciendo un límite en profundidad para la aplicación de la técnica de imagenología por retrodispersión γ .

Bibliografía

- [1] E. Fajardo et al., AIP Conf. Proc. **1265** (2010), 449.
- [2] N. González. *Caracterización de un dispositivo para obtención de imágenes por retrodispersión Compton*. Trabajo de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2010.
- [3] <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
- [4] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. 2da ed. Springer-Verlag, 1994.
- [5] F. Nieto, *Simulación en Geant4 de la interacción γ - suelo*. Trabajo de Grado, 2010.
- [6] L. Tosi y M. Morhell, *Estudio de la interacción de la radiación gamma con la materia: Atenuación y Scattering*. CNEA, Instituto Balseiro.
- [7] M. L. Cortés, F. Cristancho, *Study of gamma backscattering in a multielemental medium*. Trabajo de Grado, 2007.
- [8] M. L. Cortés, F. Cristancho, *Energy and Time Characterization of the response of the soil to γ rays*. Tesis Maestría en Ciencias-Física. 2010.
- [9] Geant4: A simulation toolkit, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>.
- [10] <http://www.seipaz.org/minas.htm>.
- [11] J. Gerl, *Gamma-ray imaging exploiting the Compton effect*. Nuclear Physics A 752,(2005).
- [12] A. Castagnet, H. Di Gregorio, J. Doedderer y A. Vignolo, *Medición de densidad por retrodispersión gamma: Bases para el diseño de equipos aplicables a suelos y otros materiales*. Informe Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, 1965.
- [13] G. Carrillo, *Simulación con GEANT4 de un instrumento para hacer imagenología por retrodispersión gamma*. Monografía, 2006.