



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS**

**LICENCIATURA EN FÍSICA MÉDICA**

***“Utilización de metales recuperados de acería como nuevos materiales de blindaje para Radiaciones Ionizantes”***

Alumna: María del Carmen Menéndez

Directora: Dra. María Agustina Corti

Co-Directora: Dra. María Victoria Gallegos

*Departamento de Física – Facultad de Cs. Exactas – UNLP*

*Mayo-2024*

*A Darío,*

*que, con su amor cambió mi vida entera y a quien elijo día tras día...*

*Gracias por caminar la vida a mi lado y por ser mi sostén en todo momento. Por entenderme, acompañarme, alentarme y alegrarte por mí. Gracias por los silencios y los abrazos justos. Por ser ese hombre que, con paciencia y ternura, está a mi lado en los momentos buenos y en todos los desafíos. Agradezco ese enero en que nos encontramos, y también cada sacrificio y esfuerzo que hiciste para que pueda seguir adelante. Este logro es nuestro, producto de nuestro trabajo en equipo y amor compartido.*

*Te amo*

## AGRADECIMIENTOS

---

A mis directoras, la Dra. María Agustina Corti y la Dra. María Victoria Gallegos, por su compromiso durante todo el proceso de investigación. Su ayuda constante, predisposición y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. También quiero agradecerle a la Dra. Laura Damonte, por todo lo que hizo por mí, por proponerme el equipo de trabajo, asesorarme y facilitarme el uso de las fuentes radiactivas. Fueron muy importantes para mí en toda esta etapa, gracias por los lunes compartidos, las charlas, anécdotas y almuerzos. Gracias por enseñarme a seguir adelante con una sonrisa, cuando las cosas no salen tan bien. Me voy a acordar siempre de la “crema del cielo nublado”.

A mis padres, Jorge y Carmen. Gracias por su amor incondicional y su apoyo constante siempre. Sus sacrificios fueron el motor que me impulsó hasta acá. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la importancia de nunca rendirse. Sé que a veces no fue fácil, pero su paciencia y su amor siempre estuvieron presentes. Gracias por ser mis referentes y por creer en mí incluso cuando dudé de mí misma. Sus ejemplos y palabras de aliento resonaron en cada paso de este proceso, recordándome que las metas se alcanzan con determinación y perseverancia.

A mis hermanos, César y Fernanda, gracias por guiarme y acompañarme en todo lo que pudieron. A pesar de la distancia, siempre estuvieron presentes para apoyarme y aconsejarme cuando los necesité.

A mis compañeros de la facu, por todos los lindos momentos compartidos; especialmente a mis amigos, Marina y Eduardo. Gracias por alentarme siempre, por cada vez que les pregunté algo y por cada “solo por hoy” que me recordaron cuando fue necesario. Su amistad y complicidad hicieron más llevaderos los desafíos académicos y personales. Gracias por absolutamente todo.

A mis amigos de la vida, Yasmin gracias por estar siempre en todas, por escucharme y ayudarme. Gracias por la amistad simple pero fuerte que compartimos. Sos lo mejor que me dejó el CEUL... A Patri, gracias por ser mi mejor animadora y por celebrar cada logro con la misma emoción que yo (o más diría). Tus palabras de aliento y tu entusiasmo fueron un gran impulso para mí en momentos difíciles. Y a Santi, que acompaña en silencio y seguro está esperando su venganza.

A Tati, GRACIAS por todo. Por cada conversación, por cada pedido, por cada nueva tarea. Tenés un corazón enorme, gracias por estar y ayudarnos siempre. Por último, a Guille... Donde sea que estés, gracias por toda la simpleza compartida, cada charla, cada momento, cada planta, cada flor... Sabé que te extrañamos mucho y que estás con nosotros más de lo que te hubieras imaginado. Espero que estés feliz porque lo logré.

## RESUMEN

---

La radiación, una fuerza dual de beneficios y riesgos, integra de manera significativa nuestras vidas en campos como la medicina, la investigación y la industria. Sin embargo, la sobreexposición a la radiación puede tener consecuencias perjudiciales para la salud humana y el entorno. Por lo tanto, la implementación de medidas de protección, como el uso de blindajes específicos, se convierte en una prioridad para minimizar riesgos.

En este contexto, la radioprotección emerge como un conjunto de medidas y prácticas destinadas a prevenir, controlar y reducir los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. Este campo tiene como finalidad garantizar que la aplicación de las radiaciones se realice de manera segura y que los beneficios superen los posibles riesgos para la salud. Los peligros asociados con la manipulación y el uso de fuentes de radiación requieren características especiales de diseño y construcción en las instalaciones, que no son necesarias en los laboratorios de trabajo convencionales.

Existen herramientas fundamentales para reducir la exposición de los seres humanos a la radiación externa proveniente de diversas fuentes. Estas herramientas se basan en tres principios esenciales: distancia, tiempo y blindaje. La implementación de un blindaje adecuado desempeña un papel fundamental en la disminución de la exposición radiológica tanto de los trabajadores de las instituciones como del público en general. Su efectividad se ve influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen el tiempo de exposición a las fuentes de radiación, así como el tipo y la energía asociada a dichas fuentes.

Uno de los materiales tradicionalmente utilizado para el blindaje de radiaciones ionizantes es el plomo (Pb). Su elevada densidad ( $11,4 \text{ g/cm}^3$ ), junto con su capacidad para absorber y atenuar eficientemente la radiación lo convierten en un material fundamental para este propósito. Sin embargo, el Pb presenta desventajas significativas, como su alta toxicidad, débil resistencia mecánica y escasa flexibilidad. Debido a esta problemática, desde hace varios años se ha venido explorando la búsqueda de materiales alternativos, no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente como sustitutos viables de este componente [1].

En las últimas décadas, se ha evidenciado un notable crecimiento en las actividades industriales, lo que ha resultado en la generación masiva y diversificada de residuos industriales, intensificando así los problemas asociados con la contaminación ambiental. El actual modelo de producción refleja una falta de consideración por los ciclos naturales, ocasionando impactos significativos en el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación del aire, agua y suelo.

En este contexto, se propone utilizar residuos derivados de la chatarra generada en la industria metalúrgica durante el proceso de obtención de acero como materiales de partida para la elaboración de absorbentes destinados a radiaciones ionizantes. El desarrollo de absorbentes con diferentes espesores y composiciones se lleva a cabo con el objetivo de obtener materiales de alta densidad, eficientes y de bajo costo. Además, se busca contribuir activamente a la

reducción de la contaminación ambiental mediante la reutilización de residuos industriales en este proceso.

Los residuos seleccionados para la fabricación de absorbentes son ricos en metales pesados (*Zn, Fe, Mn, Pb*), y se clasifican como peligrosos debido a su potencial de lixiviación en suelos y cuerpos de agua. Esta consideración subraya la importancia de encontrar un uso adecuado para estos residuos, constituyendo un enfoque fundamental en la gestión integral de residuos. En este sentido, los subproductos de la industria del acero, que podrían haber sido tratados como desechos, se transforman ahora en componentes esenciales para la creación de absorbentes funcionales, promoviendo así una gestión sostenible de los residuos industriales.

En el marco de este Trabajo de Diploma, el objetivo fue realizar un análisis exhaustivo de las propiedades de blindaje, abordando las diversas aplicaciones de éste que incluyen tanto los blindajes estructurales como aquellos que son utilizados para protección personal. Por otro lado, se determinaron los coeficientes de atenuación de una variedad de materiales, explorando tanto opciones comerciales puras como aquellas fabricadas a partir de residuos. Para llevar a cabo esta evaluación, se empleó espectroscopía gamma simple, aplicando la Ley de Lambert-Beer para el análisis posterior. Esta metodología permite examinar detalladamente el coeficiente de atenuación lineal de los absorbentes recientemente propuestos, considerados como posibles sustitutos del Pb en diversas aplicaciones. Una contribución adicional implica que encontrar una alternativa ambientalmente correcta para reciclar estos materiales contribuye a resolver problemas ambientales, enmarcándose en los Principios de la Química Verde.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>1. Introducción.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>11</b>
2.1. Justificación del tema.....	11
<b>3. Marco teórico .....</b>	<b>13</b>
3.1. Interacción de la radiación con la materia.....	13
3.1.1. Clasificación de las radiaciones ionizantes.....	13
3.1.2. Sección eficaz .....	13
3.2. Interacción de partículas cargadas con la materia.....	15
3.2. Interacción de fotones con la materia .....	16
3.3.1. Procesos de interacción .....	16
3.3.1.1. Efecto Fotoeléctrico .....	16
3.3.1.2. Dispersión Compton.....	18
3.3.1.3. Creación de pares.....	19
3.3.2. Atenuación de un haz de fotones .....	20
3.4. Protección radiológica.....	23
3.5. Reciclado .....	26
<b>4. Metodología .....</b>	<b>27</b>
4.1. Caracterización del polvo de aspiración de horno eléctrico.....	27
4.1.1. Difracción de Rayos X.....	27
4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	28
4.2. Fabricación de absorbentes .....	30
4.2.1. Polvo Puro .....	30
4.2.2. Polvo en matriz cementicia .....	31
4.2.3. Polvo en matriz de silicona.....	32
4.3. Detección de la radiación.....	33
4.3.1. Propiedades generales de los detectores .....	33
4.3.2. Detectores de centelleo .....	36
4.3.2.1. Principios básicos .....	36
4.3.2.2. Detector centellador de INa (TI) .....	38
4.4. Espectroscopia gamma simple.....	39

4.5. Sistema experimental.....	42
4.5.1. Fuentes patrones y sus espectros .....	42
4.5.2. Descripción y desarrollo experimental.....	44
4.5.2.1. Descripción del equipamiento .....	44
<b>5. Resultados y discusión .....</b>	<b>47</b>
5.1. Caracterización del material .....	47
5.1.1. Difracción de Rayos X.....	47
5.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	48
5.1.3. Densidad de cada material absorbente .....	49
5.2. Espectroscopia gamma simple.....	50
5.2.1. Calibración en energía .....	50
5.2.2. Resultados y discusión de Polvo Puro (PHE) .....	51
5.2.3. Resultados y discusión de Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Cemento (PHE-C) .....	52
5.2.4. Resultados y discusión de Polvo Horno de Arco Eléctrico + Silicona (PHE-S) .....	56
5.3. Discusión general .....	63
<b>6. Conclusiones y perspectivas a futuro .....</b>	<b>65</b>
<b>7. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>67</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La radiación es el proceso mediante el cual la energía se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas. Los dos tipos generales más importantes de radiación ionizante emitida durante el proceso de desintegración radiactiva comprenden las partículas cargadas, como las partículas  $\alpha$  y las partículas  $\beta$ , así como la radiación electromagnética (fotones), que incluyen rayos  $\gamma$  y rayos X [2].

En este proceso la radiación transfiere su energía a la materia a medida que la atraviesa. Los mecanismos principales para la transferencia de energía son la ionización y la excitación de átomos y moléculas. Aunque la mayor parte de esta energía finalmente se disipa, el fenómeno de ionización conlleva consecuencias significativas. Por esta razón, las radiaciones emitidas durante la desintegración radiactiva son comúnmente denominadas radiaciones ionizantes, dada su capacidad intrínseca para inducir la formación de iones al interactuar con la materia.

En el ámbito médico, los rayos X se emplean en una amplia gama de aplicaciones, desde la simple obtención de radiografías hasta su utilización en tratamientos contra el cáncer. Sin embargo, la interacción de los fotones con el cuerpo genera la irradiación de tejidos y órganos internos, así como la producción de radiación dispersa, lo que podría representar riesgos considerables para la salud de trabajadores y pacientes, si no se toman las medidas necesarias.

Las consecuencias adversas para la salud surgen de los procesos de ionización que inducen cambios en átomos y moléculas, aunque sólo sea en forma transitoria, pudiendo causar daños a las células. En aquellos casos en que se producen daños celulares y no se reparan adecuadamente, puede ocurrir que las células afectadas mueran, se vea impedida su reproducción, o bien que se origine una célula viable, pero genéticamente modificada. Ambos extremos tienen implicancias profundamente diferentes para el organismo. Si el número de células que murieron es lo suficientemente elevado, se producirá un daño susceptible de ser observado, reflejando una pérdida de funcionalidad del tejido. La probabilidad de que se produzcan tales daños será cero a dosis pequeñas, pero por encima de un determinado nivel de dosis (umbral) aumentará rápidamente hasta la unidad (100%). Por encima del umbral aumentará asimismo la gravedad del daño con la dosis. Este tipo de efectos, se denominan “determinísticos”.

El resultado será muy diferente si en vez de producirse la muerte de la célula irradiada, ésta sobrevive con alteraciones en su genoma. Estos efectos se denominan “estocásticos”, es decir de naturaleza aleatoria o estadística. Si la transformación se produce en una célula cuya función es transmitir información genética (célula germinal en gónadas) el efecto de variado tipo y gravedad se expresará en la descendencia de la persona expuesta. Este tipo de efecto estocástico se denomina “hereditario”. Si en cambio la transformación ocurre en una célula somática podría dar lugar, luego de un largo período de latencia, a la inducción de un cáncer (“carcinogénesis”) [3]. El análisis de los efectos estocásticos proporciona los fundamentos necesarios para establecer los criterios básicos de la protección radiológica [4].

La protección radiológica es una disciplina de vital importancia orientada a promover la protección de las personas contra los riesgos derivados del empleo de las radiaciones ionizantes. Tiene como finalidad proporcionar un nivel adecuado de protección para los individuos, sin limitar indebidamente las prácticas beneficiosas provenientes de la exposición a la radiación, es decir, evitar la aparición de efectos deterministas manteniendo las dosis por debajo de los umbrales aplicables, y al mismo tiempo, garantizar que se tomen las acciones razonables para reducir la probabilidad de inducción de efectos estocásticos. El diseño y la implementación efectiva de barreras de protección, ya sea en instalaciones médicas, laboratorios o entornos industriales, desempeñan un papel crucial en la minimización de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Tradicionalmente, el Pb ha sido el material utilizado para el blindaje de radiaciones ionizantes en diversas aplicaciones, tales como paredes, pinturas y polímeros protectores, etc. Este metal proporciona excelente capacidad de atenuación de rayos X y radiación gamma, debido a que los fotones son absorbidos de manera efectiva por materiales densos y compuestos por átomos pesados [5]. Sin embargo, en el último tiempo ha aumentado la preocupación por el uso del Pb debido a sus características nocivas. El Pb es un elemento altamente tóxico con baja resistencia mecánica y escasa flexibilidad. Consecuentemente, la exposición prolongada a productos basados en Pb puede causar intoxicación, generando serios problemas de salud en los individuos. Por esta razón, los materiales basados en Pb están siendo cada vez menos utilizados [6]. Además, al emplearlos como elementos de protección personal, estos materiales presentan otra desventaja significativa: su peso. En varias oportunidades, esta característica se convierte en un factor determinante a la hora de considerar su uso.

Ante estas problemáticas ambientales y de salud asociadas con el uso tradicional del Pb en el blindaje contra radiaciones ionizantes, durante varios años se han llevado a cabo investigaciones con el objetivo de identificar y desarrollar nuevos materiales. La meta principal de estos estudios es encontrar alternativas no tóxicas y respetuosas con el medio ambiente, con el propósito de sustituir al Pb en aplicaciones de protección radiológica. Estos nuevos materiales están destinados a ser empleados en la fabricación de blindajes para la radiación ionizante, proporcionando una protección eficaz tanto para los trabajadores expuestos como para las personas sometidas a evaluaciones de diagnóstico médico. Este enfoque hacia materiales más seguros y amigables con el entorno no solo responde a la necesidad de preservar la salud humana y el medio ambiente, sino que también refleja un compromiso continuo con la evolución y mejora de las prácticas en el ámbito de la protección radiológica.

Surge así la propuesta de aprovechar los residuos generados por la industria metalúrgica durante el proceso de obtención del acero como materia prima para la producción de absorbentes, representando una oportunidad para transformar subproductos industriales en recursos valiosos.

Este desecho consiste en partículas de aspiración provenientes de Hornos Eléctricos ubicados en el Sur de la Provincia de Santa Fe y Norte de la Provincia de Buenos Aires. La obtención de acero líquido mediante el Horno de Arco Eléctrico resulta en la generación de escoria, material particulado y diversos compuestos. El residuo sólido generado contiene *Pb*,

*Zn, Cd, Ni, Cr*, entre otros [7]. La presencia de los metales implica que el polvo se clasifique como residuo peligroso. La cantidad de partículas generada varía de planta a planta, pero se estima un mínimo de 15 *kg/t* y un máximo de 25 *kg/t*. Internacionalmente el polvo generado en los Hornos de Arco Eléctrico, que se arrojaba a la atmósfera a través de las chimeneas perjudicando el ambiente laboral y su entorno, ahora se recupera en las casas de humo. Una vez recuperados surge el interrogante de qué hacer con ellos [8].

Debido a las notables concentraciones de metales pesados presentes en los materiales de partida, se les atribuye a estos residuos un carácter peligroso debido a su potencial de lixiviación en suelos y cursos de agua, como consecuencia de factores ambientales. Por consiguiente, estudiar la posibilidad de reusar estos materiales no sólo se convierte en una práctica ambientalmente beneficiosa, sino que también representa una solución innovadora en la gestión de residuos industriales de manera sostenible.

## 2. OBJETIVOS

---

El *objetivo general* del presente Trabajo es evaluar la eficiencia de diversos materiales como absorbentes de radiaciones ionizantes y analizar sus propiedades de blindaje, esto es infraestructura y protección personal. Además, se pretende encontrar una alternativa sostenible para reciclar estos residuos, siguiendo los principios de la Química Verde y contribuyendo a resolver problemas ambientales.

### **Objetivos específicos:**

-Investigar una alternativa ambientalmente sostenible para reciclar residuos industriales contribuyendo a la resolución de problemas ambientales.

-Evaluar el coeficiente de atenuación lineal de residuos de la industria metalúrgica mediante espectroscopía gamma simple, utilizando la Ley de Lambert-Beer para análisis cuantitativos.

-Preparar absorbentes basados en residuos industriales soportados en matrices poliméricas y cementicias con diferentes espesores y composiciones.

-Comparar la eficiencia de blindaje de los materiales preparados con los de referencia.

### **2.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

El desarrollo científico y tecnológico en el uso de radiaciones ionizantes con fines médicos, se ha incrementado notablemente en los últimos años. Esta situación trae aparejados múltiples beneficios, pero también riesgos asociados vinculados a la salud de las personas expuestas y el medio ambiente.

Los principios básicos que se aplican para minimizar la dosis por irradiación externa de diferentes fuentes a los seres humanos se basan en las siguientes tres herramientas: distancia, tiempo y blindaje. Es decir que, la dosis de radiación puede reducirse si:

- se aumenta la distancia desde la fuente (“Ley de Inversa del Cuadrado de las Distancias”)
- se disminuye el tiempo de exposición
- se utiliza un blindaje entre la fuente y la zona que se desea proteger

Reducir el tiempo de exposición o aumentar la distancia desde la fuente no siempre es posible teniendo en cuenta que se trata de prácticas médicas como puede ser intervencionismo, por ejemplo. En estas situaciones, además de estrictos hábitos de trabajo, una de las opciones apropiadas para minimizar la dosis por irradiación externa es utilizar blindajes. Esto es, interponer un medio material de características adecuadas entre la fuente de radiación y las

personas a proteger para atenuar la dosis que reciben y de esta manera asegurar la protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto, público y del medio ambiente.

Los blindajes pueden ser localizados o estructurales, y también pueden variar en su composición según el tipo de radiación, la energía de la radiación, la práctica médica y el presupuesto con que cuente el centro de salud. Generalmente, el material utilizado para blindaje de rayos X y radiación gamma es el Pb, elegido por ser un material con elevado número atómico ( $Z = 82$ ) y densidad ( $\rho = 11,4 \text{ g/cm}^3$ ). Las desventajas de este material radican en su toxicidad, ya que provocan graves efectos a largo plazo tanto en la salud humana como en el ambiente. Lo ideal sería obtener materiales de protección contra la radiación alternativos, preferentemente atóxicos, livianos, flexibles y de bajo costo para reemplazar el Pb. Por otro lado, este metal al igual que otros provenientes de residuos de acerías, pilas y baterías, constituyen un problema ambiental en crecimiento.

*En este Trabajo de Diploma, nos proponemos obtener nuevos materiales a partir de estos residuos de la Industria Metalúrgica, analizando la posibilidad de su uso como blindaje de radiaciones ionizantes.*

## 3. MARCO TEÓRICO

---

### 3.1. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

La radiación ionizante se define como la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas ya sea a través del vacío o en un medio material. En función de su capacidad para ionizar la materia, puede clasificarse en dos categorías fundamentales: radiación ionizante y no ionizante. Se denominan radiaciones ionizantes a aquellas que tienen la energía suficiente para producir la ionización de átomos, para lo que se requieren energías superiores a unos  $10 \text{ eV}$ , aproximadamente. Por el contrario, la radiación no ionizante carece de la energía suficiente para romper enlaces atómicos, y por ello, sólo puede provocar movimientos colectivos de los electrones del material sin causar cambios permanentes [9].

#### 3.1.1. Clasificación de las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes tienen la capacidad de ionizar la materia, ya sea mediante interacciones directas o indirectas [2]. En el caso de las radiaciones ionizantes directas, que involucran partículas cargadas como partículas  $\beta$ , protones, partículas  $\alpha$  e iones pesados, la interacción se caracteriza por el depósito de energía en el medio a través de interacciones directas de Coulomb entre partículas cargadas y los electrones orbitales de los átomos en el medio.

Por otro lado, las radiaciones ionizantes indirectas involucran partículas neutras, como los fotones (rayos X y rayos gamma) y neutrones. Este proceso tiene lugar cuando una partícula neutra con una determinada energía colisiona con una partícula cargada y transfiere total o parcialmente su energía a dicha partícula. Posteriormente, esta última puede interactuar con el medio, induciendo la ionización de los átomos presentes [9].

#### 3.1.2. Sección eficaz

La interacción entre dos partículas se describe generalmente en términos de sección eficaz. Esta magnitud da una medida de la probabilidad de que un proceso específico tenga lugar en una colisión de dos partículas [10]. La sección eficaz es expresada en términos del área transversal con la que la partícula incidente debe colisionar para que ocurra el proceso dado y es denotada por  $\sigma$ . Esta medida se expresa comúnmente en  $\text{cm}^2$  o *barn* ( $b$ ), donde  $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ .

Formalmente, puede considerarse un haz de partículas incidente  $I$  sobre un núcleo blanco tal como se representa en la Figura 3.1.

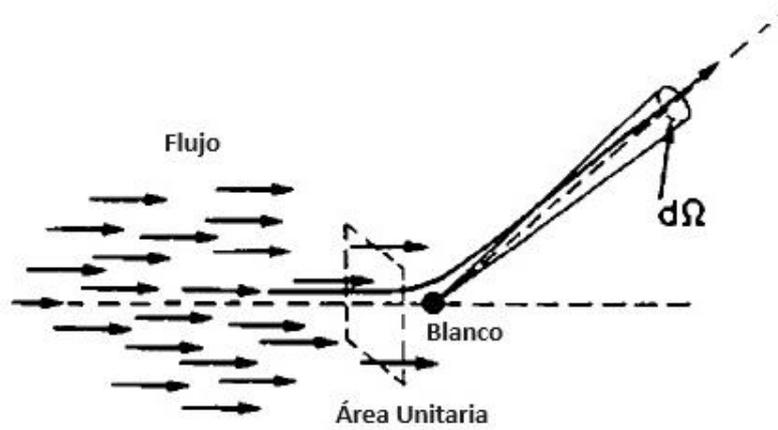


Figura 3.1: Definición de la sección eficaz de dispersión. [10]

Se asume que el haz es significativamente más ancho que el blanco y que sus partículas están distribuidas uniformemente en el espacio y el tiempo, entonces, se puede hablar de un flujo de partículas incidentes  $F$ , por unidad de área y por unidad de tiempo. La variable  $N_s$  representa la cantidad promedio de partículas dispersadas por unidad de tiempo en el ángulo sólido  $d\Omega$ . Por lo tanto, la sección eficaz diferencial está definida por la ecuación 3.1, donde  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  es la fracción promedio de las partículas dispersadas en  $d\Omega$  por unidad de tiempo por unidad de flujo  $F$  [10].

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega} \quad 3.1$$

Es posible calcular una sección eficaz total para cualquier dispersión con una energía  $E$  definida como la integral de  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  sobre todos los ángulos sólidos según [10]:

$$\sigma(E) = \int d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad 3.2$$

En situaciones reales, el objetivo suele ser un bloque de material que contiene muchos centros de dispersión y se desea saber cuántas interacciones ocurren en promedio. Si el blanco tiene un área  $A$ , un espesor  $dx$  y contiene  $n$  átomos por unidad de volumen, hay un total de  $nAdx$  átomos en el blanco. Cada núcleo en el material tiene una sección eficaz  $\sigma$  (asumiendo que hay un único tipo particular de interacción). La sección eficaz de todos los átomos del material será  $\sigma nAdx$ . En consecuencia, el número promedio de dispersiones en  $d\Omega$  por unidad de tiempo es entonces:

$$N_s(\Omega) = FAndx \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad 3.3$$

El número total dispersado en cualquier ángulo es:

$$N_{tot} = FAndx\sigma \quad 3.4$$

### 3.2. INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON LA MATERIA

Cuando las partículas cargadas interactúan con la materia, se produce una serie de efectos, que dependen del tipo de partícula, de su energía, y del medio material con el que sufren la interacción. Cuando se habla de la influencia del tipo de partícula se considera fundamentalmente su carga eléctrica y su masa.

Al penetrar en un medio material, una partícula cargada puede experimentar una serie de colisiones con los átomos presentes en dicho medio. El proceso predominante es la colisión coulombiana, la cual se manifiesta como una interacción determinada por las fuerzas eléctricas producidas entre la partícula incidente y el medio absorbente (electrones y núcleos atómicos). Esta interacción produce una pérdida, casi continua de la energía de la partícula, hasta llegar a su detención.

Los procesos que contribuyen a la pérdida de energía de una partícula cargada en su interacción con medios materiales pueden ser, en términos generales, de tres tipos:

- *Colisión elástica:* La partícula choca con los átomos del medio, desviándose de su trayectoria original y cediendo energía en forma de energía cinética. No se produce alteración atómica ni nuclear en el medio. Se produce calor. Este tipo de colisión resulta en una dispersión.
- *Colisión inelástica:* La partícula interactúa con los electrones atómicos, transfiriendo pequeñas cantidades de energía. La energía transferida puede provocar que el electrón atómico escape de la atracción del núcleo produciendo la ionización del átomo (Figura 3.2) o llevar al electrón atómico a un estado menos ligado, produciéndose una excitación en el átomo [2]. En entornos moleculares, la colisión inelástica puede ocasionar fenómenos de disociación o radiólisis, generando radicales libres con una alta reactividad química.

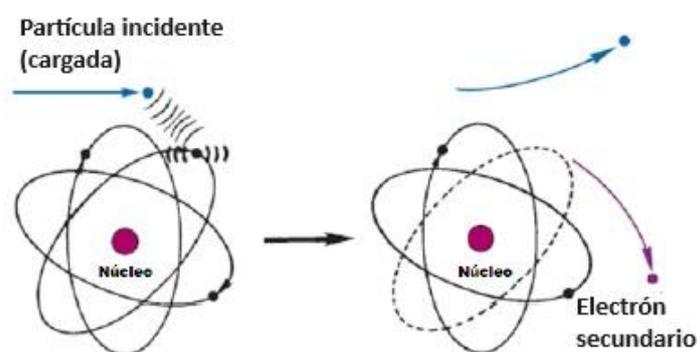


Figura 3.2: Interacción con un electrón orbital que resulta en ionización. [2]

- *Colisión radiactiva:* Un tercer tipo de interacción ocurre cuando la partícula cargada realmente penetra en la nube de electrones orbitales de un átomo e interactúa con su núcleo. No obstante, tanto para partículas cargadas pesadas como para electrones, el escenario más

probable implica que la partícula sea desviada por las intensas fuerzas eléctricas ejercidas por el núcleo (Figura 3.3). Este tipo de colisión resulta en la emisión de ondas electromagnéticas, conocidas como radiación de frenado o Bremsstrahlung.

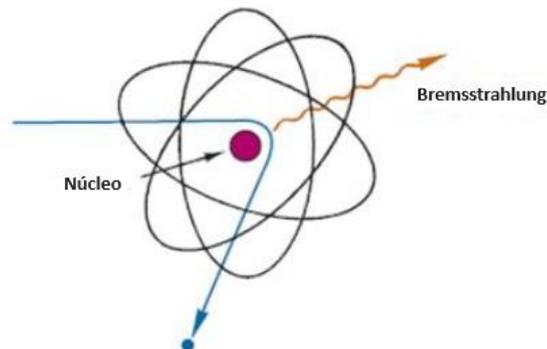


Figura 3.3: Interacción con un núcleo, lo que resulta en la producción de bremsstrahlung. [2]

## 3.2. INTERACCIÓN DE FOTONES CON LA MATERIA

El comportamiento de los fotones de alta energía (rayos  $\gamma$ , rayos X) en la materia difiere sustancialmente del observado en las partículas cargadas, debido a que no tienen ni carga ni masa. Estos rayos transfieren su energía a la materia a través de interacciones complejas con átomos, núcleos y electrones. Sin embargo, es posible interpretar estas interacciones como simples colisiones entre un fotón y un átomo, núcleo o electrón blanco, las cuales no causan ionización directamente. A pesar de este hecho, algunas de las interacciones conducen a la eyección de electrones atómicos, los cuales causan ionizaciones, provocando efectos radiobiológicos. Por esta razón, los fotones de alta energía se clasifican como radiación ionizante secundaria [2].

### 3.3.1. Procesos de interacción

La complejidad del proceso de atenuación de la radiación electromagnética con la materia se deriva de la superposición de diversos procesos de interacción que son independientes entre sí. Sin embargo, para el rango de energía de interés en el presente trabajo, únicamente tres son relevantes: el *efecto fotoeléctrico*, la *dispersión Compton* y la *creación de pares*. A continuación, se da una breve descripción de cada uno de ellos.

#### 3.3.1.1. Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es un proceso de absorción atómica, donde un átomo absorbe por completo la energía de un fotón incidente (Figura 3.4) [2]. Este fenómeno tiene lugar cuando un

fotón de energía  $h\nu$  interactúa con un átomo y causa que un electrón con energía de enlace  $E_b$  sea expulsado de su capa electrónica. El efecto puede ocurrir únicamente si  $h\nu > E_b$ .

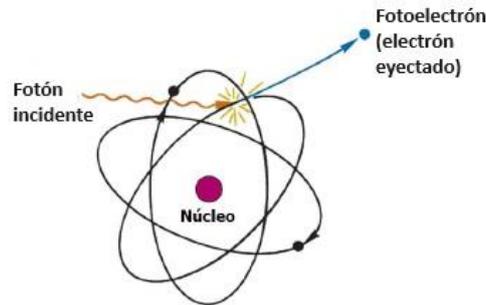


Figura 3.4: Representación esquemática del efecto fotoeléctrico. El fotón incidente transfiere su energía a un fotoelectrón y desaparece.[2]

La energía del electrón eyectado es entonces:

$$E = h\nu - E_b \quad 3.5$$

Si el electrón se encuentra en las capas más internas del átomo, mayor será la energía de enlace, y consecuentemente, la energía del electrón expulsado será menor. La probabilidad de ocurrencia del efecto fotoeléctrico es mayor cuando la energía del fotón incidente y la energía de enlace del electrón son aproximadamente similares [13].

La Figura 3.5 muestra la sección eficaz típica del efecto fotoeléctrico en función de la energía del fotón incidente. Se observa que a energías superiores a la energía de enlace más alta del átomo (capa K), la sección eficaz es relativamente pequeña; no obstante, experimenta un rápido aumento a medida que se aproxima a la energía correspondiente de la capa K. Después de este punto, la sección eficaz experimenta una caída abrupta, fenómeno conocido como borde de absorción de K [10].

La probabilidad de que ocurra una interacción fotoeléctrica varía con el número atómico  $Z$  y con la energía del fotón aproximadamente como  $\frac{1}{E^3}$ .

$$\Phi_{Fotoeléctrico} \propto \frac{Z^5}{E^3} \quad 3.6$$

Esta relación explica el gran dominio del efecto fotoeléctrico para fotones incidentes de bajas energías [12]. Hace evidente, además que los materiales con mayor  $Z$  son los más favorecidos para la absorción fotoeléctrica.

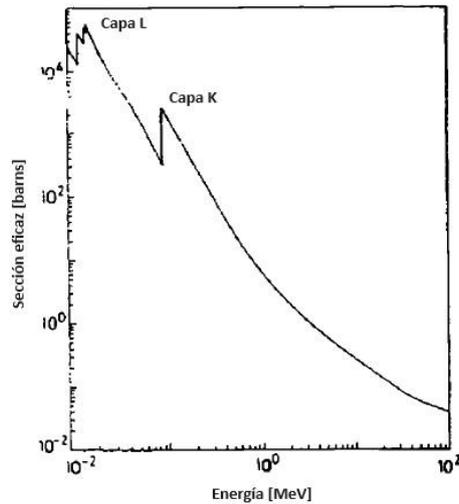


Figura 3.5: Sección eficaz fotoeléctrica calculada para el Pb. [10]

### 3.3.1.2. Dispersión Compton

El efecto Compton se manifiesta durante la interacción entre un fotón y un electrón débilmente ligado al átomo, específicamente cuando la energía de enlace del electrón  $E_b$  es considerablemente menor que la energía del fotón  $h\nu$ . En esta situación, se trata al electrón como libre, y se considera que la colisión es elástica (Figura 3.6). Al chocar el fotón incidente de energía  $h\nu$ , el electrón resulta deflectado en un ángulo  $\theta$ , y con energía  $E_e$ , mientras que el fotón incidente sufre una dispersión según un ángulo  $\phi$  y su energía disminuye a  $h\nu'$  [2].

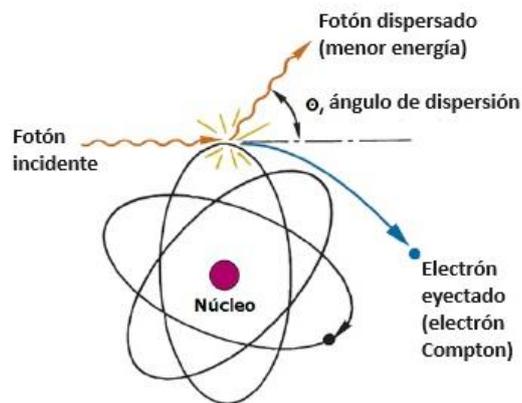


Figura 3.6: Representación esquemática de la dispersión de Compton. El fotón incidente transfiere parte de su energía a un electrón de retroceso Compton y se dispersa en otra dirección. [2]

Aplicando la conservación de energía y momento, se puede obtener la siguiente relación:

$$h\nu = h\nu' + E_e \quad 3.7$$

Mediante la ejecución de un análisis matemático y la aplicación de estos fundamentos en condiciones relativistas, es posible calcular el valor correspondiente a la energía del fotón dispersado  $h\nu'$  (Ecuación 3.8).

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \quad 3.8$$

Con la variable  $\alpha$  definida como  $\alpha = h\nu/m_0c^2$ , donde  $m_0$  denota la masa en reposo del electrón. La energía cinética del electrón colisionado se puede determinar mediante:

$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos \phi)}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \quad 3.9$$

En consecuencia, la energía cinética del electrón  $E_e$  alcanza su valor máximo cuando el ángulo de dispersión  $\phi = \pi$  (retrodispersión) [10]. Dicho valor máximo, se establece como:

$$E_e^{m\acute{a}xima} = h\nu \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \quad 3.10$$

El efecto Compton, al igual que el fotoeléctrico, da como resultado un átomo residual ionizado. En este caso, la vacante resultante se produce en una capa poco profunda, por lo general la capa más externa (electrones de valencia) por lo que de emitirse radiación electromagnética de desexcitación ésta será de baja energía.

La probabilidad de que un fotón sea dispersado por efecto Compton ( $\sigma$ ) se obtuvo por Klein y Nishina en 1928 utilizando la teoría electrodinámica cuántica relativista de Dirac. La sección eficaz obtenida para la dispersión Compton es:

$$\sigma_{Compton} \propto \frac{1}{E} \quad 3.11$$

Esta relación evidencia que el componente de dispersión de Compton disminuye lentamente al aumentar la energía  $E$  de los fotones [2].

### 3.3.1.3. Creación de pares

La producción de pares tiene lugar cuando un fotón interactúa con el campo eléctrico de una partícula cargada. Por lo general, esta interacción se da con un núcleo atómico, aunque ocasionalmente puede ser con un electrón. En este proceso, un fotón en presencia de un núcleo se transforma en un par electrón-positrón, como se ilustra en la Figura 3.7. Cuando el positrón alcanza el reposo, se aniquila (con mayor probabilidad) con un electrón del medio detector, dando lugar a dos fotones de 511 keV cada uno, emitidos en direcciones opuestas, por

conservación del momento lineal. Se requiere que la energía del fotón incidente sea superior a  $1,022 \text{ MeV}$  para que se produzca la formación de pares [2].

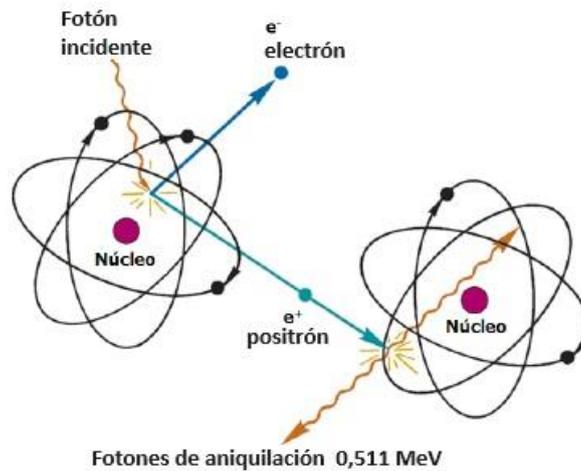


Figura 3.7: Representación esquemática de la producción de pares. [2]

La probabilidad de producción de pares, en este caso representada por  $\tau$ , es cero para energías de fotones menores que el umbral de energía de  $1,022 \text{ MeV}$ . Posteriormente, aumenta logarítmicamente en concordancia con el aumento tanto de la energía de los fotones como del número atómico del absorbente  $Z$ . De este modo, la sección eficaz resultante para la creación de pares se define como [2]:

$$\tau_{pares} = Z^2 \ln E \quad 3.12$$

### 3.3.2. Atenuación de un haz de fotones

Cuando se analiza un haz de fotones atravesando un medio material, el concepto de atenuación hace referencia a la reducción del número de fotones a medida que éste atraviesa la materia. Esta disminución se atribuye a la absorción y a la dispersión de los fotones. Diversos factores contribuyen a este fenómeno, algunos de los cuales están relacionados con el haz de fotones o la radiación, mientras que otros están asociados con las propiedades de la materia con la cual la radiación interactúa.

En el caso de un fotón que atraviesa un medio material absorbente de un espesor dado, existe una probabilidad de que experimente una interacción, dependiendo de factores como su energía, la composición y el espesor del absorbente. La relación con el absorbente indica que a medida que el absorbente es más grueso, la probabilidad de que se produzca una interacción también aumenta. Del mismo modo, al incrementar el número atómico o densidad del material, la atenuación producida en un espesor determinado también se incrementa [2].

Para cuantificar esta interacción, se considera un haz de fotones con intensidad  $I_0$  que incide perpendicularmente sobre una lámina de espesor  $\Delta x$ , como se muestra en la Figura 3.8.

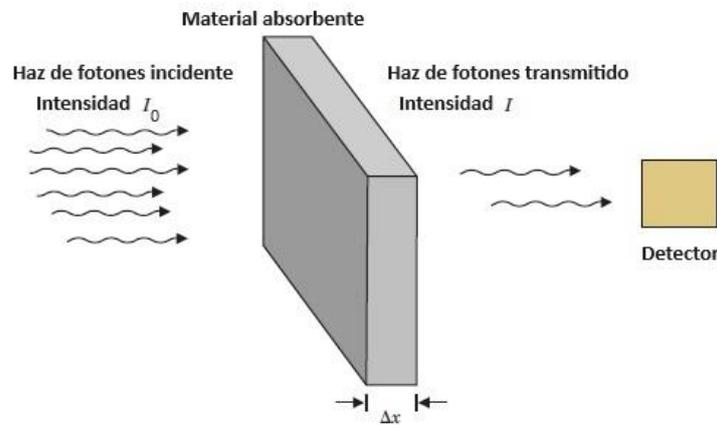


Figura 3.8: Esquema de la atenuación de la radiación. [2]

En una primera aproximación, se asume que el absorbente está compuesto por un único elemento de número atómico  $Z$ , y que el haz es monoenergético con energía  $E$ . La medida de la intensidad del haz transmitido  $I$ , es detectada a través de un detector de fotones [14]. Se puede demostrar que la atenuación experimentada por un haz de fotones sigue la ley de atenuación exponencial, conocida como Ley de Lambert-Beer [2]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad 3.13$$

En esta expresión,  $I_0$  representa la intensidad inicial del haz,  $\mu$  es el coeficiente de atenuación lineal, y  $x$  es el espesor del absorbente. La presencia del signo negativo en la ecuación 3.17 indica que la intensidad del haz disminuye al aumentar el espesor del absorbente. Esta ecuación se plantea para el caso ideal donde se supone que la fuente radiactiva es puntual (suficientemente pequeña), isotrópica y el haz estrecho [4]. En caso contrario se requiere un factor de acumulación o build up que compensa estos factores [2].

El coeficiente de atenuación es una magnitud que caracteriza la facilidad con la que un material puede ser atravesado por un haz de radiación. Un coeficiente de atenuación elevado indica que el haz es más eficientemente atenuado al atravesar el material, mientras que un coeficiente de atenuación menor significa que el haz experimenta una menor atenuación. Por lo tanto, la capacidad de atenuación de un material depende en gran medida de su coeficiente de atenuación lineal. Este coeficiente está compuesto por la suma de las secciones transversales, asociadas a cada mecanismo específico de interacción de la radiación con la materia: el efecto fotoeléctrico, la dispersión de Compton y la producción de pares. Siendo  $N$  la densidad de átomos en el material, la expresión matemática del coeficiente de atenuación puede escribirse como:

$$\mu = N\sigma = N(\Phi_{\text{fotoeléctrico}} + Z\sigma_{\text{Compton}} + \tau_{\text{Pares}}) \quad 3.14$$

Los coeficientes de atenuación lineal normalmente disminuyen al aumentar la energía de la radiación incidente, mientras que tienden a incrementarse con el número atómico o la densidad del material. La disminución del coeficiente de atenuación con la energía, corresponde al hecho de que, a mayores energías, la radiación presenta mayores probabilidades de penetración. El aumento del número atómico se relaciona con el incremento en la cantidad de electrones en el material, lo cual resulta en un aumento en la probabilidad de interacción con dichos electrones. Por otro lado, una mayor densidad implica un empaquetamiento atómico más compacto, incrementando las probabilidades de interacción con los átomos del material.

A partir del coeficiente de atenuación lineal y conociendo la densidad del material  $\rho$ , es posible obtener el coeficiente de atenuación másico  $\mu_m$ :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad 3.15$$

el cual es independiente de la densidad. Si el coeficiente de atenuación lineal tiene dimensiones de  $cm^{-1}$  y la densidad se expresa en  $g/cm^3$ , el coeficiente de atenuación másico tiene unidades de  $cm^2/g$  y depende del número atómico del absorbente  $Z$  y de la energía  $E$  de los fotones.

La Figura 3.9 muestra un gráfico del coeficiente de atenuación másico  $\mu_m$  y sus componentes de secciones eficaces individuales versus la energía de fotones de 0,01 a 10 MeV en Pb. El gráfico ilustra la contribución de cada proceso de interacción como también la contribución total asignada  $\mu_m$ .

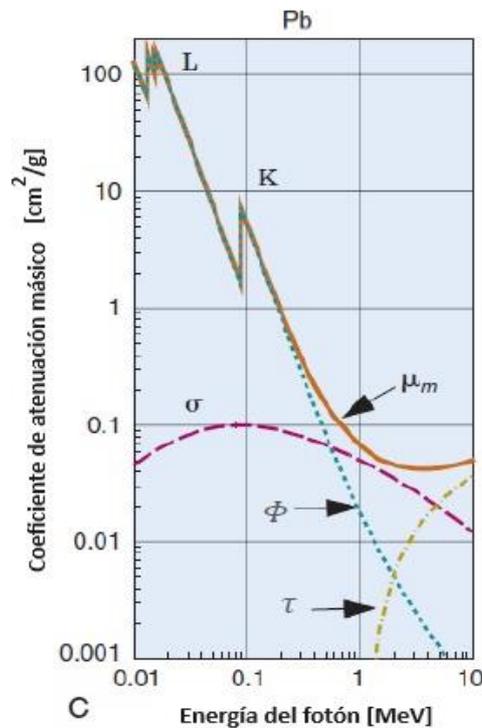


Figura 3.9: Coeficientes de atenuación másico fotoeléctrico ( $\phi$ ), Compton ( $\sigma$ ), producción de pares ( $\tau$ ) y total para Pb en función de la energía (MeV). [2]

En la Figura 3.10 se presenta la interacción predominante en función de la energía  $E$  de los fotones y el número atómico del absorbente  $Z$ . En general, se observa que el efecto fotoeléctrico predomina para el caso de bajas energías y en materiales con número atómico elevado. Por otro lado, la dispersión Compton es predominante en un rango de energías intermedias y en materiales de  $Z$  bajo como es el caso del cuerpo humano. La producción de pares es el efecto dominante para el rango de energías más elevadas, comprendidas entre 5 a 100  $MeV$  y en materiales con número atómico alto [2].

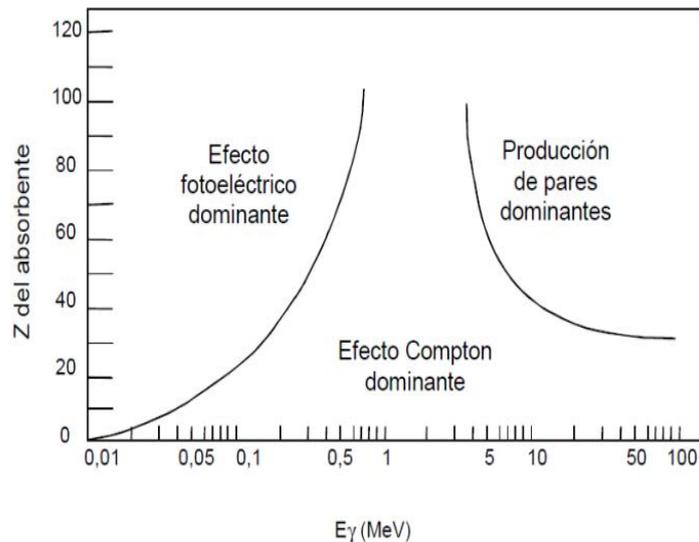


Figura 3.10: Regiones de predominio relativo de las tres formas principales de interacción de fotones con la materia. [2]

### 3.4. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

El ser humano, además de estar expuesto a la radiación ionizante de fondo natural, puede verse expuesto en diversas circunstancias, a fuentes de radiación ionizante de origen artificial. Inicialmente, la aplicación de estas fuentes en el ámbito científico, representó un gran avance para la sociedad; sin embargo, rápidamente se pusieron de manifiesto los daños que su uso indebido podrían ocasionar en la salud humana. Así, se hizo evidente la necesidad de establecer e implementar medidas de protección, dando origen a la disciplina denominada protección radiológica.

La protección radiológica es una disciplina que tiene como finalidad resguardar la salud de las personas y preservar la integridad del medio ambiente frente a los posibles efectos nocivos que pueden resultar de la exposición a radiaciones ionizantes, sin limitar indebidamente las acciones humanas beneficiosas que pueden estar asociadas a dicha exposición [15].

Desde 1928, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) desempeña un papel fundamental como organismo internacional independiente, emitiendo recomendaciones

y proporcionando orientación en todos los aspectos relacionados con la protección contra las radiaciones ionizantes. Estas recomendaciones generales establecen los criterios básicos para la formulación de regulaciones, normativas y códigos de práctica adoptados por organizaciones de alcance internacional, así como por autoridades regionales y nacionales [4]. Las normativas resultantes están dirigidas a la protección de los pacientes, trabajadores y/o el público en general, siendo el objetivo fundamental de la protección radiológica evitar los efectos determinísticos y acotar, dentro de valores aceptables, la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos [16].

Los principios básicos de protección radiológica se basan en tres factores: *distancia*, *tiempo* y *blindaje*. Es decir que, la dosis de radiación puede reducirse de manera efectiva mediante las siguientes acciones:

- Aumento de la distancia desde la fuente (“Ley de Inversa del Cuadrado de las Distancias”): Cuanto mayor sea la distancia entre la fuente de radiación y el punto de exposición, menor será la dosis recibida.
- Reducción del tiempo de exposición: Limitar la duración de la exposición directa contribuye significativamente a disminuir la dosis total de radiación.
- Utilización de un blindaje: La inserción de un material adecuado entre la fuente de radiación y el área o la zona que se busca proteger, disminuye la cantidad de radiación que alcanza dicho punto.

Sin embargo, reducir el tiempo de exposición o incrementar la distancia desde la fuente no siempre es posible, particularmente en contextos vinculados a prácticas médicas, como es el caso del intervencionismo. En estas situaciones, además de la implementación de estrictos hábitos de trabajo, una de las opciones apropiadas para minimizar la dosis por irradiación externa es la utilización de blindajes. Esto implica interponer un medio material con características adecuadas entre la fuente de radiación y las personas a proteger, actuando como un escudo eficaz al producir absorción y dispersión de las radiaciones, logrando así una atenuación significativa de las mismas. La implementación de esta medida no solo asegura la protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto, sino también del público que pueda estar presente en las proximidades, contribuyendo así a mantener los niveles de radiación en valores aceptables.

La protección contra la radiación ionizante en entornos médicos y laborales requiere la implementación de blindajes adecuados. Estos blindajes se clasifican en dos categorías principales: *blindaje localizado*, se refiere a barreras físicas que protegen a individuos específicos de la exposición directa a la radiación y *blindaje estructural*, el cual hace referencia a barreras permanentes que protegen a un área completa de la exposición a la radiación. Existen factores que influyen en la selección del blindaje adecuado, tales como: tipo y energía de la radiación, práctica médica específica y presupuesto asignado.

Los blindajes estructurales son elementos fijos que forman parte integral de la estructura de una sala o recinto de irradiación, abarcando paredes, pisos, techos, entre otros. En este caso,

es necesario calcular con precisión el espesor de estas protecciones. Por otra parte, los blindajes localizados alcanzan dos situaciones distintas. Por un lado, se utilizan para guardar fuentes radiactivas; siendo estos contenedores, ladrillos de plomo o cajas blindadas. Por otro lado, cumplen un papel fundamental al proteger a los trabajadores durante operaciones que involucran radiaciones ionizantes, siendo identificados como elementos de protección personal (EPP). Este conjunto de elementos incluye delantales o chalecos plomados, protectores tiroideos, gafas y pantallas plomadas (Figura 3.11), con espesores normalizados que oscilan entre 0,25 mm a 1 mm de Pb equivalente. Estos blindajes localizados están especialmente diseñados para absorber la radiación secundaria, y su configuración se realiza cuidadosamente con el objetivo de equilibrar la comodidad del usuario con la eficacia de la protección [4].



Figura 3.11: Elementos de protección personal (EPP).

Generalmente, el material utilizado para el blindaje de rayos X y radiación gamma es el Pb, elegido por ser un material con características sobresalientes. Este metal es seleccionado por su elevado número atómico ( $Z = 82$ ) que resulta en un considerable coeficiente de atenuación lineal. Además, este material presenta excelentes cualidades físicas, incluyendo una alta densidad ( $\rho=11,4 \text{ g/cm}^3$ ), facilidad para el moldeo y fabricación, así como una notable maleabilidad.

Como contrapartida, este material presenta elevada toxicidad, causando graves efectos a largo plazo tanto en los seres humanos como en el medio ambiente. Entre los efectos causados se incluyen daños neurológicos, en órganos internos y en el sistema circulatorio, problemas reproductivos y efectos en la salud ósea.

En la actualidad, se considera que no es el material más apropiado para la fabricación de EPP debido a su peso, alta demanda, y a los riesgos para la salud asociados con la exposición prolongada debido a su toxicidad. Por esta razón, se han llevado a cabo investigaciones orientadas a la búsqueda de nuevos materiales. Idealmente, se busca obtener materiales de protección contra la radiación no tóxicos, livianos, flexibles y de bajo costo para reemplazar al Pb.

### 3.5. RECICLADO

En las últimas décadas, se ha observado un notable aumento en las actividades industriales y en los hábitos de consumo de la población. Este crecimiento ha generado una considerable cantidad y diversidad de residuos industriales, lo que constituye una problemática urgente que debe abordarse de manera prioritaria por el sector científico-tecnológico. El incremento de estos residuos no solo conlleva a la disminución de los espacios disponibles para su disposición final, sino también a la exacerbación de los problemas asociados con la contaminación ambiental. La Ley Nacional 25.612 define los residuos industriales como elementos, sustancias u objetos en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que resultan de procesos industriales o actividades de servicio, de los cuales sus poseedores no pueden utilizar, deben desprenderse o tienen la obligación legal de hacerlo.

En la actualidad, el modelo de producción predominante genera una cantidad de residuos que supera ampliamente la producción de bienes. Esto implica que dicho modelo no respeta los ciclos naturales ni considera los límites físicos y ambientales, con consecuencias notables en el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación del aire, agua y suelo. La disposición actual de la mayoría de estos residuos se lleva a cabo en los predios de las empresas generadoras. En otros casos, se utilizan como rellenos en terrenos bajos o terraplenes, sin realizar análisis exhaustivos que determinen su nivel de toxicidad. Los principales receptores primarios de estos residuos son la atmósfera, el agua y el suelo, seguidos por receptores secundarios como plantas, animales y personas.

La posibilidad de reutilizar estos residuos en aplicaciones de interés tecnológico se alinea con el modelo de desarrollo sostenible formulado en la Conferencia de las Naciones Unidas en 1992. Este modelo establece principios clave, como el consumo mínimo de energía en las etapas de producción, la posibilidad de restauración de materiales y la reutilización máxima de componentes, entre otros. La implementación de estos principios es crucial para mitigar los impactos negativos de la generación de residuos industriales y avanzar hacia un sistema más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Retomando lo mencionado en el apartado Introducción, el horizonte del presente trabajo es desarrollar materiales amigables con el ambiente con el propósito de sustituir al Pb en aplicaciones de protección radiológica. Por lo tanto, se enfoca en preparar materiales que sean fáciles de conformar, estables en el tiempo e idealmente que requieran poca tecnología para pasar de la materia prima al producto final. También será de especial utilidad que dicho material sea relativamente de bajo costo y pueda ser hecho a medida en cuanto a su resistencia y rigidez.

## 4. METODOLOGÍA

---

En el presente capítulo se abordan aspectos esenciales relacionados a la metodología utilizada para llevar adelante el trabajo propuesto. En primer lugar, se realiza una detallada descripción de las metodologías de caracterización que fueron empleadas para examinar las propiedades cristalinas y morfológicas del polvo de Horno de Arco Eléctrico (PHE) utilizado como material inicial. A continuación, se profundiza en la preparación de diversos materiales absorbentes, haciendo uso del PHE. Posteriormente, se describe el procedimiento seguido para la realización de mezclas de este polvo en distintas matrices, tales como cemento Portland y siliconas odontológicas. La primera se trata de un cemento compuesto de la marca Loma Negra y se considera su posible aplicación en el revestimiento de paredes. Con respecto a la silicona odontológica, se usó la marca comercial Densell, la cual incluye tres componentes: silicona de condensación-masa C+, silicona light C+, y activador universal de silicona C+. Este último material se propone con el objetivo de aplicarlo en la fabricación de elementos de protección personal, como protectores tiroideos o chalecos plomados. En secciones posteriores, se describen las características principales de los detectores de radiación y del cristal centellador utilizado. Finalmente, se aborda el análisis de la espectroscopía gamma simple y se esquematiza el arreglo experimental dispuesto para este trabajo.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE ASPIRACIÓN DE HORNO ELÉCTRICO

Como se mencionó en el Capítulo 3, los residuos industriales son aquellos que se generan en los procesos de extracción, explotación, producción, transformación, almacenamiento y distribución de productos. El polvo estudiado en el presente trabajo proviene de industrias localizadas en la región norte de la Provincia de Buenos Aires, y en las zonas sur y centro de la Provincia de Santa Fe. La obtención de acero líquido a través de Horno de Arco Eléctrico se realiza a partir de la carga de hierro esponja, chatarra y fundentes dentro del horno. Este proceso genera gases, compuestos orgánicos volátiles, escoria y particulado.

En el desarrollo de materiales, es importante el análisis de sus propiedades estructurales con el objetivo de estudiar sus posibles aplicaciones en diferentes campos. Por esta razón, la caracterización fisicoquímica de los compuestos es de fundamental importancia. En este trabajo, el material fue caracterizado mediante técnicas de Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

#### 4.1.1. Difracción de Rayos X

La Difracción de Rayos X (DRX) se refiere a la dispersión de los rayos X por las unidades de un sólido cristalino. Los diagramas de difracción se utilizan para deducir el arreglo de las partículas en el retículo de un sólido. Los rayos X son radiación electromagnética con longitudes

de onda comparables con las distancias interatómicas en un cristal, por lo que una red cristalina es capaz de difractar los rayos X. Un patrón de difracción de rayos X es consecuencia de las interferencias en las ondas asociadas a los rayos X.

La onda superior es dispersada por un átomo del primer plano, mientras que la onda inferior es dispersada por un átomo del segundo plano. Para que estos dos rayos vuelvan a entrar en fase después de la difracción, o sea, que ocurra un máximo en el patrón de difracción a cualquier ángulo de incidencia  $\theta$  (respecto a los planos cristalinos  $hkl$ ) debe de satisfacerse la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta \quad 4.1$$

donde  $d$  es la distancia entre los planos  $hkl$ ,  $n$  es el orden de la difracción y  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X incidentes. (Figura 4.1).

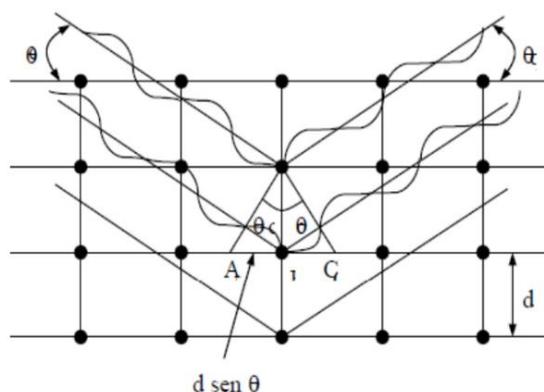


Figura 4.1: Representación esquemática del fenómeno de Difracción de Rayos X.

El análisis de Difracción de Rayos X se realizó en un difractómetro Philips PW1710 en el Laboratorio Nacional de Investigación y Servicios (IFLP), utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,540589 \text{ \AA}$ ) con filtro de níquel. Se realizó un barrido de difracción en el intervalo de ángulos  $2\theta$  entre  $5^\circ$  y  $70^\circ$  con incrementos de  $2^\circ \text{ min}^{-1}$ . Las fases cristalinas fueron identificadas con referencia a los datos estándares de difracción de polvos JCPDS – ICDD empleando un software específico provisto con el difractómetro.

#### 4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido o SEM (de Scanning Electron Microscopy) es un instrumento de gran utilidad para examinar y analizar características morfológicas de muestras sólidas. Las razones de esta utilidad son su alta resolución, su gran profundidad de foco que le da apariencia tridimensional y la fácil preparación de las muestras e interpretación de los resultados. La información que se obtiene corresponde a una profundidad de hasta 1-3 micrones.

Las señales que proveen la mayor parte de la información que puede obtenerse de una micrografía SEM son:

- **La señal de electrones secundarios.** La señal de electrones secundarios es la que se emplea normalmente para obtener una imagen de la muestra. Esta señal tiene la mayor densidad en comparación con la señal de electrones retrodispersados y la señal de rayos X y, por lo tanto, mayor resolución [17]. Se genera cuando un electrón del haz primario interactúa con un electrón en los átomos de la muestra, y lo saca de su órbita con cierta cantidad de energía cinética, causando una ligera pérdida de energía del electrón incidente y la ionización del electrón del átomo de la muestra bajo estudio. Los electrones secundarios se generan a profundidades diferentes de la muestra, pero debido a que son electrones de baja energía (menor a 50 eV), sólo los que se emiten cerca de la superficie alcanzan a llegar al detector. Esta señal en consecuencia lleva información principalmente del relieve o topografía de la muestra [17].
- **La señal de electrones retrodispersados.** La señal de electrones retrodispersados está compuesta por electrones que emergen de la muestra con energía superior a 50 eV, y pueden escapar desde una profundidad mayor y llegar al detector. Esta señal se produce cuando un electrón del haz primario interactúa con el núcleo de un átomo y desvía al electrón primario sin pérdida de energía. Esta señal proporciona información acerca de la composición química por medio del contraste en la imagen [17]. La intensidad de la señal de electrones retrodispersados, para una energía dada del haz, depende del número atómico ( $Z$ ) del material, por lo tanto, las zonas con menor  $Z$  se ven más oscuras que aquellas que tienen un número atómico mayor.
- **La señal de rayos X.** Esta señal es generada en volumen y profundidad mayor que el de los electrones secundarios y retrodispersados, por lo que tiene una pobre resolución espacial. La interacción del haz primario con los átomos de la muestra origina transiciones electrónicas que dan lugar a la emisión de rayos X, los que tendrán la energía característica del átomo en el que se produjo la transición.

El análisis SEM para este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería (UNLP), utilizando un microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM). Específicamente, se empleó el modelo FEI ESEM Quanta 250 (Figura 4.2), el cual posee capacidad analítica a través de un sistema dispersivo en energías (EDS).



Figura 4.2: Microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) utilizado para el presente trabajo.

## 4.2. FABRICACIÓN DE ABSORBENTES

### 4.2.1. Polvo Puro

El polvo proveniente del Horno de Arco Eléctrico fue sometido a un proceso de molienda mecánica en un molino oscilatorio horizontal Retsch MM2, operando a una frecuencia de 30 Hz. Se utilizó un cilindro de 8 cm<sup>3</sup> y una bola de acero con un diámetro de 12 mm. El objetivo de esta etapa fue homogeneizar el tamaño de partículas, manteniendo el tiempo de molienda constante en 1 hora.

Posteriormente, con el polvo ya tratado, se procedió a la fabricación de pastillas de 8 mm de diámetro. Este proceso se llevó a cabo empleando un pastillero de acero templado, el cual fue colocado en una prensa hidráulica con una fuerza constante de 30 kN. La duración de este paso fue de 15 minutos, obteniéndose las pastillas que se muestran en la Figura 4.3. Este procedimiento se llevó a cabo en el Instituto de Física de La Plata.



Figura 4.3: PHE y pastillas fabricadas luego del prensado.

#### 4.2.2. Polvo en matriz cementicia

Como materiales de partida para este estudio se utilizaron cemento Portland común y PHE. La composición química de los óxidos del cemento Portland es la siguiente:  $CaO$ , 62,49%;  $SiO_2$ , 20,82%;  $Al_2O_3$ , 6,53%;  $Fe_2O_3$ , 3,02%;  $MgO$ , 2,86%;  $SO_3$ , 2,25% y pérdida por ignición, 0,76% respectivamente [18].

Para llevar a cabo esta preparación, se realizó una mezcla incorporando 7,5 g de cemento de la marca comercial Portland, 15 g de arena, 0,4655 g de PHE y unas gotas de agua. Tras obtener la homogeneidad deseada en la mezcla, ésta fue cuidadosamente distribuida en moldes, dando lugar a un proceso de secado. Como resultado de esta preparación, se obtuvieron 6 pastillas con una composición uniforme (Figura 4.4).



Figura 4.4: Componentes y pastillas fabricadas con PHE y cemento.

#### 4.2.3. Polvo en matriz de silicona

Para llevar a cabo esta preparación, se utilizaron PHE, silicona de condensación-masa C+ y silicona light C+ junto con activador universal de silicona C+, todos de la marca comercial Densell. La silicona de condensación es un material para hacer impresiones dentales que polimerizan mediante una reacción de condensación en la que se pierde alcohol etílico.

Se preparó una mezcla incorporando 33,872 g de silicona de condensación-masa junto con PHE que fue amasada hasta lograr una preparación homogénea. Posteriormente, se añadieron la silicona light C+ y el activador universal según las especificaciones del fabricante hasta lograr una consistencia flexible. La cantidad de PHE de la mezcla se calculó de manera de lograr una concentración del 3% másico. Se realizó un amasado adicional con el objetivo de homogeneizar de manera completa el compuesto resultante. La masa obtenida fue estirada y se dejó secar. Transcurrido el tiempo suficiente, se procedió al corte de la preparación, obteniendo como resultado de este proceso 6 pastillas de composición homogénea (Figura 4.5). Además, se elaboraron absorbentes de silicona incrementando la concentración del PHE utilizado a un 10% y un 20% en masa, con el objetivo de investigar la variación de la atenuación en la silicona en función de las diferentes concentraciones de polvo.

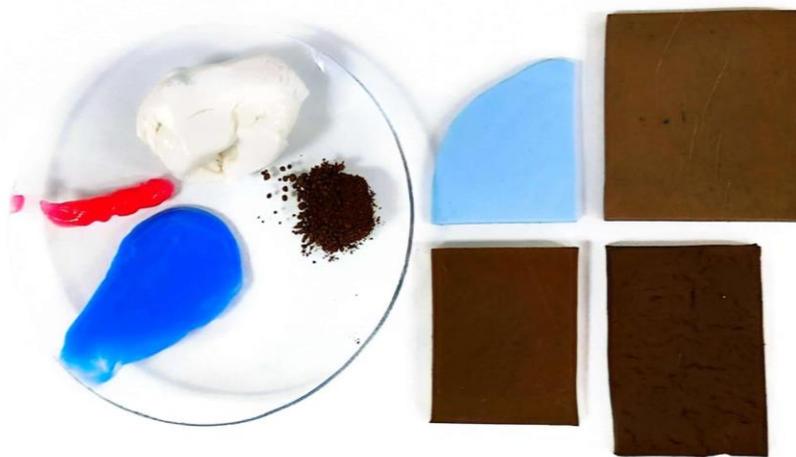


Figura 4.5: Componentes y pastillas fabricadas con distintas concentraciones de PHE y silicona odontológica.

A su vez, en los casos de los absorbentes con cemento y silicona odontológica, también se elaboraron pastillas sin el agregado de polvo con el propósito de realizar comparaciones entre las distintas muestras. La Tabla 4.1 muestra la nomenclatura utilizada para cada material absorbente propuesto.

<i>NOMENCLATURA</i>	<i>ABSORBENTE</i>
<i>PHE</i>	Polvo de Horno de Arco Eléctrico
<i>C</i>	Cemento
<i>PHE-C</i>	3% Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Cemento
<i>S</i>	Silicona
<i>3PHE-S</i>	3% Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Silicona
<i>10PHE-S</i>	10% Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Silicona
<i>20PHE-S</i>	20% Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Silicona

Tabla 4.1: Nomenclatura utilizada para cada absorbente fabricado.

### 4.3. DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN

#### 4.3.1. Propiedades generales de los detectores

La base de la detección de la radiación es la transferencia de parte o toda la energía de radiación al volumen sensible del detector donde luego es convertida en una forma perceptible. Tanto las partículas cargadas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) como fotones o neutrones, ionizan y excitan los átomos del detector.

La forma en que la energía depositada se convierte en una señal utilizable, depende del tipo de detector. Los detectores gaseosos, están diseñados para recolectar directamente los electrones de ionización y formar una señal de corriente, mientras que, en los centelladores, tanto la excitación como la ionización contribuyen a inducir transiciones moleculares que resultan en la emisión de luz.

Actualmente, los detectores son de naturaleza eléctrica, lo que implica que la información captada por el detector se transforma en pulsos eléctricos que pueden ser tratados por medios electrónicos [10].

Algunas de las características generales de los detectores son:

- *Sensibilidad*

La primera consideración para un detector es su sensibilidad, es decir, su capacidad de producir una señal utilizable para un tipo determinado de radiación y energía. La sensibilidad de

un detector depende de múltiples factores, entre los que se destaca la probabilidad de interacción entre la radiación ionizante incidente y el medio material que puedan generar procesos de ionización o excitación en el detector. Esta probabilidad de interacción se describe mediante la sección eficaz ( $\sigma$ ) para un evento particular de interacción de la radiación con el detector. La sensibilidad también se ve afectada por la masa del detector y el ruido intrínseco del mismo. En todo sistema de detección se encuentra presente el ruido intrínseco del material detector y la electrónica asociada, originado por fluctuaciones de la corriente o el voltaje de salida. Otro factor que determina la capacidad de un sistema detector para generar una señal utilizable es el material protector que rodea el sistema detector, este puede cambiar la energía o la dirección de la radiación incidente, haciendo que la misma no llegue al volumen sensible del detector [19].

- *Respuesta del detector*

La relación entre la energía de radiación y la carga total o altura del pulso de la señal de salida se conoce como respuesta del detector. Se busca idealmente que esta relación sea lineal, aunque no es absolutamente necesario. Sin embargo, la linealidad simplifica considerablemente la tarea de convertir la altura del pulso medida en energía [10].

- *Resolución en energía*

Una de las características más significativas que caracterizan a los detectores de radiación es su resolución en energía, es decir, su capacidad para discriminar entre dos energías similares. Puede pensarse también como la mínima diferencia de energía que es capaz de detectar.

En general, si se supone un detector ideal y recibe radiación monoenergética, éste debería presentar como respuesta para el espectro de energía una delta de Dirac. En la práctica, esta línea se ensancha adoptando una forma normalmente gaussiana. Este ensanchamiento se atribuye a las fluctuaciones en el número de ionizaciones y excitaciones generadas durante el proceso. Así, la resolución en energía de un detector se analiza en términos del ancho a la altura media del pico (*FWHM* por sus siglas en inglés, Full Width at Half Maximun) como:

$$R = \frac{FWHM(E)}{E} \quad 4.2$$

- *La función respuesta*

Para la medición de espectros de energía, un factor importante a tener en cuenta es la función respuesta del detector para el tipo de radiación que se detecta. Este es el espectro de alturas de pulso observadas a la salida del detector cuando es bombardeado por un haz monoenergético de la radiación dada.

La función respuesta de un detector a una energía particular está determinada por las diferentes interacciones que puede sufrir la radiación dentro del detector, así como por su diseño y geometría [10].

- *Tiempo de respuesta*

El tiempo de respuesta es una característica muy importante del detector, y se define como el tiempo que tarda el detector en formar la señal tras la llegada de la radiación. Este factor es crucial para las propiedades de sincronización del detector [10].

- *Eficiencia del detector*

Considerando que parte de la radiación emitida por una fuente puede no ser detectada, ya sea porque una fracción no llega al detector o porque la radiación no interactúa completamente con el volumen sensible, es necesario establecer un parámetro que cuantifique la capacidad de un sistema detector para convertir la radiación emitida por la fuente en señales utilizables. Este parámetro, conocido como eficiencia, es fundamental para caracterizar un detector, ya que proporciona una medida de cómo se relaciona el número de eventos detectados con la radiación emitida de la fuente. Así, la eficiencia total o absoluta de un detector se define como el cociente entre el número de eventos detectados y el número de eventos emitidos por la fuente:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos por la fuente}} \quad 4.3$$

La eficiencia absoluta es función de la naturaleza de la radiación que se mide, del tipo de detector que se utiliza y de la disposición geométrica del sistema fuente-detector. Teniendo en cuenta estos factores, la eficiencia absoluta puede factorizarse en la siguiente forma:

$$\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{geom} \cdot \varepsilon_{int} \quad 4.4$$

La eficiencia geométrica ( $\varepsilon_{geom}$ ) depende enteramente de la configuración geométrica del detector y la fuente, y se define como la fracción de eventos emitidos por la fuente que alcanzan al detector:

$$\varepsilon_{geom} = \frac{\text{eventos incidentes sobre el detector}}{\text{eventos emitidos por la fuente}} \quad 4.5$$

La eficiencia intrínseca ( $\varepsilon_{int}$ ) es función del tipo de radiación, de su energía y del material del detector. Se define como la fracción de los eventos que alcanzan realmente al detector y que son registrados [10][19].

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes en el detector}} \quad 4.6$$

- *Tiempo muerto*

El tiempo muerto de un detector se define como el tiempo que debe transcurrir entre dos eventos consecutivos para que éstos se distingan como pulsos separados. La sensibilidad del detector puede variar durante este período según el tipo de dispositivo. Si el detector es insensible, cualquier evento adicional que ocurra durante ese periodo se perderá. En cambio, si el detector conserva su sensibilidad, estos eventos pueden acumularse sobre el primero, dando lugar a una distorsión de la señal y, como consecuencia, a la pérdida de información de ambos eventos.

### 4.3.2. Detectores de centelleo

#### 4.3.2.1. Principios básicos

El funcionamiento de un detector de centelleo se basa en la propiedad que poseen ciertos materiales para emitir luz visible cuando sobre ellos incide radiación ionizante. La radiación provoca la ionización y excitación de átomos y moléculas del detector y, en consecuencia, la emisión de fotones en el rango de luz visible. Si estos materiales centelladores se acoplan a un dispositivo amplificador y con una electrónica asociada, los centelleos pueden convertirse en pulsos eléctricos, que luego serán analizados electrónicamente [20]. Por tanto, un detector de centelleo se compone de tres partes principales: un material centellador, un fotomultiplicador y un acoplamiento óptico, que permite acoplar el fotomultiplicador con el cristal luminiscente. Estos tres elementos se encuentran protegidos de la luz ambiental por una envoltura opaca.

Un material centellador ideal es aquel que cumple las siguientes propiedades:

1. Convierte los fotones de alta energía ( $keV - MeV$ ) en luz detectable ( $eV$ ) con una alta eficiencia.
2. La conversión es lineal: la cantidad de luz emitida por el material es proporcional a la energía depositada en él en un rango tan grande como sea posible.
3. El medio es transparente a la longitud de onda de su propia emisión.
4. El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debería ser lo suficientemente corto como para que puedan ser generados pulsos de señal rápidos.
5. El material debe ser de buena calidad óptica y debe fabricarse en tamaños suficientemente grandes para que resulte interesante como detector práctico.
6. Su índice de refracción debe ser cercano al del vidrio ( $\sim 1.5$ ) para permitir el acoplamiento eficiente de la luz de centelleo a un tubo fotomultiplicador [21].

Existen gran variedad de materiales centelladores, ninguno de los cuales logra reunir simultáneamente todas las propiedades mencionadas. Por lo tanto, la elección de un material u otro dependerá de cuáles de estos factores resultan más favorables para el tipo específico de trabajo que se pretende llevar a cabo.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un detector de ioduro de sodio dopado con talio  $NaI(Tl)$ , por ser de entre los cristales inorgánicos el más empleado.

Mientras que en un material centellador orgánico el mecanismo de producción de luz es de naturaleza molecular, en un centellador inorgánico se caracteriza por la estructura electrónica de bandas propias de una red cristalina. Por lo tanto, para comprender el funcionamiento de un centellador con este tipo de cristales, es necesario examinar la estructura de bandas del material. La Figura 4.6 ilustra los niveles de energía dentro de la red.

Los electrones de la banda de valencia se encuentran ligados, mientras que los electrones de la banda de conducción son libres y pueden moverse a lo largo del material. Entre ambas bandas existe la llamada banda prohibida (gap), dentro de la cual los electrones no pueden encontrarse en cristales puros. Dentro de esa banda prohibida están los niveles electrónicos asociados tanto a las impurezas como a otros defectos de la red cristalina (trampas).

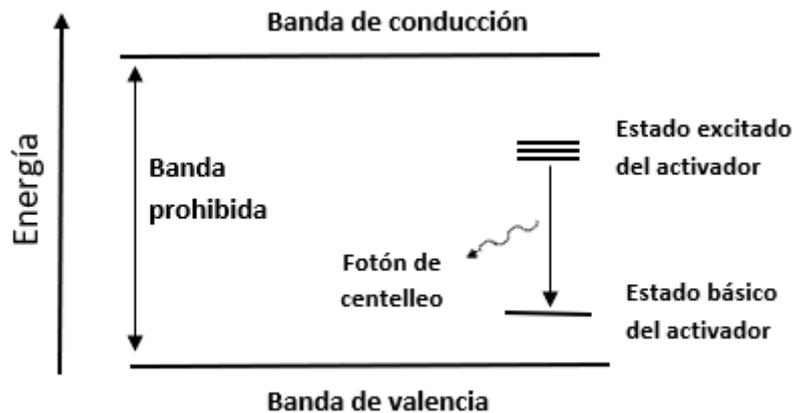


Figura 4.6: Estructura de bandas de energía de un cristal centellador inorgánico dopado.

Cuando el sistema absorbe energía, puede ocurrir que un electrón de la banda de valencia atraviese el gap y se desplace a la banda de conducción, dejando un hueco en el lugar que ocupaba en la banda de valencia. Al desexcitarse, se recombina con el hueco y recupera su lugar en la banda de valencia. Si el cristal es puro, el proceso de desexcitación con emisión de un fotón no se produce. Sin embargo, al introducir pequeñas cantidades de impurezas, llamadas activadores, se generan sitios especiales en la red donde la estructura de bandas de energía del cristal puro se modifica. Estas alteraciones en la estructura de bandas dan lugar a la creación de nuevos estados energéticos accesibles dentro de la banda prohibida. Ahora, la energía es más pequeña que la de la banda prohibida completa, permitiendo así que la transición ocurra y dando como resultado la emisión de fotones. Este fenómeno constituye el proceso de centelleo.

De esta manera, cuando una partícula ionizante interactúa con el detector, hará que un gran número de electrones se exciten en la banda de valencia, formando así un gran número de pares electrón-hueco. El hueco positivo será rápidamente conducido a la posición de un activador y lo ionizará. Mientras tanto, el electrón libre se moverá a través del cristal hasta que encuentre un activador ionizado. En este momento el electrón puede descender al sitio de la impureza, creando una configuración neutra, la cual puede tener su propio conjunto de estados de energía excitados. Estos estados están ilustrados en la Figura 4.6. Si el activador ha sido correctamente elegido, esta transición puede producir fotones en el rango de energía visible [21].

El funcionamiento de un centellador no sería posible sin el tubo fotomultiplicador (PMT), el cual convierte la débil luz de centelleo en un pulso de corriente medible sin añadir una gran cantidad de ruido a la señal.

Los componentes principales del tubo fotomultiplicador son una capa de material fotosensible llamada fotocátodo, responsable de convertir la luz de centelleo en unos pocos electrones de baja energía (fotoelectrones). Este fotocátodo está acoplado tanto a una estructura multiplicadora de electrones llamada dinodos, que amplifica la cantidad de electrones generados, como a un electrodo (ánodo) que recoge la señal final [21]. De esta manera se consigue que la amplitud de la señal registrada en el ánodo sea proporcional a la cantidad de radiación que interacciona con el material centellador [2]. La estructura simplificada de un tubo fotomultiplicador típico se ilustra en la Figura 4.7.

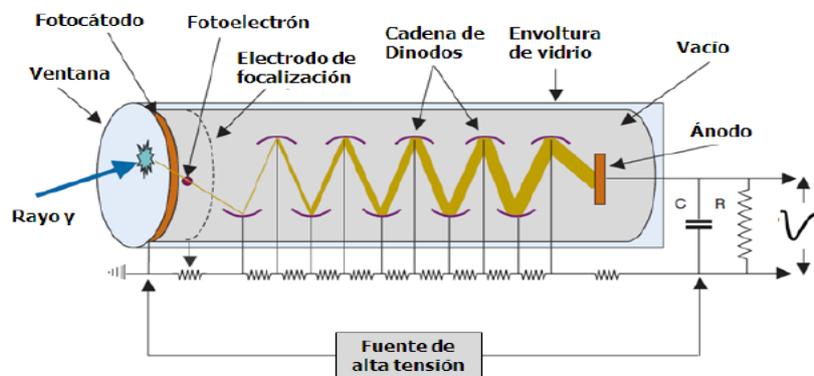


Figura 4.7: Esquema de un tubo fotomultiplicador donde se muestran los diferentes componentes del dispositivo y sus principios básicos. La señal luminosa produce en el fotocátodo las emisiones de electrones que a través de los dinodos se van multiplicando hasta alcanzar el ánodo. [2]

#### 4.3.2.2. Detector centellador de $INa(Tl)$

El descubrimiento del  $INa(Tl)$  originó una notable mejora en cuanto al rendimiento luminoso de los centelladores, siendo su rendimiento el más alto conocido. Su respuesta se aproxima significativamente a ser lineal para la mayor parte del rango de energías. Sin embargo, el tiempo de decaimiento dominante del pulso del centellador, es demasiado largo para aplicaciones que requieren una velocidad de cuentas alta.

Es importante destacar que el cristal de  $INa(Tl)$  es higroscópico, lo que significa que se deteriora debido a la absorción de agua si se expone a la atmósfera durante períodos de tiempo prolongados. Por lo tanto, resulta esencial mantener los cristales envueltos para preservarlos de la humedad del ambiente. Además, el cristal es relativamente frágil y susceptible a daños por impacto mecánico o variaciones térmicas.

A pesar de estas desventajas, la disponibilidad a gran escala del  $INa(Tl)$  a un costo relativamente bajo ha contribuido a su popularidad en una amplia gama de aplicaciones, convirtiéndose en el material de centelleo estándar para la espectroscopía de rayos gamma de rutina.

#### 4.4. ESPECTROSCOPIA GAMMA SIMPLE

La espectroscopía gamma simple constituye una técnica analítica de gran importancia en el estudio de la radiación gamma proveniente de ciertos materiales radiactivos. Se basa en la detección y cuantificación de la energía asociada a los fotones gamma emitidos durante procesos de desintegración radiactiva.

Un espectrómetro es un dispositivo que está compuesto por un sistema detector de radiación, generalmente un centellador de  $INa(Tl)$ , un fotomultiplicador y su correspondiente suministro de alto voltaje. Además, se complementa con un preamplificador, un amplificador, un analizador multicanal y una PC con el software necesario. Este dispositivo muestra el espectro registrado como el número de eventos detectados (cuentas) versus canales.

El espectro registrado de una fuente de radiación depende de la energía de las emisiones de la fuente, de las características del cristal centellador de radiación utilizado y de los mecanismos por los cuales la energía de la radiación se deposita en el cristal. En el caso de los fotones de hasta unos pocos  $MeV$ , la energía se transfiere principalmente mediante tres fenómenos posibles: efecto fotoeléctrico, dispersión Compton o producción de pares.

En una situación ideal, suponiendo que se coloca una fuente monoenergética de rayos  $\gamma$  frente a un detector de radiación y que la energía de los rayos  $\gamma$ , ( $E_\gamma$ ), es menor a  $1,022 MeV$ , de modo que no se produce formación de pares. En este caso, las principales interacciones de los rayos  $\gamma$  con el cristal detector serán absorción fotoeléctrica y dispersión Compton.

La mayoría de las interacciones fotoeléctricas resultan en el depósito completo de la energía de los rayos  $\gamma$  en el centellador y las amplitudes de los pulsos originados son directamente proporcionales a  $E_\gamma$ . Con un detector ideal, esto produciría una única línea estrecha en el espectro, llamada fotopico, en una ubicación correspondiente a la energía de los rayos  $\gamma$  ( $E_\gamma$ ) como se representa en la Figura 4.8.

En la dispersión Compton, solo una parte de la energía de los rayos  $\gamma$  se transfiere al detector a través del electrón de retroceso Compton. Si el rayo  $\gamma$  disperso también es absorbido en el detector vía efecto fotoeléctrico, el evento produce un pulso en el fotopico, mientras que si el rayo  $\gamma$  disperso se escapa, la energía depositada en el detector es menor que  $E_\gamma$ , variando desde cero (dispersión de ángulo pequeño), hasta un valor máximo  $E_c$ , (dispersión a  $180^\circ$ ). El espectro ideal incluye una distribución continua de pulsos cuyas amplitudes van desde casi cero hasta una amplitud máxima correspondiente a la energía dada por la ecuación 4.7.

$$E_c^{m\acute{a}x} = \frac{(h\nu)^2}{(h\nu + 0,2555 \text{ MeV})} \quad 4.7$$

Por lo tanto, el efecto Compton se verá reflejado en la función respuesta del detector, contribuyendo al espectro con un continuo denominado meseta Compton. El punto donde finaliza la meseta Compton, es el punto de energía máxima y se conoce como borde Compton. Otra posibilidad es que un rayo  $\gamma$  dispersado experimente interacciones adicionales de dispersión en el detector. Múltiples eventos de dispersión Compton producen la distribución de pulsos en el valle entre el borde Compton y el fotopico (Figura 4.8).

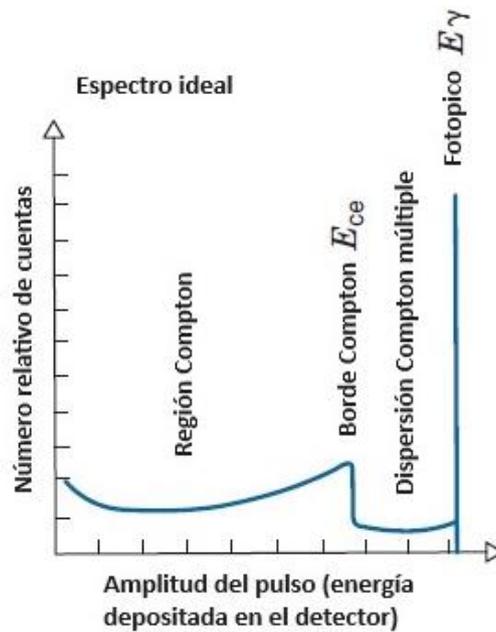


Figura 4.8: Espectro de rayos ideal. Número de cuentas vs amplitud (o canales). Sólo el fotopico representa la deposición de toda la energía del rayo  $\gamma$  en el detector. [2]

En la práctica, el espectro real obtenido difiere significativamente del ideal representado en la Figura 4.8. Para ilustrar esta discrepancia, se muestra la comparación con la situación real en la Figura 4.9 donde se puede distinguir el aporte de cada proceso de interacción a la función respuesta del detector.

Las líneas y bordes definidos en el espectro ideal (línea celeste) se convierten en líneas ampliadas y bordes redondeados (línea punteada naranja) en los espectros reales. En este caso, el espectro presenta un notable ensanchamiento en el fotopico en lugar de una "línea" delgada, aproximándose a una curva gaussiana, mientras que el borde Compton aparece redondeado. Este fenómeno se debe a la imperfecta resolución energética del detector de  $INa(Tl)$  [2].

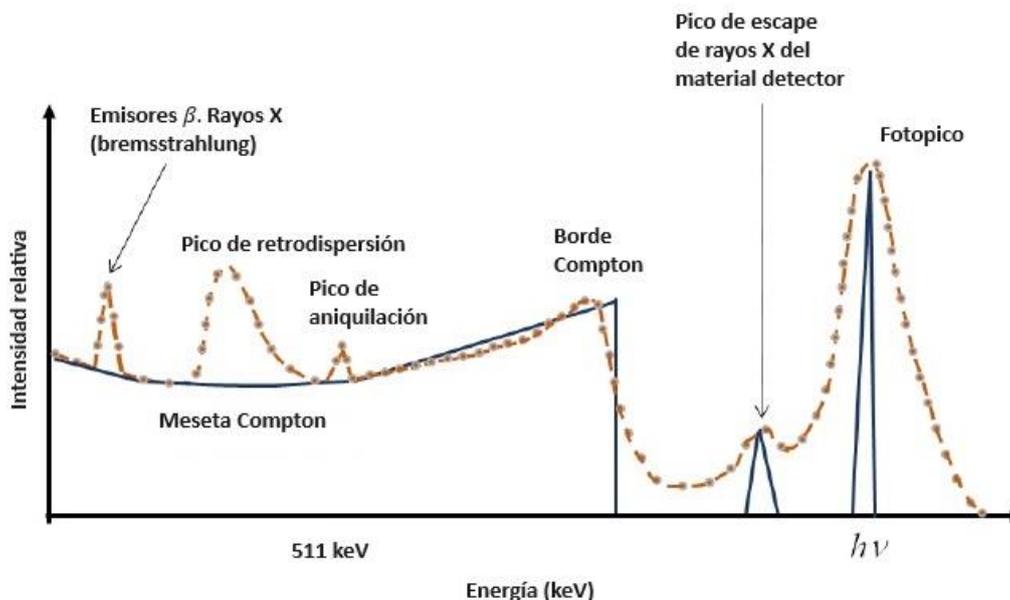


Figura 4.9: Espectro gamma simple real registrado con un detector de INa (TI). [19]

En los espectros experimentales, es posible observar efectos secundarios que surgen debido a la interacción de la radiación emitida por la muestra con elementos externos al detector. Se pueden destacar los efectos asociados a la detección de fotones  $\gamma$  que, previo a su interacción con el detector, fueron dispersados en materiales cercanos a él. Esto resulta en la presencia de radiación  $\gamma$  con una energía menor a la emitida inicialmente por la fuente, originada en procesos de dispersión Compton fuera del detector, y que luego incide sobre él, dando lugar al llamado pico de retrodispersión o backscatter peak. Este fenómeno ocurre cuando se detectan rayos  $\gamma$  que han experimentado una dispersión de  $180^\circ$  en el medio ingresando luego al detector [19].

En lo que respecta a las características propias del proceso de decaimiento que contribuyen al espectro, se pueden señalar: primero, los rayos X característicos emitidos durante el decaimiento del radionucleido; segundo, los rayos X producidos por la interacción de la radiación  $\gamma$  con materiales que rodean al detector; y tercero, la radiación de bremsstrahlung.

Otro aspecto relevante que debe considerarse en el espectro es la aparición de picos originados por la detección de radiación de aniquilación, conocido como pico de aniquilación. En este caso, un positrón proveniente del decaimiento  $\beta^+$  se aniquila con un electrón del entorno del detector, produciendo dos rayos  $\gamma$  de  $511 \text{ keV}$  [20]. Además, es posible identificar otra estructura denominada pico de escape de iodo, el cual se genera por interacciones de absorción fotoeléctrica con átomos del cristal [2].

Existen consideraciones importantes que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar el espectro. Entre las más relevantes se pueden mencionar los efectos del tamaño del detector, la tasa de conteo y la linealidad energética. En el primer caso, cuanto mayor sea el tamaño del cristal del detector, es más probable que los fotones secundarios sean absorbidos en el cristal. En consecuencia, al aumentar el tamaño del cristal, aumenta el número de eventos en las

regiones del fotopico en comparación con las regiones de Compton. Respecto a la tasa de conteo, las distorsiones del espectro ocurren a altas velocidades de conteo como resultado de la superposición de los pulsos de salida del detector. La acumulación entre eventos de fotopico y eventos de menor energía provoca un ensanchamiento del fotopico. La linealidad de la energía se refiere a la proporcionalidad entre la amplitud del pulso de salida y la energía absorbida en el detector. La mayoría de los sistemas  $INa(Tl)$  presentan una linealidad aceptable para energías entre  $0,2 - 2 MeV$  [2].

#### 4.5. SISTEMA EXPERIMENTAL

En la presente sección, se realiza una detallada descripción de los elementos utilizados en el desarrollo experimental del presente Trabajo de Diploma. Se comienza con la caracterización de las fuentes radiactivas empleadas, seguida por la representación detallada del sistema de espectroscopía utilizado, incluyendo todos sus componentes.

##### 4.5.1. Fuentes patrones y sus espectros

Para desarrollar esta experiencia, fueron utilizadas diferentes fuentes radiactivas patrón fabricadas por Spectrum Techniques, algunas de las cuales se muestran en la Figura 4.10. Las energías y actividades asociadas a cada fuente radiactiva se detallan en la Tabla 4.2.

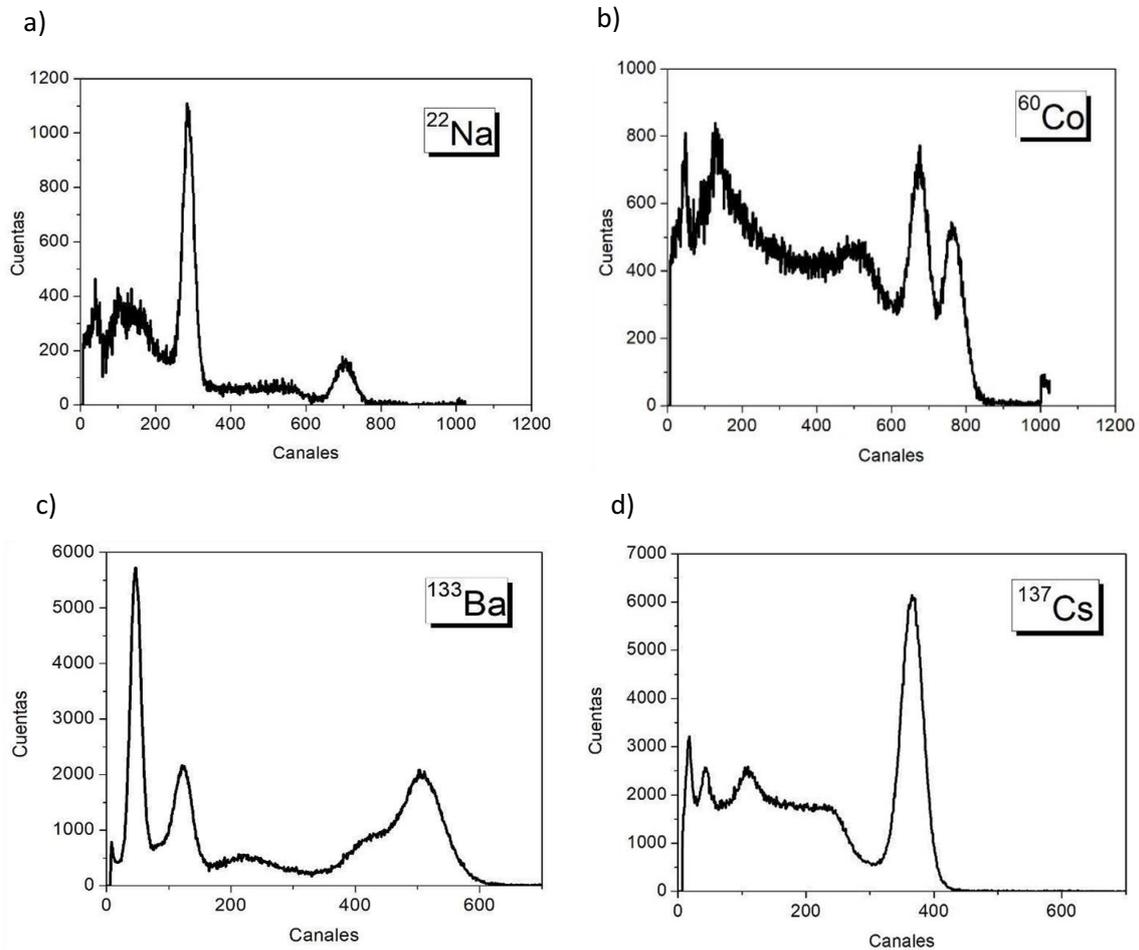


Figura 4.10: Dos de las fuentes radiactivas patrón utilizadas en este trabajo.

ELEMENTO	ENERGÍA (keV)	ACTIVIDAD ( $\mu\text{Ci}$ )	FECHA
$^{22}\text{Na}$	511 y 1274	1	Junio 2011
$^{60}\text{Co}$	1170 y 1330	1	Octubre 2021
$^{133}\text{Ba}$	31, 81 y 356	10	Septiembre 2021
$^{137}\text{Cs}$	661,62	1	Mayo 2011
$^{241}\text{Am}$	59	13,1	Abril 1975

Tabla 4.2: Fuentes radiactivas patrón con sus correspondientes energías y actividades.

A continuación, en las Figuras 4.11 a), b), c), d) y e), se presentan los espectros gamma simple registrados de cada una de las fuentes radiactivas utilizadas.



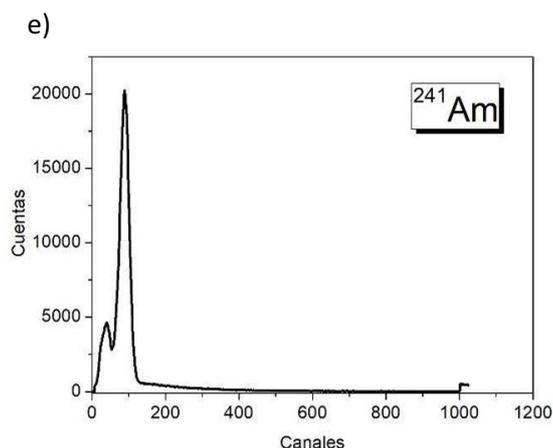


Figura 4.11: Espectros gamma simple de: a)  $^{22}\text{Na}$ , b)  $^{60}\text{Co}$ , c)  $^{133}\text{Ba}$ , d)  $^{137}\text{Cs}$  y e)  $^{241}\text{Am}$ .

## 4.5.2. Descripción y desarrollo experimental

### 4.5.2.1. Descripción del equipamiento

En este trabajo, el equipamiento empleado para llevar a cabo la espectroscopía gamma simple está ilustrado esquemáticamente en la Figura 4.12. Para registrar los espectros del absorbente de PHE, dadas las dimensiones de las pastillas fabricadas fue necesaria la incorporación de un colimador entre el absorbente y la fuente. Para el resto de los materiales propuestos, el colimador no fue utilizado.

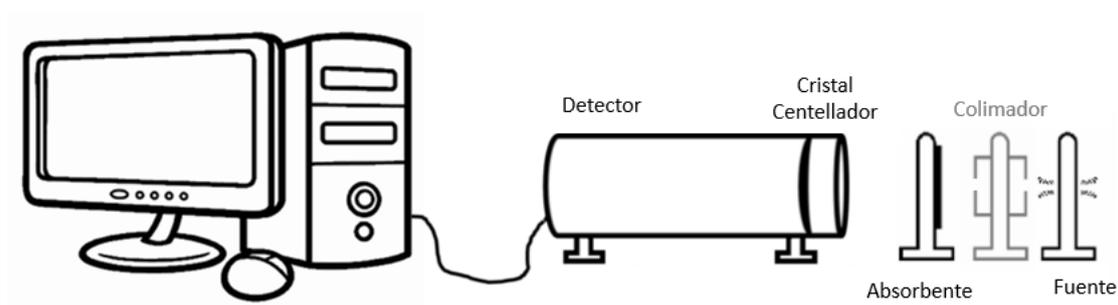


Figura 4.12: Esquema del dispositivo experimental utilizado para obtener los espectros gamma simple.

En todos los casos, cada fuente radiactiva fue colocada en un soporte diseñado y fabricado específicamente para este trabajo, que permitió que las fuentes quedaran enfrentadas y paralelas al detector, tal como se muestra en la Figura 4.12. El sistema detector empleado

consiste en un cristal semiconductor de ioduro de sodio dopado con talio ( $INa(Tl)$ ), solidario a un fotomultiplicador.

Dicho detector se conectó a una cadena electrónica convencional, pasando primero por un preamplificador donde la señal fue aumentada y normalizada, para luego ser amplificada por un amplificador. La señal de salida resultante ingresa luego a un analizador multicanal (MCA) donde se construye un histograma de cuentas versus canales de acuerdo con la altura del pulso.

Durante un tiempo pre-fijado, el sistema continúa registrando eventos o cuentas por cada emisión gamma recibida de la fuente. Como resultado se obtiene una distribución del número de cuentas acumuladas en cada canal, en una cierta cantidad de tiempo. Debido a que la amplitud del pulso de salida es proporcional a la energía del fotón incidente, es posible reproducir el espectro de distribución de energía de la fuente radioactiva.

El dispositivo electrónico utilizado se configuró con los siguientes parámetros: ganancia 200 o 500 dependiendo el caso (Tabla 4.3), tiempo de medida 900 s para todas las fuentes utilizadas y -2000 V de voltaje.

Se utilizó el programa Maestro (Ortec), que permitió obtener los espectros para cada fuente de manera directa, al construir un histograma con los números de cuentas por canal.

<i>ELEMENTO</i>	<i>GANANCIA</i>
$^{22}Na$	200
$^{60}Co$	200
$^{133}Ba$	500
$^{137}Cs$	200
$^{241}Am$	500

Tabla 4.3: Ganancia utilizada para cada fuente radiactiva.

Para cada material analizado, se obtuvo una serie de espectros en las mismas condiciones, que incluían:

- El registro del fondo
- Un espectro de emisión de la fuente
- Al menos 5 espectros interponiendo diferentes espesores del material absorbente.

Los datos experimentales fueron analizados con el programa Origin. De esta manera, se obtuvieron gráficos de  $\ln(I_0/I)$  vs  $x$ , donde  $I_0$  e  $I$  representan la intensidad del haz incidente y

transmitido respectivamente y  $x$  representa el espesor del material absorbente. Posteriormente, a partir de un ajuste lineal de cada uno de estos gráficos se calculó un valor de  $\mu$  para una energía determinada. Finalmente, se construyeron gráficas de  $\mu$  vs energía utilizando estos valores obtenidos. El procedimiento se ilustra en la Figura 4.13. Se muestra a modo de ejemplo el correspondiente gráfico para la fuente  $^{22}\text{Na}$  para la energía de 511 keV.

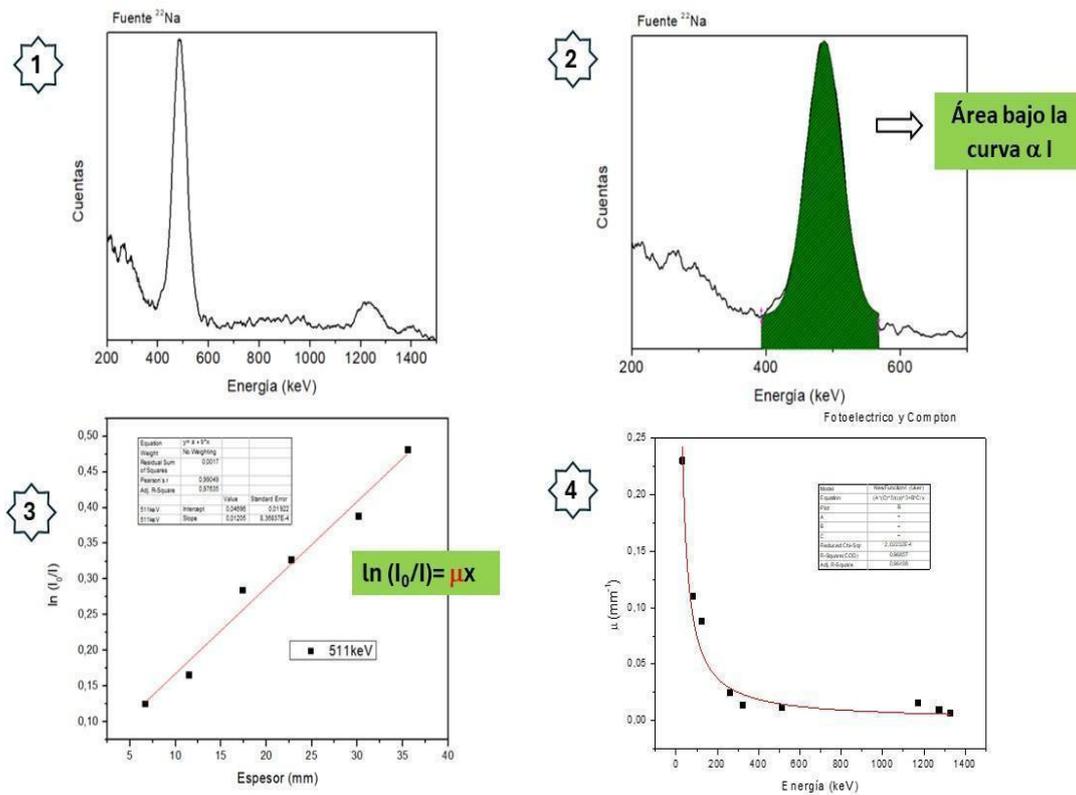


Figura 4.13: Esquema del procedimiento para obtener el coeficiente de atenuación lineal de PHE para una fuente de  $^{22}\text{Na}$ .

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

#### 5.1.1. Difracción de Rayos X

Para llevar a cabo una caracterización del polvo de Horno de Arco Eléctrico (PHE) como residuo industrial y abordar su posibilidad de reúso a través de su incorporación en los absorbentes propuestos en el presente trabajo, se realizó un estudio de sus propiedades utilizando la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). Este análisis permitió identificar la composición mineralógica del polvo, siendo fundamental para comprender la naturaleza del residuo [22].

En la Figura 5.1, se presenta el patrón DRX correspondiente al polvo utilizado. Se observan picos que coinciden con la fase magnetita, así como con el hierro. Además, se identifican pequeños picos asignados a óxido de zinc ( $ZnO$ ), cuarzo ( $SiO_2$ ), óxido y sulfuro de plomo ( $PbO$  y  $Pb$ ). Debido a la compleja composición química del PHE, también es posible que existan otras fases cristalinas minoritarias. Sin embargo, no se encuentran en la Figura 5.1 debido a su menor intensidad, así como a la superposición de los picos en el patrón de DRX.

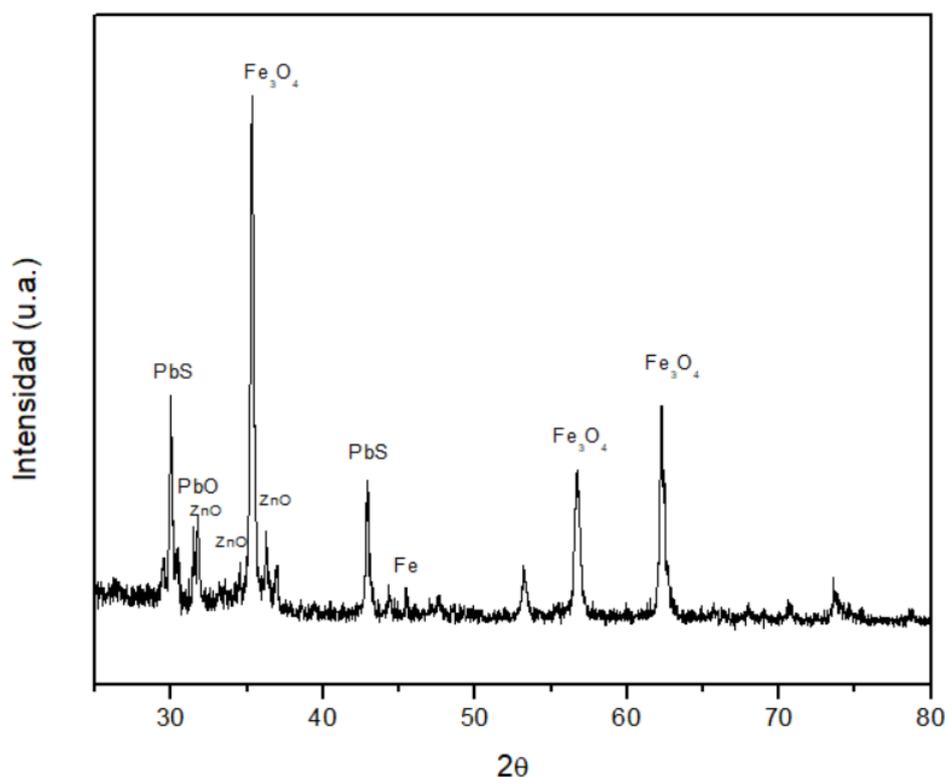


Figura 5.1: Patrón de Difracción de Rayos X de la muestra de PHE.

### 5.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En la Figura 5.2 se presentan las micrografías SEM capturadas. En ellas se evidencia la presencia de una variedad de partículas con diversas formas y tamaños. Además, se identifican algunas fibras que, según el análisis químico, podrían atribuirse a residuos vegetales o vidrio. Este material exhibe una notable heterogeneidad en su composición.

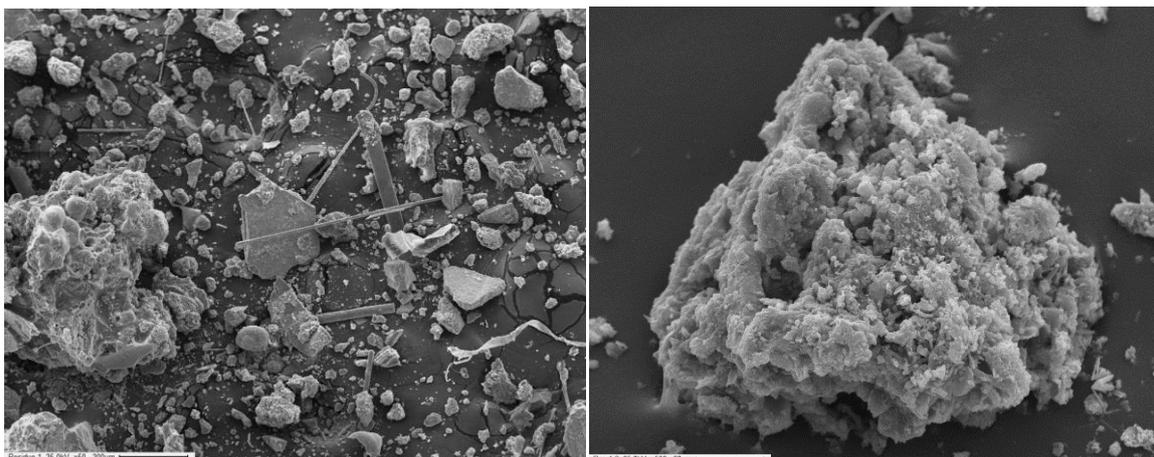


Figura 5.2: Micrografías SEM de la muestra de PHE.

El análisis químico mediante Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS) del material estudiado, se detalla en la Tabla 5.1. Según la bibliografía [23], la composición química de estos materiales depende de varios factores, como la calidad de la chatarra de acero procesada, el tipo de acero que se produce, los requisitos tecnológicos, las condiciones de funcionamiento y el grado de retorno de polvo al proceso. Sofilić et al. informaron que los elementos predominantes en PHE muestran las siguientes concentraciones: *Fe* 10–45%, *Zn* 2–46%, *Pb* 0,40–15,14%, *Cr* 0,2–11%, *Cd* 0,01–0,30%, *Mn* 1–5%, *Cu* < 3%, *Si* 1–5%, *Ca* 1–25%, *Mg* 1–12%, *Al* 0,1–1,5%, *C* 0,11–2,36%, *S* 1,5–2,5%, *Na* 0,5–1,8%, *K* 0,35 –2,30% [22].

La composición química del residuo utilizado en este trabajo se encuentra en concordancia con lo reportado en los trabajos mencionados siendo el *Fe*, *Zn* y *O* los elementos mayoritarios.

ELEMENTO	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Zn
% Peso	17,0	22,7	7,1	1,4	0,4	2,0	2,2	1,0	2,5	10,4	1,3	20,3	11,7

Tabla 5.1: Composición química del polvo de Horno Eléctrico.

### 5.1.3. Densidad de cada material absorbente

Finalmente, se determinó el valor de la densidad para cada uno de los absorbentes fabricados. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.2. La densidad de PHE se sitúa en  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , en marcado contraste con la densidad de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  que alcanza los  $5,2 \text{ g/cm}^3$  [24]. Esta disparidad podría explicarse por la presencia de restos vegetales y vidrio en el polvo puro, como se describió en detalle anteriormente.

<i>ABSORBENTE</i>	$\rho(\text{g/cm}^3)$
PHE	2,7
C	1,4
PHE-C	2,0
S	1,5
3PHE-S	1,7
10PHE-S	1,8
20PHE-S	1,9

Tabla 5.2: Densidad calculada para cada absorbente.

Con respecto a los valores de densidad de los materiales basados en cemento y silicona, se observa un leve aumento de la densidad luego de la incorporación de PHE. Este fenómeno puede ser atribuido a la naturaleza de los componentes presentes en el PHE que, al integrarse con los otros materiales, contribuyen al incremento global de la densidad.

Cabe mencionar también, que, si bien los valores obtenidos para las densidades del cemento, silicona y los materiales derivados de ellos son similares entre sí, las propiedades mecánicas de estos dos grupos son bien diferentes. En particular, las siliconas tienen uso limitado para la manufactura de elementos estructurales por sí mismas, pero poseen algunas características importantes como su excelente capacidad para conformar piezas geoméricamente complejas.

## 5.2. ESPECTROSCOPIA GAMMA SIMPLE

En esta sección se detallan los resultados obtenidos por espectroscopía gamma simple a fin de dar cumplimiento al objetivo general del presente Trabajo de Diploma. Inicia con una descripción de la calibración en energía obtenida experimentalmente para las ganancias de 200 y 500 utilizadas. A continuación, se exponen los resultados obtenidos con las fuentes radiactivas de la Tabla 4.2 para cada absorbente propuesto, considerando tanto los materiales comerciales puros como aquellos enriquecidos con PHE. Para todos los absorbentes estudiados se evaluó el coeficiente de atenuación lineal para cada una de las energías utilizadas a través de la Ley de Lambert-Beer, obteniendo luego el coeficiente de atenuación lineal en función de la energía. Asimismo, con el propósito de evaluar la eficacia de los materiales propuestos, se realizó una comparación entre la absorción de estos materiales con la correspondiente a una lámina de Pb de 0,5 mm de espesor.

### 5.2.1. Calibración en energía

La calibración en energía es un procedimiento esencial para los experimentos de espectroscopía gamma, cuyo objetivo consiste en asignar valores de energía específicos a cada canal. Este proceso se lleva a cabo empleando fuentes radiactivas que emiten fotones de energías características, lo que permite la correlación entre el número del canal registrado y la energía del fotón detectado.

En este trabajo, se tomaron en cuenta los valores de energía de los fotopicos detallados a continuación. Para la ganancia de 500, fueron considerados los picos de energía de 31, 81 y 356 keV provenientes de la fuente radiactiva de  $^{133}\text{Ba}$ . Por otro lado, para la ganancia de 200, se utilizaron los picos de energía de 511 y 1274 keV de la fuente de  $^{22}\text{Na}$ , y el de 661,62 keV de  $^{137}\text{Cs}$ . A fin de determinar el canal correspondiente al máximo de intensidad de cada fotopico, se ajustó cada curva con una función gaussiana. Las rectas de calibración para las ganancias de 200 y 500 se muestran en la Figura 5.3 a) y b) respectivamente.

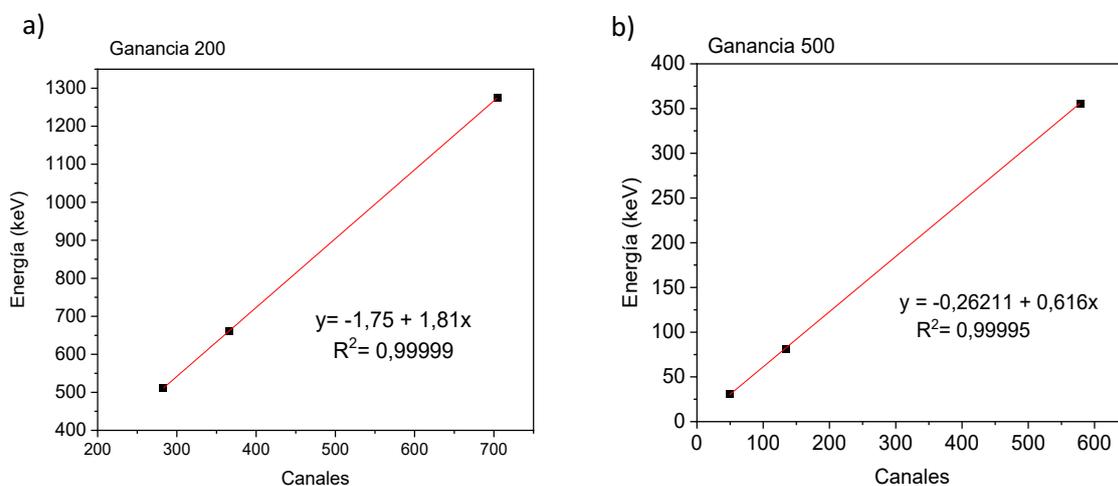


Figura 5.3: Rectas de calibración en energía para ganancias a) 200, b) 500.

## 5.2.2. Resultados y discusión de Polvo Puro (PHE)

La Figura 5.4 presenta los espectros gamma simple obtenidos para las fuentes radiactivas de  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{241}\text{Am}$ . Cada espectro muestra la intensidad de los fotopicos en función de la energía, donde el espesor del material absorbente es representado por diferentes colores. En todos los casos, la línea continua negra indica el espectro medido para la fuente sin absorbente, mientras que los demás colores corresponden a absorbentes de diferentes espesores: 1,56 mm (roja); 2,73 mm (azul); 4,25 mm (rosa); 6,11 mm (verde); 7,39 mm (naranja).

En líneas generales se observa que, al aumentar el espesor del material absorbente, la intensidad de los picos gamma disminuye, con variaciones que dependen de la energía específica de cada fotopico. Este patrón puede observarse en el pico de 511 keV de la fuente radiactiva de  $^{22}\text{Na}$  (Figura 5.4 a)), así como en los picos de 31 y 81 keV del  $^{133}\text{Ba}$  (Figura 5.4 b)),  $^{137}\text{Cs}$  (Figura 5.4 c)) y  $^{241}\text{Am}$  (Figura 5.4 d)), que también exhiben comportamientos similares.

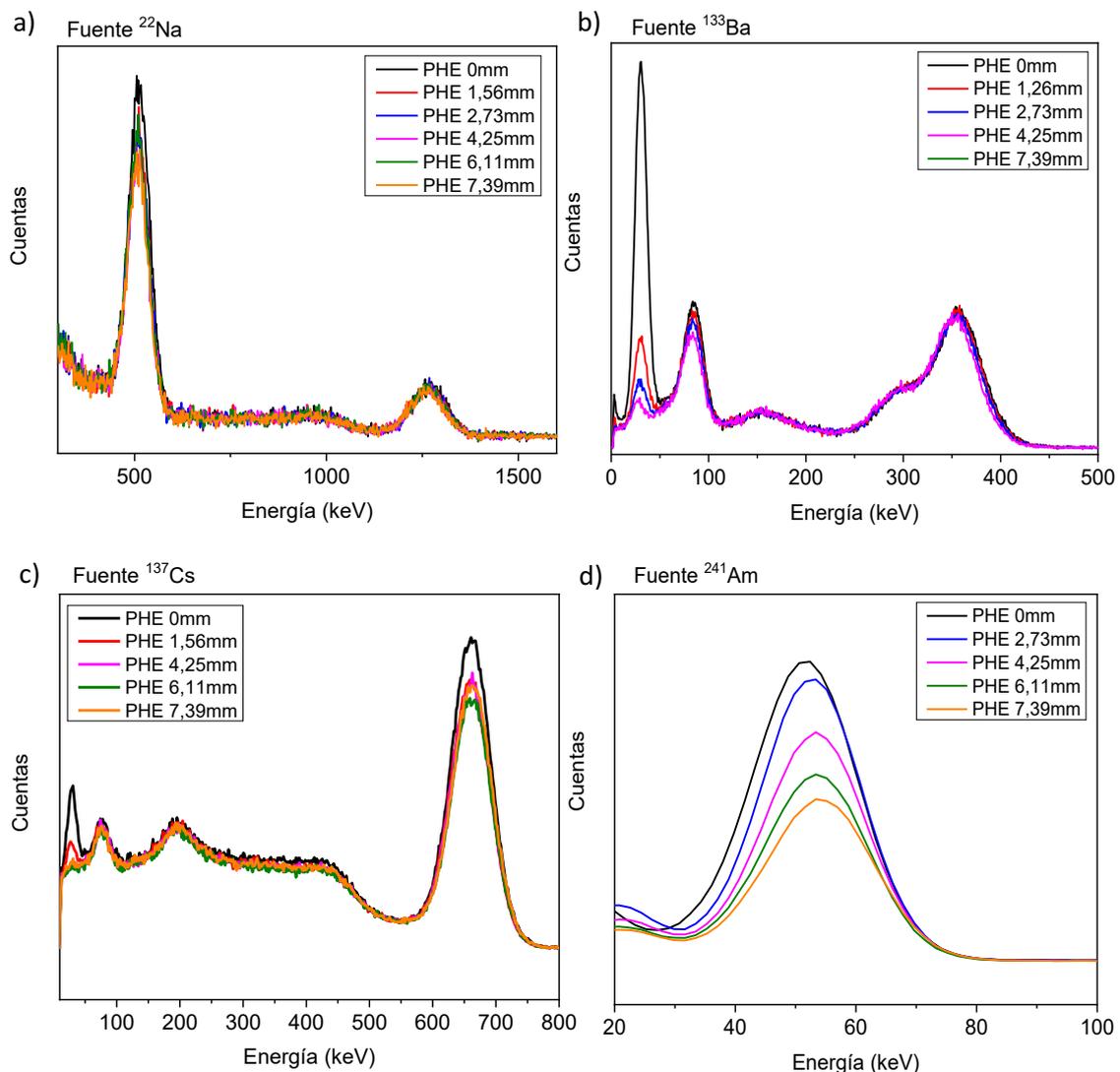


Figura 5.4: Espectros gamma simple obtenidos para el absorbente PHE utilizando a)  $^{22}\text{Na}$ , b)  $^{133}\text{Ba}$ , c)  $^{137}\text{Cs}$  y d)  $^{241}\text{Am}$ .

Utilizando la Ley de Lambert-Beer para el caso ideal (Ecuación 3.17), se determinó el coeficiente de atenuación lineal  $\mu$  del PHE para cada una de las energías. A partir de esos valores se realizó el gráfico del coeficiente de atenuación lineal versus la energía. Dado que tal como se ha mencionado anteriormente en el rango de energías analizado, los principales procesos de interacción de la radiación con la materia incluyen dispersión Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares, se propuso una función de ajuste de los datos que incluya estos 3 procesos. Dicha función depende de la energía y del número atómico  $Z$  (expresiones 3.10, 3.15, 3.16) y se muestra con una línea continua roja en la Figura 5.5. El coeficiente de atenuación lineal presenta un comportamiento típico de los materiales frente a la radiación ionizante [2].

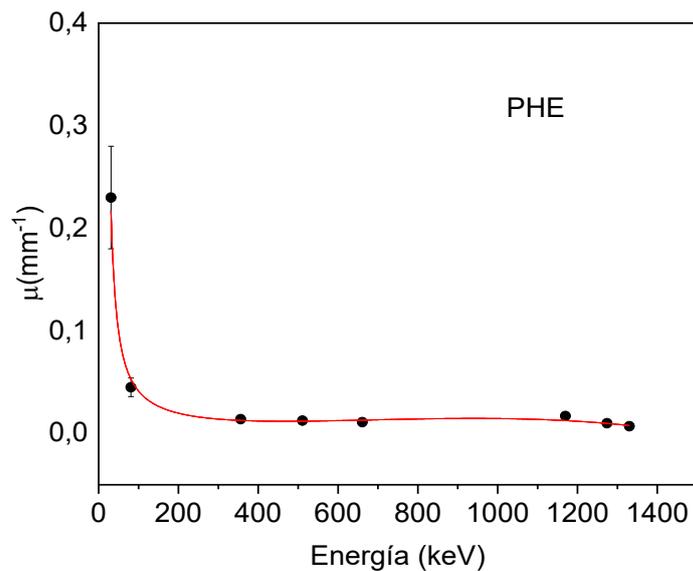


Figura 5.5: Coeficiente de atenuación lineal obtenido para PHE. La curva roja representa el resultado del ajuste con la combinación de los procesos dispersión Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares.

Considerando entonces el potencial uso del PHE como absorbente, se decidió investigar su integración en materiales que puedan ser utilizados en protección radiológica con el objetivo de evaluar su desempeño y determinar su viabilidad en aplicaciones prácticas.

### 5.2.3. Resultados y discusión de Polvo de Horno de Arco Eléctrico + Cemento (PHE-C)

Con el fin de evaluar la respuesta de este nuevo material absorbente ante diversas energías se registraron los espectros gamma simple de todas las fuentes radiactivas patrón de la Tabla 4.2. Tal como se procedió con el PHE, estas medidas se registraron sin absorbente y con diferentes espesores de PHE-C interpuesto entre la fuente y el detector. En la Figura 5.6 se presentan los espectros gamma simple obtenidos correspondientes a las fuentes radiactivas de a)  $^{22}\text{Na}$ , b)  $^{60}\text{Co}$ , c)  $^{133}\text{Ba}$ , d)  $^{137}\text{Cs}$  y e)  $^{241}\text{Am}$ . En todos los casos la línea continua negra representa la fuente sin absorbente, mientras que los colores indican los diferentes espesores

del absorbente utilizado: 6,62 mm (rojo), 11,76 mm (azul), 17,88 mm (rosa), 23,31 mm (verde), 30,12 mm (naranja) y 35,54 mm (violeta).

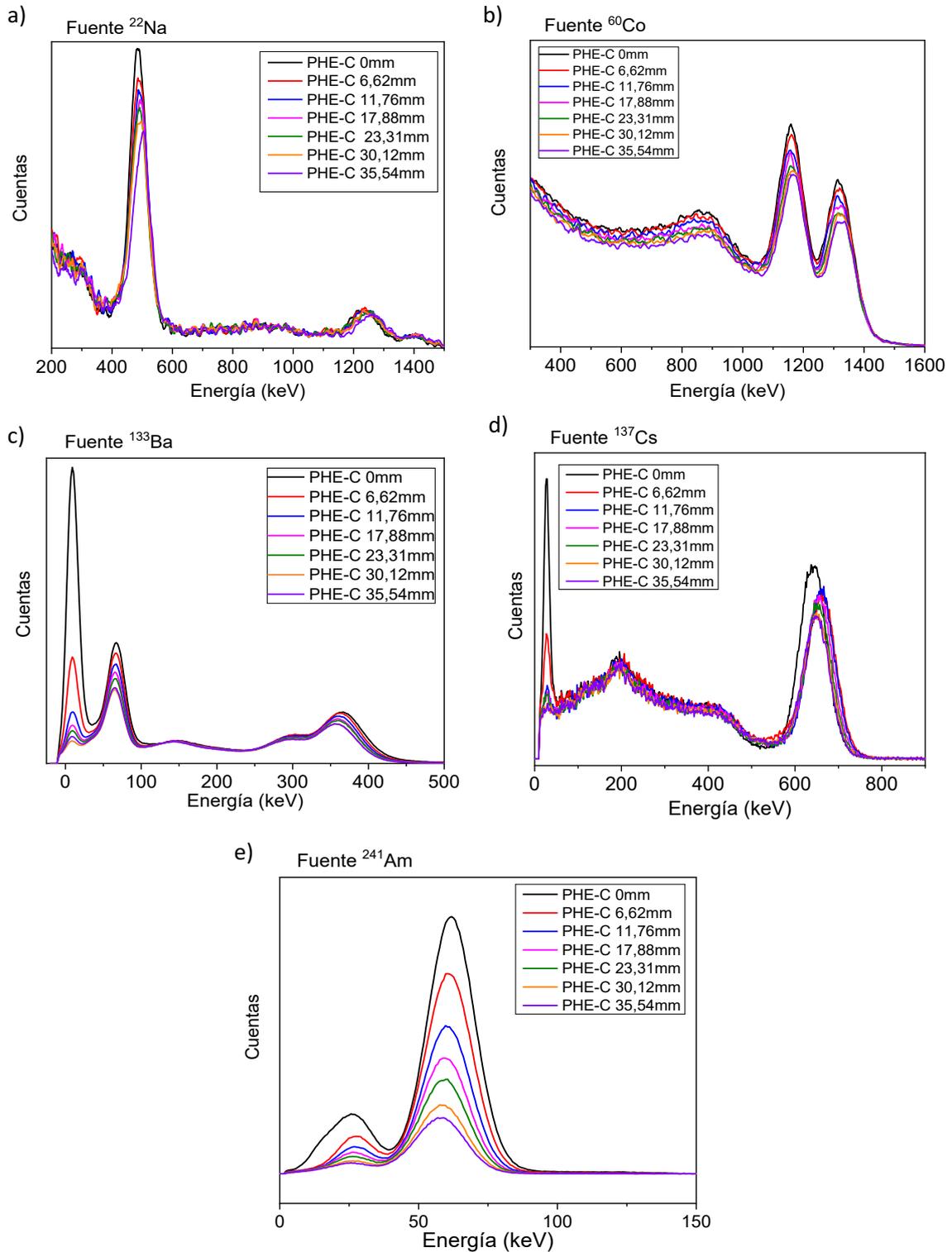


Figura 5.6: Espectros gamma simple obtenidos para el absorbente PHE-C utilizando a)  $^{22}\text{Na}$ , b)  $^{60}\text{Co}$ , c)  $^{133}\text{Ba}$ , d)  $^{137}\text{Cs}$  y e)  $^{241}\text{Am}$ .

Por último, y siguiendo el procedimiento ya descrito en la sección anterior, para cada energía se determinó el coeficiente de atenuación lineal de este absorbente. Los resultados obtenidos junto con el ajuste (línea continua roja) que combina los procesos de interacción con la radiación se muestran en el gráfico de la Figura 5.7 a) y b). Puede observarse el comportamiento típico de este coeficiente en función de la energía.

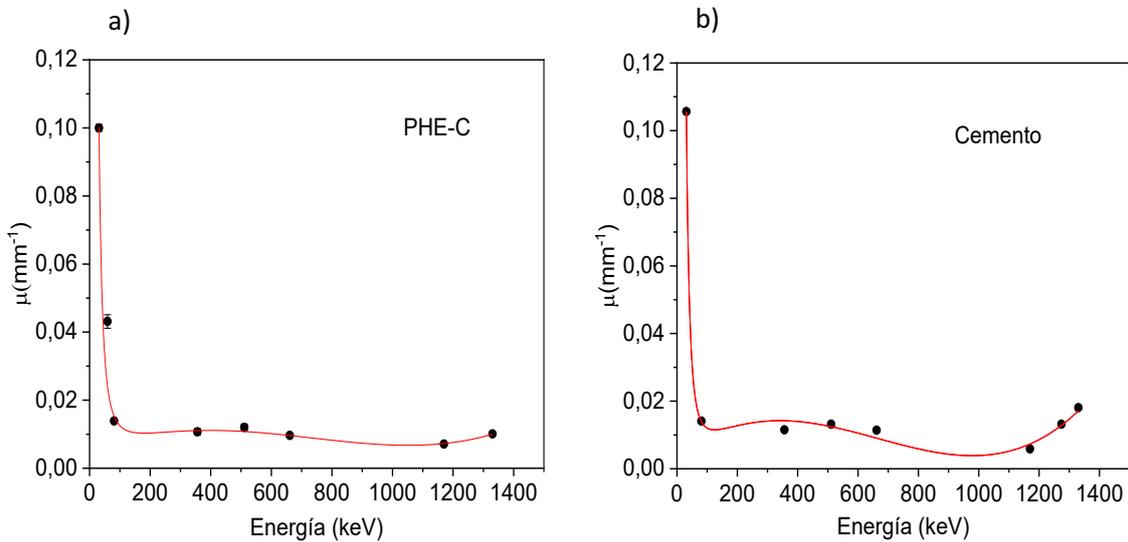


Figura 5.7: Coeficiente de atenuación lineal obtenido para a) PHE-C y b) C. La curva roja representa el resultado del ajuste con la contribución de los procesos dispersión Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares

El diseño de blindajes adecuados para aplicaciones médicas, es un tema de interés en el último tiempo. Con el objetivo de evaluar la eficacia del material propuesto como potencial blindaje estructural, se realizaron estudios comparativos entre absorbentes de PHE-C y aquellos fabricados sin la adición de PHE. Los resultados se presentan en la Figura 5.8 que corresponde a los espectros gamma simple de  $^{133}\text{Ba}$  (a) y  $^{137}\text{Cs}$  (b). En estos gráficos, la línea continua negra representa la fuente sin absorbente, mientras que las líneas continuas indican los diferentes espesores del absorbente PHE-C utilizado: 6,62 mm (rojo) y 11,76 mm (azul); y las líneas punteadas representan el absorbente sin agregado de polvo (indicado como "C"), con espesores de 4,20 mm (rojo) y 9,11 mm (azul).

Para ambos materiales se evidencia una notable atenuación a bajas energías (menores 150 keV), con una disminución en la capacidad de absorción a medida que se incrementa la energía.

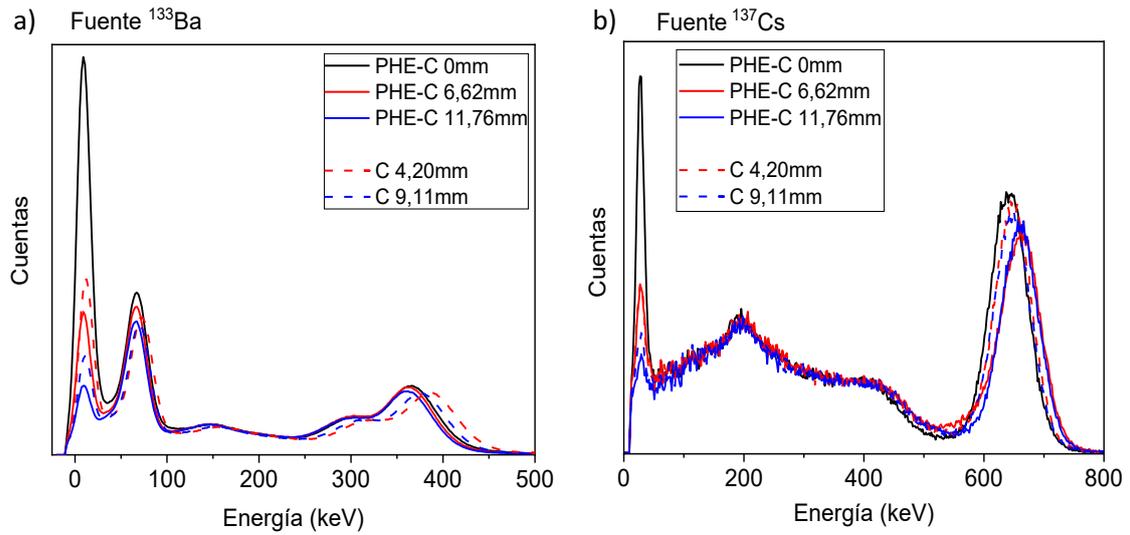


Figura 5.8: Comparación de absorción de PHE-C vs C utilizando a)  $^{133}\text{Ba}$  y b)  $^{137}\text{Cs}$ .

A continuación, en la Tabla 5.3 se presentan los valores de los coeficientes de atenuación lineal obtenidos para PHE-C y C. En el rango de energías analizado y para la proporción de PHE incorporada, los valores de  $\mu_{\text{PHE-C}}$  y  $\mu_{\text{C}}$  no presentan diferencias significativas.

ENERGÍA (keV)	$\mu_{\text{PHE-C}} (\text{mm}^{-1})$	$\mu_{\text{C}} (\text{mm}^{-1})$
31	0,1000 ± 0,0200	0,1056 ± 0,0004
81	0,0139 ± 0,0005	0,0141 ± 0,0003
356	0,0107 ± 0,0009	0,0115 ± 0,0004
511	0,0120 ± 0,0010	0,0131 ± 0,0004
661,62	0,0096 ± 0,0004	0,0114 ± 0,0004
1170	0,0071 ± 0,0004	0,0058 ± 0,0003
1330	0,0101 ± 0,0004	0,0180 ± 0,0004

Tabla 5.3: Coeficiente de atenuación lineal obtenido para PHE-C Y C.

En síntesis, hasta este punto se ha explorado la posibilidad de mejorar las propiedades de protección contra la radiación ionizante del cemento mediante la incorporación de residuos de la industria metalúrgica. En sintonía con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se han

reportado en bibliografía diversas investigaciones enfocadas a la utilización de alternativas que combinen las excelentes propiedades mecánicas y de protección radiológica, junto con criterios de rentabilidad y sostenibilidad, tanto en cemento como en hormigón. Al respecto, se destaca el estudio realizado por Cullu y col. [25], quienes investigaron el efecto de agregar al hormigón residuos de Pb en diferentes proporciones de sustitución, combinados con barita y piedra caliza. Estos investigadores encontraron que, el agregado de residuos mejora el coeficiente de absorción con respecto a los materiales basados solamente en piedra caliza.

Por otro lado, Singh y col. [26], estudiaron las propiedades de blindaje contra la radiación gamma de hormigón con agregado de Pb y cenizas volantes frente a hormigón de cenizas volantes ordinario a diferentes energías de rayos gamma. Se ha concluido también, que el agregado de Pb a estos hormigones mejora la capacidad de blindar los rayos gamma con el mismo porcentaje de variación de cenizas volantes. Por su parte, Pomaro y col. [27], han analizado las propiedades de blindaje en hormigón con agregado de residuos de horno eléctrico. Los resultados hallados muestran que la capacidad de blindaje de estos materiales mejora con respecto al hormigón puro. Recientemente, Korkmaz y col. [28] evaluaron la capacidad de blindaje del cemento común frente al cemento con la adición de minerales (esquistos) mediante el análisis de su composición. Se observó que para energías superiores a  $660\text{ keV}$  (fuentes de  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$ ) la incorporación de grandes cantidades de minerales y el sometimiento a tratamientos térmicos mejora la capacidad de blindaje entre un 4 y 12 %. A su vez, Kurtulus y col. [29], incorporan residuos industriales ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  entre otros) para mejorar la eficiencia en blindaje del cemento ordinario. En todos estos trabajos, se llega a las conclusiones citadas por medio de simulaciones computacionales.

En el presente trabajo se determinó el coeficiente de atenuación mediante medidas experimentales, analizando el efecto de la incorporación de residuo PHE a una matriz cementicia. Los resultados obtenidos aquí revelan que la capacidad de atenuación del material PHE-C es comparable a la del cemento convencional. En este sentido es interesante señalar que la carga de material agregado es considerablemente menor a lo reportado en la bibliografía mencionada anteriormente. En consecuencia, surge la posibilidad de aumentar el contenido de PHE agregado y evaluar su capacidad de atenuación de la radiación. Por lo tanto, los materiales cementicios basados en PHE se perfilarían como un subproducto prometedor debido a su uso sostenible en el ámbito de la protección radiológica como revestimientos estructurales.

#### **5.2.4. Resultados y discusión de Polvo Horno de Arco Eléctrico + Silicona (PHE-S)**

Como parte del desarrollo de materiales para blindaje de la radiación, es importante abordar el campo de la protección personal. En este sentido, se busca fabricar materiales que superen las prestaciones de los existentes y sean adecuados para su uso en blindajes localizados. El elemento de protección personal más utilizado en la práctica clínica es el chaleco plomado, fabricado con un material flexible y una cierta cantidad de Pb incorporada para lograr una atenuación de la radiación de bajas energías equivalente a una lámina de  $0,5\text{ mm}$  de Pb. El rango

de bajas energías se corresponde a su uso para atenuar la radiación dispersa que se genera en los procedimientos de radiodiagnóstico. En consecuencia, las características que debe reunir un material que pretenda reemplazar al de los chalecos plomados actuales es que sea flexible, liviano y presente buena atenuación de los rayos X de hasta 150 keV.

La silicona es un elastómero híbrido conocido por sus excelentes propiedades térmicas y mecánicas, resistencia química, compatibilidad con cargas orgánicas e inorgánicas, es no tóxico y flexible. En este sentido, se estudió la eficiencia de PHE en una matriz de silicona como absorbente a bajas energías. En el desarrollo de este estudio se emplearon fuentes de  $^{133}\text{Ba}$  y  $^{241}\text{Am}$ . En esta etapa, se fabricaron pastillas con concentraciones de 3%, 10% y 20% de PHE (Sección 4.2).

La Figura 5.9 muestra los espectros de absorción utilizando una fuente radiactiva de  $^{241}\text{Am}$  para los absorbentes de a) 3PHE-S, b) 10PHE-S y c) 20PHE-S. En dicha Figura puede observarse una importante atenuación del pico de 59 keV, que se incrementa a medida que aumenta el espesor del material.

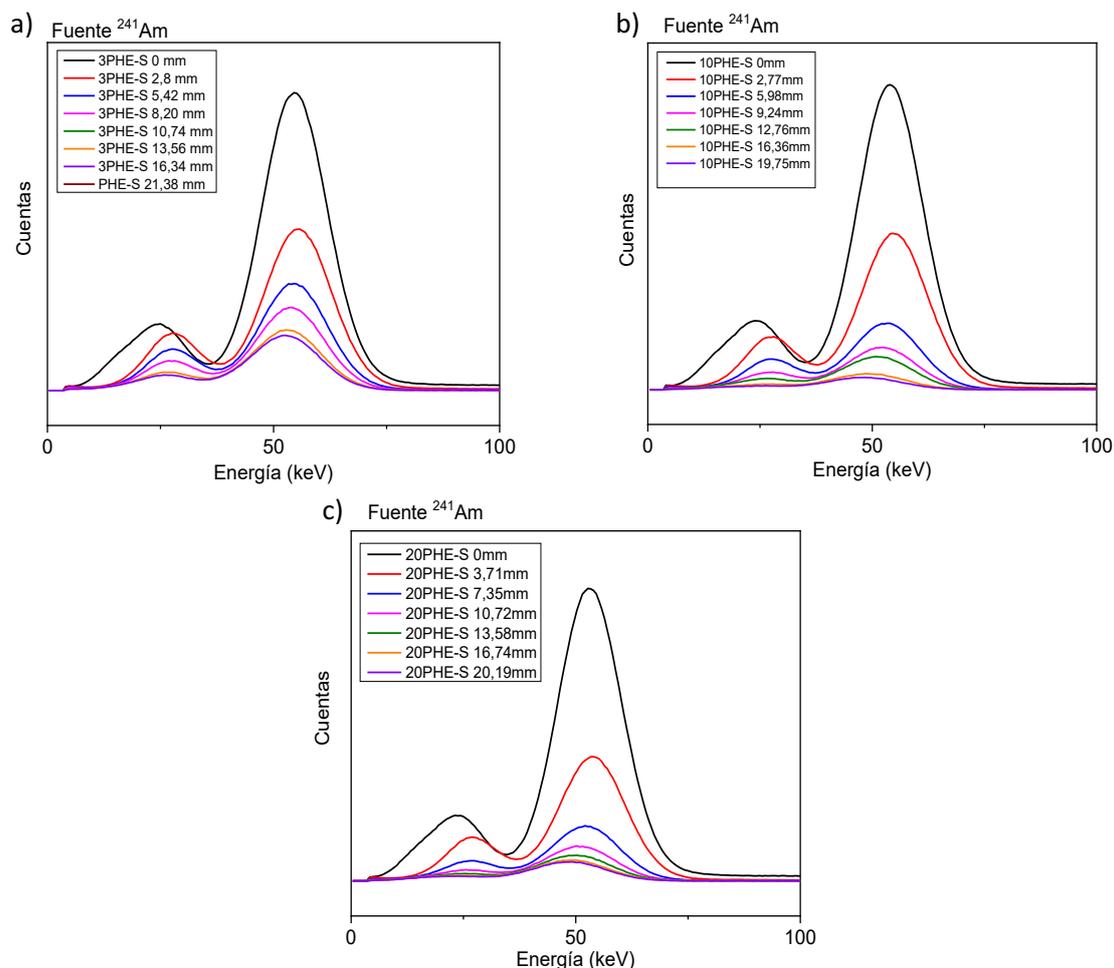


Figura 5.9: Espectros gamma simple obtenidos para los absorbentes de a) 3PHE-S, b) 10PHE-S y c) 20PHE-S utilizando  $^{241}\text{Am}$ .

Los espectros gamma simple de la fuente de  $^{133}\text{Ba}$  (Figura 5.10 a) y b)) para 10PHE-S y 20PHE-S, respectivamente, exhiben una notable atenuación de los picos de 31 y 81 keV, demostrando la capacidad de estos materiales para absorber significativamente la radiación en estas regiones energéticas. Sin embargo, no se observa atenuación para energías del orden de los 360 keV.

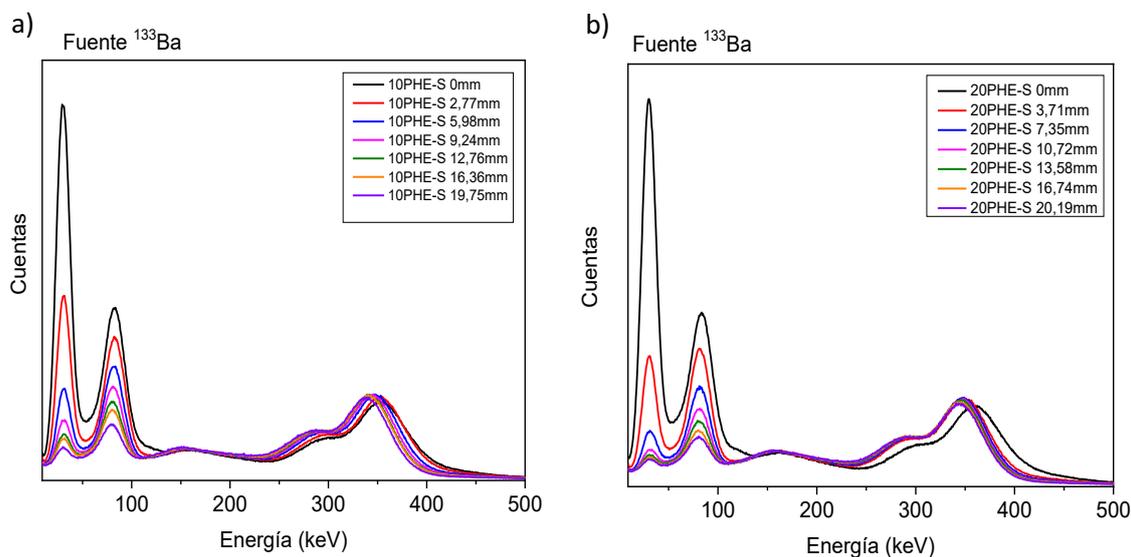


Figura 5.10: Espectros gamma simple obtenidos para los absorbentes de a)10PHE-S y b)20PHE-S utilizando  $^{133}\text{Ba}$ .

Para evaluar el impacto de la adición de PHE sobre la capacidad de absorción de la silicona, se analizó la capacidad absorbente de la silicona pura, sin PHE, utilizando una fuente de  $^{241}\text{Am}$ . A continuación, en la Figura 5.11 se muestra este análisis comparativo, donde se evalúa la eficacia del absorbente 3PHE-S (representados por la línea continua) en comparación con la silicona sin adición de polvo "S" (representada por la línea punteada). Los espectros gamma simple resultantes muestran que tanto el material 3PHE-S como S (Fig. 5.11 a)) son materiales efectivos en la absorción de la radiación en el rango de energía estudiado. Además, el análisis de las Figuras 5.11 b) y 5.11 c) revela que la adición de una mayor cantidad de PHE mejora sustancialmente la capacidad de absorción de la silicona.

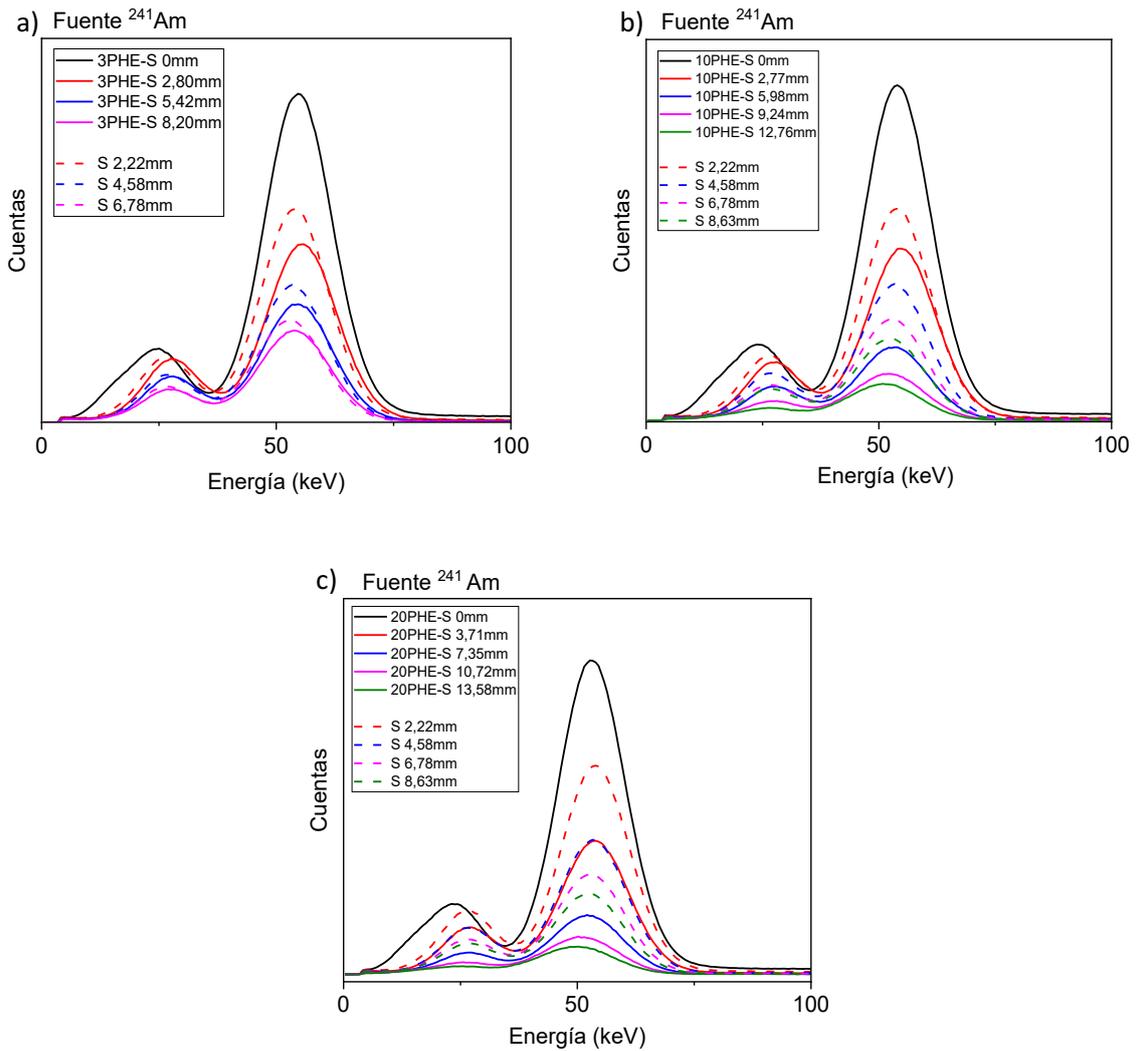


Figura 5.11: Comparación de los absorbentes de a) 3PHE-S, b) 10PHE-S y c) 20PHE-S vs Pb utilizando  $^{241}\text{Am}$ .

En la Figura 5.12, se muestran los valores obtenidos del  $\ln(I_0/I)$  para cada material versus el espesor. De la comparación de las curvas de 3PHE-S y S, se deduce que el agregado de polvo a esa concentración no resulta en una mejora significativa en la eficiencia del absorbente. Por otra parte, los resultados obtenidos para 10PHE-S y 20PHE-S, evidencian una mejora en la capacidad de absorción del material respecto del absorbente 3PHE-S. Sin embargo, las curvas correspondientes a concentraciones de 10% y 20% de PHE no presentan diferencias entre sí salvo para los mayores espesores.

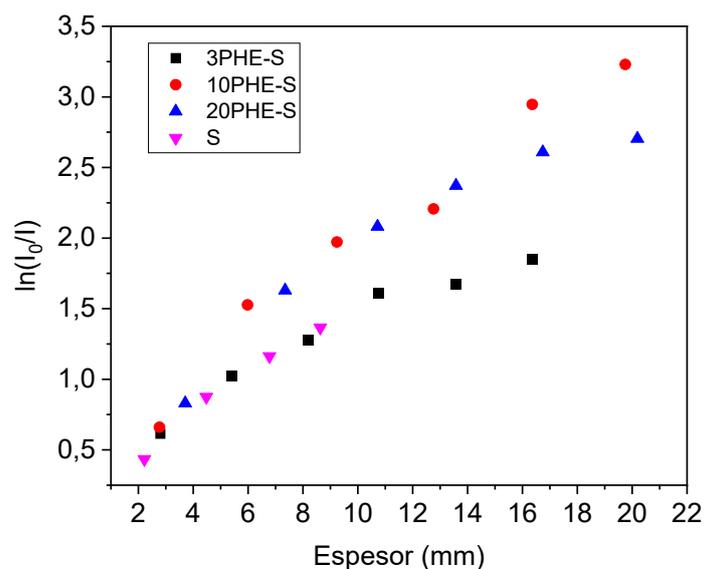


Figura 5.12:  $\ln(I_0/I)$  vs espesor para los absorbentes de S, 3PHE-S, 10PHE-S y 20PHE-S.

La tendencia observada se desvía del comportamiento lineal esperado, esta desviación del modelo de atenuación exponencial simple indica la necesidad de incorporar una corrección mediante el llamado factor de "build-up" (B). El factor de build-up es una magnitud que permite ajustar el modelo de atenuación exponencial de fotones para obtener valores reales en situaciones donde las condiciones no cumplen estrictamente con los supuestos de la Ley de Lambert-Beer [2].

Los resultados encontrados en este trabajo evidencian que el factor de build-up adquiere mayor relevancia a medida que aumenta la cantidad de PHE agregado. En vista de estas observaciones, se calculó el factor de build-up para el absorbente 20-PHE-S, permitiendo una descripción más precisa de su comportamiento de atenuación. En la Tabla 5.4, se muestran los valores de B, los cuales indican que a medida que aumenta el espesor de los absorbentes estudiados, aumenta dicho factor.

<i>ESPEJOR (mm)</i>	<i>B</i>
13,58	1,323
16,74	1,822
20,19	3,064

Tabla 5.4: Factor de build up para el absorbente de 20PHE-S.

Los valores obtenidos del coeficiente de atenuación lineal de estos absorbentes se detallan en la Tabla 5.5.

ENERGÍA (keV)	$\mu_S$ ( $mm^{-1}$ )	$\mu_{3PHE-S}$ ( $mm^{-1}$ )	$\mu_{10PHE-S}$ ( $mm^{-1}$ )	$\mu_{20PHE-S}$ ( $mm^{-1}$ )
31	---	---	$0,14 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,02$
59	$0,14 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,02$
81	---	---	$0,049 \pm 0,003$	$0,059 \pm 0,009$

Tabla 5.5: Coeficiente de atenuación lineal calculado para los absorbentes en matriz de silicona.

Al comparar los materiales 3PHE-S, 10PHE-S y 20PHE-S, se observa que la capacidad de atenuación aumenta al pasar de la concentración de 3% a 10% de PHE, indicando una mejora introducida por la adición de polvo. Sin embargo, al comparar los absorbentes 10PHE-S y 20PHE-S, no se aprecia una diferencia significativa en la atenuación de estos materiales atribuible a aumentar la concentración del PHE en un 10% y 20% en masa (Tabla 5.5). De aquí puede interpretarse que el incremento de la absorción de los materiales fabricados a partir del agregado de PHE a la silicona presenta una saturación. Además de este efecto, durante el proceso de fabricación de los mismos se observó que el agregado de PHE por sobre el 20% también alcanza una saturación en cuanto a la incorporación del PHE, donde el material logrado empieza a perder las características propias de la silicona como, por ejemplo, la flexibilidad.

En el campo del desarrollo de materiales que puedan usarse en blindaje, diversos autores han publicado avances en esta línea de investigación. Gwaily fabricó un nuevo material compuesto utilizando caucho natural con diferentes concentraciones de galena ( $PbS$ ) para atenuar los rayos gamma [30]. En dicho trabajo, se encontró que el coeficiente de atenuación aumenta con el incremento del contenido de galena. Por otra parte, Hussain y col. (1997) [31] investigaron las propiedades de blindaje de un material basado en polietilenglicol (PEG)-óxido de Pb y determinaron el coeficiente de atenuación ( $\mu$ ). Estos autores, informaron que el coeficiente de atenuación aumenta con la adición de óxido de Pb a la matriz de PEG, resultado esperable ya que el Pb es el material de blindaje por excelencia. Además, se estudiaron compuestos a base de poliéster para el blindaje [32]. El-Fiki y col. utilizaron un compuesto de bismuto y silicona para el blindaje de rayos gamma y se informaron las tasas de atenuación lineal [33]. Aladailah y col. [34] estudiaron la posibilidad de incorporar óxido de zinc ( $ZnO$ ) en polidimetilsiloxano, encontrando que el aumento en la cantidad de  $ZnO$  conduce a mejoras en la capacidad de blindaje.

Tal como se mencionó inicialmente, el objetivo principal de este trabajo fue buscar materiales alternativos que cubran las diversas aplicaciones de la protección radiológica, con la posibilidad de encontrar un reemplazo efectivo del Pb. Para el caso de los materiales de protección personal se toma como referencia la absorción de una lámina de Pb de 0,5 mm de espesor. Entonces, a fin de completar el estudio de los materiales basados en matriz de silicona, en esta sección se realizan las comparaciones de cada uno de ellos con la referencia. Para llevar a cabo esta comparación, se registraron los espectros de absorción de una lámina de Pb de 0,5 mm de espesor utilizando fuentes de  $^{241}\text{Am}$  y  $^{133}\text{Ba}$ , manteniendo la configuración experimental exactamente igual a la utilizada para evaluar la atenuación de los materiales PHE-S.

En la Figura 5.13 a), b) y c) se muestran los mismos espectros de la Figura 5.9 (fuente  $^{241}\text{Am}$  con absorbentes 3PHE-S, 10PHE-S y 20PHE-S de distintos espesores), superpuestos al registrado para la lámina de Pb de 0,5 mm de espesor (en línea turquesa). La curva observada para el fotopico de 59 keV indica que para alcanzar una atenuación similar a 0,5 mm de Pb se requiere un espesor aproximado de 22 mm de 3PHE-S, o bien del orden de 10 mm de 10PHE-S o 20PHE-S.

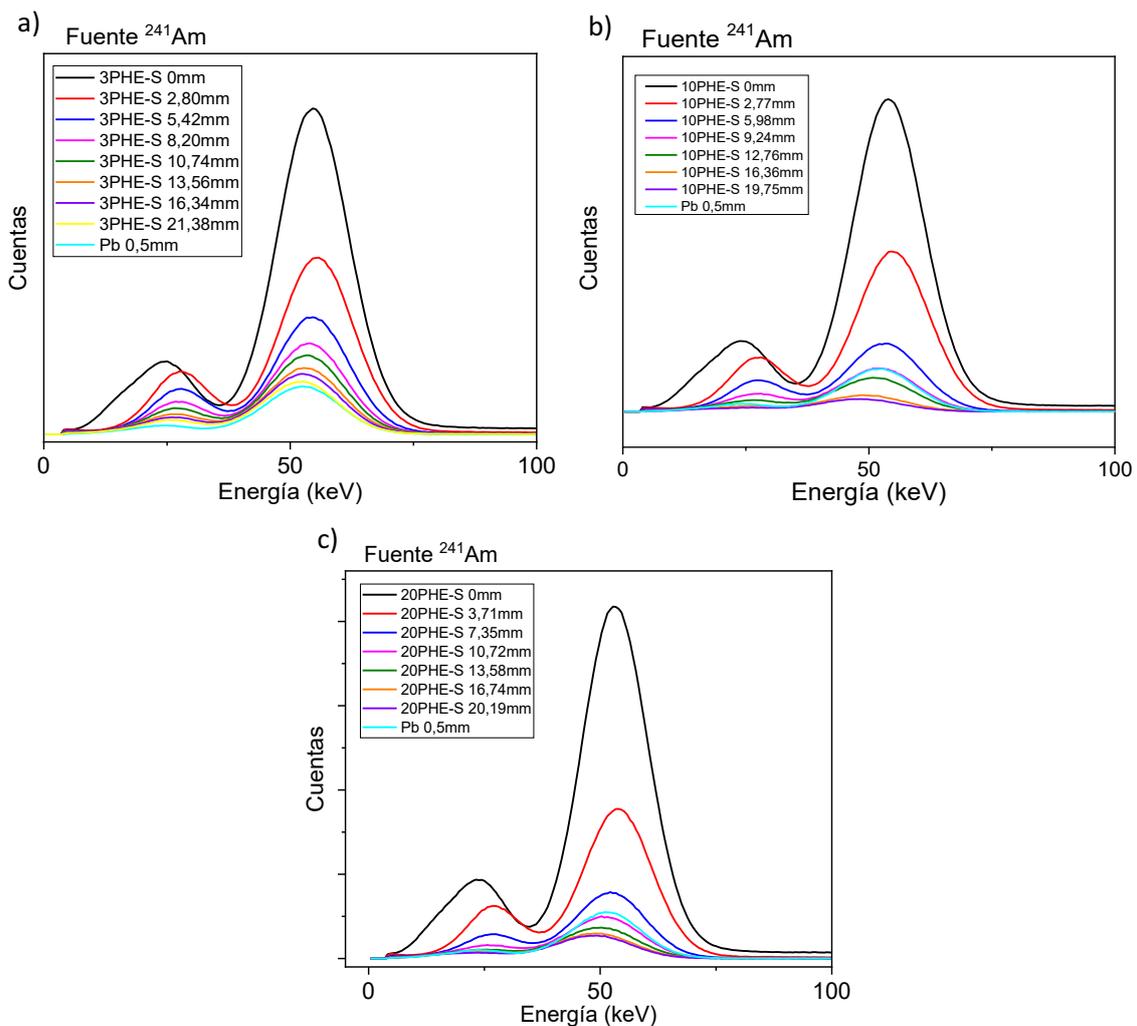


Figura 5.13: Comparación de absorción de a) 3PHE-S, b) 10PHE-S y c) 20PHE-S vs Pb utilizando  $^{241}\text{Am}$ .

En la Figura 5.14 a) y b) se muestran las curvas obtenidas con la fuente de  $^{133}\text{Ba}$ , a fin de comparar la absorción de los materiales 10PHE-S y 20PHE-S con la de la lámina de Pb de 0,5 mm de espesor. Allí puede observarse que con un espesor de 6 mm de cualquiera de ambos materiales se logra una atenuación del pico de 81 keV equivalente a la del material de referencia. A diferencia de éste, en el pico de 31 keV ninguno de los espesores del rango analizado alcanza a atenuar equivalentemente al Pb. Sin embargo 9,25 mm de 10PHE-S atenúan el 81,01% de la intensidad de dicho pico mientras que 10,72 mm de 20PHE-S atenúan el 87,34%.

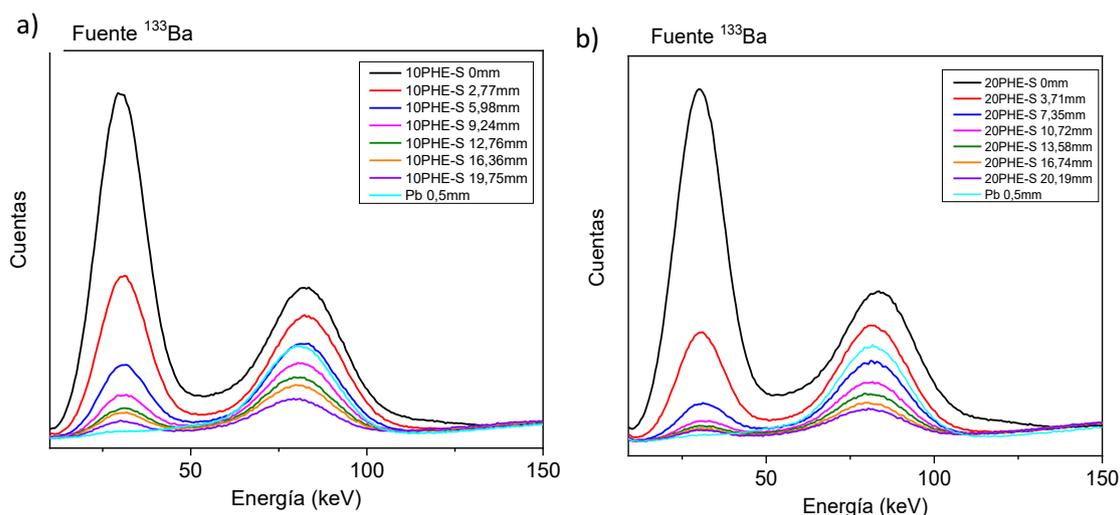


Figura 5.14: Comparación de absorción de a) 10PHE-S y b) 20PHE-S vs Pb utilizando  $^{133}\text{Ba}$ .

### 5.3. DISCUSIÓN GENERAL

En base a los resultados de la sección 5.2.2, se observa que los absorbentes de PHE presentan una alta eficiencia para atenuar fotones de baja energía. Sin embargo, esta eficiencia disminuye gradualmente a medida que aumenta la energía de los fotones. Por lo tanto, el PHE podría considerarse un absorbente adecuado para energías inferiores a 200 keV, mientras que para energías superiores a 1000 keV, su capacidad de atenuación resulta insuficiente con los espesores evaluados.

Con el objetivo de ampliar el rango de aplicación de PHE, se investigó la posibilidad de incorporarlo en una matriz cementicia para el diseño de materiales de revestimiento de salas de radiodiagnóstico. Se prepararon pastillas de cemento con un 3% de PHE agregado y se evaluó su capacidad de atenuación. Los resultados preliminares indican que la capacidad de atenuación del material PHE-C es comparable a la del cemento convencional. Este indicio abre la puerta a una investigación más profunda, en la que debería considerarse aumentar la cantidad de PHE agregado para mejorar significativamente la capacidad de atenuación del material PHE-C. Lograr esto permitiría reducir el espesor requerido de los revestimientos, optimizando su costo y eficiencia. Sumado a esto, es fundamental profundizar en el análisis de las propiedades

mecánicas de los materiales cementicios con PHE. La incorporación del polvo puede afectar las propiedades mecánicas del cemento, por lo que es necesario evaluar su impacto en la resistencia, durabilidad y otras características relevantes para su aplicación en recubrimientos estructurales.

Como parte del desarrollo de materiales para blindaje de la radiación, es fundamental incluir el campo de la protección personal. En este sentido se abordó el estudio de un material que pueda reemplazar el de los delantales plomados. La búsqueda se centró en sustratos flexibles y livianos, identificando a las siliconas como una alternativa prometedora debido a su capacidad de polimerización a temperatura ambiente.

Los resultados presentados en la sección 5.2.4 muestran que la adición de PHE a la silicona puede mejorar la capacidad de absorción del material para bajas energías, particularmente en concentraciones superiores al 3%. Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas entre las curvas de 10PHE-S y 20PHE-S para la mayoría de los espesores indica que la concentración óptima de PHE podría estar en el rango entre 10% y 20%. Este hallazgo plantea dos interrogantes: ¿Tiene sentido fabricar un absorbente con mayor concentración de polvo si no mejora su efectividad? ¿O es más beneficioso emplear el absorbente de 20PHE-S para reciclar más PHE y reducir la contaminación ambiental? Si el objetivo es reciclar el PHE y reducir la contaminación, es conveniente utilizar el absorbente de 20PHE-S, ya que permite reutilizar una mayor cantidad de PHE, contribuyendo así a la economía circular al darle un nuevo uso a materiales que de otro modo podrían considerarse desechos. Pero en cuanto a la capacidad absorbente del material se obtiene el mismo resultado usando 10% de PHE.

Por último, el análisis comparativo de la absorción de 10PHE-S y 20 PHE-S con la lámina de Pb muestra claramente que con un espesor razonable de PHE-S se logra una absorción equivalente a la referencia. Estos resultados respaldan la viabilidad de utilizar estos materiales para la elaboración de elementos de protección personal eficaces.

Este Trabajo de Diploma presenta una idea prometedora: la utilización de un residuo industrial como material absorbente de la radiación. Esta propuesta no solo ofrece una solución innovadora para la protección radiológica, sino que también contribuye a abordar el problema de la disposición final de residuos industriales. Al evitar su depósito en vertederos a cielo abierto, se minimiza el riesgo de lixiviación de metales pesados, protegiendo así el medio ambiente y la salud humana.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS A FUTURO

---

A continuación, se presentan las conclusiones generales de este Trabajo de Diploma teniendo en cuenta los objetivos propuestos en el Capítulo 2. En particular, se han logrado avances significativos en el desarrollo de nuevos materiales absorbentes de radiaciones ionizantes a partir de residuos industriales, específicamente aquellos provenientes del proceso de obtención de acero.

Estos materiales, presentan propiedades efectivas para la absorción de radiaciones ionizantes, lo que los convierte en una alternativa viable como reemplazo eficiente del Pb, eliminando los riesgos asociados a su toxicidad.

La reutilización de estos residuos industriales como materia prima para la elaboración de blindajes no solo permite eliminar los riesgos asociados al Pb, sino que también contribuye a la valorización de estos materiales, transformándolos en productos de alto valor con diversas aplicaciones prácticas.

En esta investigación se realizó una caracterización exhaustiva del material de partida (PHE) empleando técnicas de DRX y SEM-EDS. La composición química, rica en metales pesados, resulta fundamental para su potencial uso en la fabricación de absorbentes.

A partir de dicho material, se fabricaron tres tipos de absorbentes: absorbentes de residuo industrial puro (PHE), absorbentes en matrices cementicias (PHE-C) y absorbentes en matrices poliméricas (PHE-S).

Con el objetivo de evaluar la capacidad de absorción de estos materiales, se obtuvieron espectros gamma simple en el rango de energía de 30 *keV* a 1300 *keV*. En el caso de los absorbentes PHE y PHE-C, se determinó el coeficiente de atenuación lineal en función de la energía.

Los resultados demostraron que los materiales cementicios basados en PHE presentarían un futuro prometedor en el ámbito de la protección radiológica, especialmente en aplicaciones como revestimientos estructurales.

Por otro lado, el agregado de PHE a los absorbentes en matriz de silicona demostraron una mejora en la capacidad de absorción para bajas energías. Esta característica los hace especialmente útiles para aplicaciones donde se requiere una protección efectiva contra la radiación dispersa, como en el radiodiagnóstico, cumpliendo el objetivo de poder ser utilizados como posibles sustitutos del Pb en blindajes localizados.

Si bien los resultados obtenidos evidencian un comportamiento favorable de los materiales absorbentes de PHE en el rango de energías de hasta 200 *keV*, se proponen las siguientes mejoras para optimizar su rendimiento:

- Aumento de la concentración de polvo: se propone incrementar la concentración de polvo PHE en la fabricación de nuevos materiales basados en cemento. Esta estrategia podría potenciar significativamente la capacidad de atenuación de la radiación.

- Evaluación de nuevas matrices poliméricas: se sugiere explorar el uso de matrices poliméricas alternativas que puedan evitar la saturación del material, o bien permitir una concentración de PHE mayor a la lograda, sin perder las propiedades mecánicas. La identificación de matrices con capacidad de incorporar mayor cantidad de PHE podría mejorar aún más la eficiencia de los absorbentes.

- Optimización del espesor: una vez logrados los dos ítems anteriores, se propone realizar un análisis detallado del espesor de los nuevos materiales absorbentes, a fin de determinar el espesor óptimo para cada aplicación.

Los materiales absorbentes de PHE emergen como una alternativa innovadora y sostenible en el ámbito de la protección radiológica. Su potencial radica en su capacidad para atenuar la radiación de manera efectiva, su bajo costo de producción y su contribución al manejo responsable de residuos industriales.

Las investigaciones realizadas hasta ahora han arrojado resultados alentadores, evidenciando la viabilidad de estos materiales para diversas aplicaciones en la protección radiológica. Sin embargo, aún queda camino por recorrer para optimizar su rendimiento y ampliar su alcance.

En este sentido, las mejoras propuestas en este trabajo, como el aumento de la concentración de PHE y la exploración de nuevas matrices poliméricas, representan pasos importantes para maximizar la eficacia de estos absorbentes. La investigación continua será fundamental para profundizar en su comportamiento, identificar las aplicaciones más adecuadas y desarrollar estrategias de producción optimizadas.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. AbuAlRoos, N. J., Azman, M. N., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2020). Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 78, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>
2. Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (s. f.). *Physics in Nuclear Medicine* (4ta ed.). Saunders-Elsevier.
3. Gisone, P., & Pérez, M. del R. (s. f.). *Efectos biológicos de la radiación*. Autoridad Regulatoria Nuclear.
4. Sánchez, G. (s. f.). *Física de la Salud. Radioprotección*. Universidad Nacional de La Plata.
5. McCaffrey, J. P., Shen, H., Downton, B., & Mainegra-Hing, E. (2007). Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics*, 34(2), 530-537. <https://doi.org/10.1118/1.2426404>
6. Aghamiri, M. R., Mortazavi, S. M. J., Tayebi, M., Mosleh-Shirazi, M. A., Baharvand, H., Tavakkoli-Golpayegani, A., & Zeinali-Rafsanjani, B. (2011). A Novel Design for Production of Efficient Flexible Lead-Free Shields against X-ray Photons in Diagnostic Energy Range. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 1(1). [https://jbpe.sums.ac.ir/article\\_43020.html](https://jbpe.sums.ac.ir/article_43020.html)
7. Moonkum, N., Pilapong, C., Daowtak, K., & Tochaikul, G. (2023). Radiation Protection Device Composite of Epoxy Resin and Iodine Contrast Media for Low-Dose Radiation Protection in Diagnostic Radiology. *Polymers*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/polym15020430>
8. Madías, J. (2009). Reciclado de polvo de horno eléctrico. *Acero Latinoamericano*, 38-47.
9. Podgorsak, E. B. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students* (IAEA).
10. Leo, W. (1987). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag.
11. Podgorsak, E. (2010). *Radiation Physics for Medical Physicists* (2nd ed.). Springer.
12. Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection* (3th ed.). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

13. McKetty, M. H. (1998). *The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: X-ray attenuation*. *RadioGraphics*, 18(1), 151-16.
14. Attix F H (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. J.Wiley and Son, New York.
15. ICRP Publicación 103. (2007). *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Senda Editorial.
16. Del Cura, J.L., Gayete A., Rovira, A., Pedraza S. (2019). *Radiología Esencial*. Editorial Medica Panamericana, Madrid, España.
17. González Mancera, G., & Noguez Amaya, M. Eugenia. (2006). *Principios de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X Característicos* (Primera Edición). Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
18. El-Hosiny, F. I., & El-Faramawy, N. A. (2000). Shielding of gamma radiation by hydrated Portland cement–lead pastes. *Radiation Measurements*, 32(2), 93-99. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00050-5)
19. Errico, L. A., Montes, M. L., & Taylor, M. A. (2022). *Radioactividad, medioambiente y espectroscopía gamma*. Edulp.
20. Fernando Finestres Zubeldia, *Protección en radiología odontológica*. Universidad de Barcelona, Textos docentes 369.
21. Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed). John Wiley.
22. Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Cerjan-Stefanović, Š., Novosel-Radović, V., & Jenko, M. (2004). Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1), 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032>
23. Vieira, C. M. F., Sanchez, R., Monteiro, S. N., Lalla, N., & Quaranta, N. (2013). Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 88-92. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2012.09.001>
24. Blaney, L. (2007). Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Properties, synthesis and applications. *The Lehigh Review*, 15, 33-81.

25. Çullu, M., & Ertaş, H. (2016). Determination of the effect of lead mine waste aggregate on some concrete properties and radiation shielding. *Construction and Building Materials*, 125, 625-631.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.069>
26. Singh, K., Singh, S., Dhaliwal, A. S., & Singh, G. (2015). Gamma radiation shielding analysis of lead-flyash concretes. *Applied Radiation and Isotopes*, 95, 174-179.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.10.022>
27. Pomaro, B., Gramegna, F., Cherubini, R., De Nadal, V., Salomoni, V., & Faleschini, F. (2019). Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, 200, 188-197.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.098>
28. Korkmaz, A. V., Hacifazlıoğlu, H., & Akkurt, İ. (2024). Radiation attenuation characteristics of meta-schist modified Portland cement: Comparative analysis with traditional cement. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02737.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02737>
29. Kurtulus, R., & Kurtulus, C. (2023). A preliminary appraisal for utilizing abandoned industrial side streams as alternatives to cement within radiation protection applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 213, 111245.  
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111245>
30. Gwaily, S. E. (2002). Galena/(NR+SBR) rubber composites as gamma radiation shields. *Polymer Testing*, 21(8), 883-887.  
[https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(02\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(02)00023-5)
31. Hussain, R. (s. f.). *A STUDY OF THE SHIELDING PROPERTIES OF POLY ETHYLENE GLYCOL-LEAD OXIDE COMPOSITE*.
32. Harish, V., Nagaiah, N., Prabhu, T. N., & Varughese, K. T. (2009). Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1503-1508.  
<https://doi.org/10.1002/app.29633>
33. El-Fiki, S., El Kameesy, S. U., El. Nashar, D. E., Abou- Leila, M. A., El-Mansy, M. K., & Ahmed, M. (2015). Influence of Bismuth Contents on Mechanical and Gamma Ray Attenuation Properties of Silicone Rubber Composite. *International Journal of Advanced Research*, 3(6).

34. Aladailah, M. W., Tashlykov, O. L., Volozheninov, T. P., Kaskov, D. O., Iuzbashieva, K. S., Al-Abed, R., Acikgoz, A., Yorulmaz, N., Yaşar, M. M., Al-Tamimi, W., & Alshipli, M. (2022). Exploration of physical and optical properties of ZnO nanopowders filled with polydimethylsiloxane (PDMS) for radiation shielding applications. Simulation and theoretical study. *Optical Materials*, 134, 113197. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113197>