



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Cuantificación de Ra-226 mediante el uso de
espectrometría gamma en materiales de construcción.
Aplicación norma UNE-CENT/TS 17216.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Blanch Descarrega, Judit

Tutor/a: Ortiz Moragón, Josefina

Cotutor/a: Sáez Muñoz, Marina

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

“Quiero agradecer al Laboratorio de Radiactividad Ambiental, un lugar donde he crecido tanto personal como profesionalmente. Especialmente a Pepa, cuyo apoyo y guía han sido fundamentales. No solo me ha ayudado, sino que también ha hecho que el trabajo sea más llevadero y agradable, inspirándome con su pasión por el sector nuclear, al igual que Luisa y Marina. En el LRA encontré la dirección que necesitaba para seguir mi carrera profesional en el sector nuclear y decidirme a cursar el Máster en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, un área que siempre me había atraído, pero que no sabía cómo encaminar.

También quiero agradecer a mis padres, a mi hermana y a mis amigas y amigos, quienes con mucha paciencia han soportado mis interminables charlas sobre temas nucleares. Su apoyo incondicional y comprensión han sido clave para mantenerme motivada y enfocada en mis metas.

Per tu iaio”

RESUMEN

En 2013, la Directiva 2013/59/Euratom traspuesta al ordenamiento jurídico español mediante la publicación en el Boletín Oficial del Estado (BOE) del Real Decreto 1029/2022 incluyó riesgos radiológicos distintos a los existentes en la industria nuclear, requiriendo a los proveedores de materiales de construcción la cuantificación de radionucleidos naturales como el Radio-226, Thorio-232 y Potasio-40, debido al potencial riesgo que suponen para la salud humana.

La especificación técnica provisional CEN/TS 17216, publicada en 2018, proporcionó una metodología estandarizada para medir estos radionucleidos en materiales de construcción mediante espectrometría gamma. La baja emisión gamma del Ra-226 requiere esperar su equilibrio con sus descendientes como el gas radón (Rn-222) para medirlo con precisión, destacando la importancia de minimizar la emanación de radón durante los análisis de las muestras.

En el año 2023, se revisó la especificación anterior con el objetivo de servir de base a la futura norma europea (prEN 17216:2023), y se realizó un estudio colaborativo para incluir los requisitos de precisión que no estaban allí especificados. En este trabajo se van a revisar los distintos apartados de ambas normas, así como los resultados del estudio colaborativo.

Además, se va a implementar la metodología explicada en la norma para evaluar la incertidumbre asociada a la posible difusión del gas radón en diferentes contenedores utilizados para la medición de las muestras.

PALABRAS CLAVE: Materiales de construcción, Radio-226, Espectrometría gamma.

RESUM

L'any 2013, la Directiva 2013/59/Euratom transposada a l'ordenament jurídic espanyol mitjançant la publicació al Butlletí Oficial de l'Estat (BOE) del Reial decret 1029/2022, va incloure riscos radiològics diferents dels existents a la indústria nuclear, requerint als proveïdors de materials de construcció la quantificació de radionúclids naturals com el Radi-226, Thori-232 i Potassi-40, a causa del risc potencial que suposen per a la salut humana.

L'especificació tècnica provisional CEN/TS 17216, publicada el 2018, va proporcionar una metodologia estandarditzada per mesurar aquests radionúclids en materials de construcció mitjançant espectrometria gamma. La baixa emissió gamma del Ra-226 requereix esperar al seu equilibri amb els seus descendents, com el gas radó (Rn-222), per mesurar-lo amb precisió, destacant la importància de minimitzar l'emanació de radó durant els anàlisis de les mostres.

L'any 2023, es va revisar l'especificació anterior amb l'objectiu de servir de base per a la futura norma europea (prEN 17216:2023), i es va realitzar un estudi col·laboratiu per incloure els requisits de precisió que no estaven especificats. En aquest treball es revisaran els diferents apartats d'ambdues normes, així com els resultats de l'estudi col·laboratiu.

A més, s'implementarà la metodologia explicada a la norma per avaluar la incertesa associada a la possible difusió del gas radó en diferents contenidors utilitzats per a la medició de les mostres.

PARAULES CLAU: Materials de construcció, Radi-226, Espectrometria gamma.

ABSTRACT

In 2013, Directive 2013/59/Euratom transposed into Spanish law through the publication in the Official State Gazette (BOE) of Royal Decree 1029/2022, included radiological risks different from those existing in the nuclear industry, requiring suppliers of construction materials to quantify natural radionuclides such as Radium-226, Thorium-232, and Potassium-40, due to the potential risk they pose to human health.

The technical provisional specification CEN/TS 17216, published in 2018, provided a standardized methodology for measuring these radionuclides in construction materials using gamma spectrometry. The low gamma emission of Ra-226 requires waiting for its equilibrium with its descendants, such as radon gas (Rn-222), to measure it accurately, highlighting the importance of minimizing radon emanation during sample analysis.

In 2023, the previous specification was reviewed with the aim of serving as the basis for the future European standard (prEN 17216:2023), and a collaborative study was conducted to include precision requirements that were not previously specified. This work will review the various sections of both standards, as well as the results of the collaborative study.

Additionally, the methodology explained in the standard will be implemented to evaluate the uncertainty associated with the possible diffusion of radon gas in different containers used for sample measurement.

KEYWORDS: Construction materials, Radium-226, Gamma spectrometry.

ÍNDICE GENERAL

- DOCUMENTO I: MEMORIA
- DOCUMENTO II: PRESUPUESTO

DOCUMENTO I:

MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTEDECENTES.....	1
1.2	JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN.....	2
2	OBJETIVOS	3
3	RADIACIÓN NATURAL	4
3.1	INTRODUCCIÓN	4
3.2	RADIOACTIVIDAD Y RADIACIÓN	4
3.2.1	Radiación ionizante.....	5
3.2.2	Radiación no ionizante.....	6
3.3	DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA.....	6
3.3.1	Desintegración Alfa.....	7
3.3.2	Desintegración Beta.....	7
3.3.2.1	Beta negativa	8
3.3.2.2	Beta positiva	8
3.3.3	Fisión espontánea.....	9
3.4	LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA.....	10
3.5	SERIES DE DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA.....	10
3.5.1	Equilibrio transitorio	11
3.5.2	Equilibrio secular	11
3.5.3	No equilibrio	12
3.1	CONCLUSIONES.....	13
4	RADIO.....	14
4.1	INTRODUCCIÓN	14
4.2	ORIGEN Y DESCRIPCIÓN.....	14
4.2.1	Descubrimiento del Radio.....	14
4.3	EL RADIO EN LA NATURALEZA	15
4.3.1	Niveles de actividad en muestras ambientales.....	18
4.4	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	19
4.4.1	Niveles de radiactividad en materiales de construcción.....	20
4.4.2	Normativa	20
4.5	CONCLUSIONES.....	21

5	RADIACIÓN GAMMA	22
5.1	INTRODUCCIÓN	22
5.2	DESCRIPCIÓN	22
5.2.1	Interacciones con la materia.....	24
5.2.1.1	Efecto fotoeléctrico:	25
5.2.1.2	Efecto Compton:	26
5.2.1.3	Producción de pares:	27
5.3	ESPECTROMETRÍA GAMMA	27
5.3.1	Definición.....	27
5.3.2	Características.....	30
5.3.2.1	Efectos de suma	30
5.3.2.2	Interferencias.....	30
5.3.2.3	Fondo Ambiental	31
5.3.3	Detectores semiconductores.....	31
5.4	CONCLUSIONES.....	32
6	NORMA UNE-CEN/TS 17216:2018	33
6.1	INTRODUCCIÓN	33
6.2	COMPARATIVA UNE-CEN/TS 1726:2018 CON PREN 17216:2023.....	33
6.2.1	Principios del método de ensayo.....	33
6.2.2	Muestreo	34
6.2.3	Procedimiento	35
6.2.4	Cálculos.....	36
6.2.5	Informe del ensayo	37
6.2.6	Informe de rendimiento	37
6.2.7	Anexos	37
6.2.7.1	Anexo A - Método para la determinación del índice de fuga de radón de un contenedor de muestras de ensayo	37
6.2.7.2	Anexo B - Preparación de fuentes de calibración y determinación de la eficiencia de detección.	37
6.2.7.3	Anexo C - Método para la determinación de la actividad másica en un producto que contiene múltiples constituyentes	38
6.2.7.4	Anexo D - Fotopicos complementarios para verificar la concentración de actividad en la muestra de ensayo	38

6.2.7.5	Anexo E - Método para la determinación del número correcto de impulsos en un fotopico (sólo para picos únicos)	38
6.2.7.6	Anexo F – Datos del rendimiento.....	38
6.3	RESULTADOS ESTUDIO COLABORATIVO	39
6.4	CONCLUSIONES.....	40
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
7.1	INTRODUCCIÓN	41
7.2	HOJA DE CÁLCULO VALIDADA.....	41
7.3	MEDIDAS EXPERIMENTALES	44
7.3.1	Procedimiento	44
7.3.2	Contenedores	45
7.3.3	Cálculos.....	46
7.3.4	Resultados.....	48
7.3.4.1	Transparente.....	48
7.3.4.2	Duquesa	48
7.3.4.3	Cantabria.....	49
7.3.4.4	Petri.....	50
7.3.4.5	Comparativa.....	50
7.4	INCERTIDUMBRES	52
7.5	CONCLUSIÓN	53
8	CONCLUSIONES.....	54
9	BIBLIOGRAFÍA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espectro electromagnético en tipos de radiaciones. Fuente: (Galindo, 2024).....	5
Figura 2: Gráfico de Segrè o Cinturón de estabilidad nuclear. Fuente: (cbrn.es, 2017)	7
Figura 3: Ampliación Gráfico de Segrè. Fuente: (Gilmore, 2008).	8
Figura 4: Esquema de captura electrónica desde la capa K. Fuente: (Gilmore, 2008).	9
Figura 5: Representación gráfica del equilibrio transitorio del ⁹⁵ Zr y ⁹⁵ Nb. Fuente: (Gilmore, 2008).	11
Figura 6: Representación del equilibrio secular del ²³⁸ U y ²³⁴ Th. Fuente: (Gilmore, 2008).	12
Figura 7: Representación de no equilibrio del ²¹⁰ Bi y ²¹⁰ Po. Fuente: (Gilmore, 2008).	12
Figura 8: Cadena de desintegración del U-238. Fuente: (Fang, 2024)	15
Figura 9. Subcadena de desintegración del Ra-226. Fuente: (Bruenner, 2020)	16
Figura 10. Espectro electromagnético detallado. Fuente: (Gilmore, 2008).	22
Figura 11. Esquema de la cadena de semidesintegración del Cs-137. Fuente: (Gilmore, 2008).	24
Figura 12. Comparación de los coeficientes de absorción y atenuación. Fuente: (Gilmore, 2008). .	24
Figura 13. Efecto de los métodos de interacción sobre el coeficiente de atenuación lineal. Fuente: (Gilmore, 2008).	25
Figura 14. Esquema del efecto fotoeléctrico (a) y posterior emisión de rayos X (b). Fuente: (Gilmore, 2008).	26
Figura 15. Esquema del mecanismo de dispersión Compton. Fuente: (Gilmore, 2008).	26
Figura 16. Esquema del mecanismo de producción de pares. Fuente: (Gilmore, 2008).	27
Figura 17. Espectros esperados de detectores de diferentes tamaños: PE, efecto fotoeléctrico; CS, dispersión Compton; PP, producción de pares. Fuente: (Gilmore, 2008).	29
Figura 18. Ejemplo detector de germanio ultrapuro del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UPV. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 19. Diagrama del sistema de muestras. Fuente: prEN 17216:2023.	34
Figura 20. Ejemplo de relación medida entre la tasa de recuento corregida para el fotopico elegido y la hora a la que se registró el espectro. Fuente: prEN 17216:2023.	42
Figura 21. Corroboración del gráfico del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 22. Fotografías realizadas en el laboratorio para las mediciones de las muestras. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 23. Representación de la R y Rcor frente al tiempo de medida. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 24. Espectro de la muestra 'Rn-5 abril 23' del contenedor Transparente. Fuente: Laboratorio Radiactividad Ambiental.	47

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Descripción Notación Atómica. Fuente: elaboración propia.</i>	4
<i>Tabla 2: Tipos de radiaciones ionizantes. Fuente: elaboración propia.</i>	5
<i>Tabla 3. Especificaciones radiológicas de la subcadena del Ra-226. Fuente: Elaboración propia.</i>	16
<i>Tabla 4. Niveles de actividad del Ra-226 en muestras ambientales de biota. Fuente: (UNSCEAR, 2000).</i>	18
<i>Tabla 5. Niveles de actividad del Ra-226 en muestras ambientales de suelos y agua potable. Fuente: (UNSCEAR, 2000).</i>	19
<i>Tabla 6. Concentración típica y máxima de actividad del Ra-226 en los materiales de construcción y subproductos industriales más comunes, utilizados como materiales de construcción en la Unión Europea. Fuente: (B. Piedecausa, Julio-Agosto2011).</i>	20
<i>Tabla 7: Límites de dosis establecidos según el Real Decreto 1029/2022 publicado en el BOE. Fuente: (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022).</i>	21
<i>Tabla 8. Posibilidades de la espectrometría gamma según el tamaño del detector. Fuente: elaboración propia.</i>	28
<i>Tabla 9. Tipos de efectos de suma. Fuente: elaboración propia.</i>	30
<i>Tabla 10. Líneas gamma seleccionadas para el Ra-226 para la identificación de radionucleidos y sus posibles interferencias. Fuente: (Comité técnico CTN 73. Energía nuclear, tecnologías nucleares y protección radiológica, 2018).</i>	30
<i>Tabla 11. Energías de rayos gamma para determinar la actividad del Ra-226. Fuente: prEN 17216:2023</i>	36
<i>Tabla 12. Resultados de la precisión del estudio colaborativo para el Ra-226, Th-232 y K-40. Fuente: (Paepen, J., Van Ammel, R., Hult, M., Marissens, G., Stroh, H., Emteborg, H., Seghers, J., 2024).</i>	39
<i>Tabla 13. Ejemplo de la tasa de recuento medida a partir del fotopico de 352 keV del Plomo-214, y los parámetros calculados para determinar la incertidumbre relativa debida a la fuga de radón. Fuente: prEN 17216:2023.</i>	41
<i>Tabla 14. Validación de los cálculos del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.</i>	42
<i>Tabla 15. Valores de la pendiente y su incertidumbre del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.</i>	43
<i>Tabla 16. Comparativa de los resultados del ejemplo de la norma y los obtenidos calculándolos. Fuente: Elaboración propia.</i>	44
<i>Tabla 17. Tipos de contenedores empleados en el estudio. Fuente: Elaboración propia.</i>	45
<i>Tabla 18. Datos extraídos del programa GammaVision para realizar los cálculos. Fuente: Elaboración propia.</i>	46
<i>Tabla 19. Cálculos para obtener la R corregida. Fuente: Elaboración propia.</i>	46
<i>Tabla 20. Resultados obtenidos para el contenedor Transparente. Fuente: Elaboración propia.</i>	48
<i>Tabla 21. Resultados obtenidos para el contenedor Duquesa. Fuente: Elaboración propia.</i>	49
<i>Tabla 22. Resultados obtenidos para el contenedor Cantabria. Fuente: Elaboración propia.</i>	49
<i>Tabla 23. Resultados obtenidos para el contenedor Petri. Fuente: Elaboración propia.</i>	50
<i>Tabla 24. Comparativa de resultados de los contenedores. Fuente: Elaboración propia.</i>	51
<i>Tabla 25. Valores para las incertidumbres relativas fijos. Fuente: Elaboración propia.</i>	53
<i>Tabla 26. Estudio incertidumbres de los distintos contenedores. Fuente: Elaboración propia.</i>	53

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTEDECENTES

En 2002 se incorpora la Directiva 96/29 Euratom (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1996) mediante el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI) (Ministerio de la Presidencia, 2001). Es con esta directiva y lógicamente con el reglamento, cuando se introduce por primera vez la consideración del riesgo radiológico asociado a las industrias no nucleares que utilizan materiales no asociados a esta industria, que poseen alto contenido de radionucleidos naturales o que implican procesos que aumentan de forma considerable su concentración.

De este modo, es implementado un marco normativo, con el cual se consigue promover el desarrollo de estudios relacionados con las actividades NORM ("Naturally Occurring Radioactive Material"), en industrias como la del petróleo, cerámica, fertilizantes, etc, donde es esencial evaluar el contenido de radionucleidos naturales, como es el caso del Radio-226.

Con posterioridad a 1996, concretamente en 2013, la Directiva 2013/59/Euratom, se incorpora al ordenamiento jurídico español mediante la publicación en diciembre de 2022 del Real Decreto 1029/2022, "Reglamento sobre la protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes" (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022), donde se estipula la obligación de que los proveedores de materiales de construcción determinen el contenido radiactivo de sus productos, específicamente del Radio-226, Thorio-232 y Potasio-40.

Por otra parte, en 2018, la Unión Europea publicó la especificación técnica CEN/TS 17216 provisional, en la cual se establece una metodología para la cuantificación de Ra-226, Th-232 y K-40 en productos de construcción mediante espectrometría gamma por semiconductores, revisada con posterioridad en 2023 (prEN 17216:2023). Todos estos radionúclidos pueden medirse mediante espectrometría gamma, pero la cuantificación del Ra-226 en particular es complicada debido a su baja intensidad de emisión gamma. Es por ello, que es necesario esperar a que este alcance el equilibrio con sus descendientes, por ejemplo, con el gas radón (Rn-222), para poder medirlo con precisión.

El radón es un gas radiactivo producido naturalmente por la desintegración del radio y a su vez del uranio en la tierra, que tiende a acumularse en espacios cerrados como viviendas y edificios. Su presencia en materiales de construcción como piedras naturales, granito y pizarra ha generado creciente preocupación (B. Piedecausa, 2011), debido al elevado riesgo de cáncer de pulmón asociado con la exposición prolongada a altos niveles de radón (OMS, 2021).

A pesar de los riesgos, en muchos países todavía falta conciencia y regulaciones sólidas para medir y mitigar la presencia de dichos radionucleidos en los materiales de construcción. Esta especificación técnica ha sido fundamental para guiar la implementación de prácticas adecuadas en los laboratorios, asegurando que se mantenga el equilibrio secular y se minimice la emanación de gas radón durante el análisis de las muestras, según los contenedores empleados.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

El motivo principal de este trabajo radica en contribuir al estudio de la cuantificación del Ra-226 en materiales de construcción, utilizando la técnica de espectrometría gamma. Este enfoque es fundamental para comprender y mitigar los riesgos asociados a la presencia de Ra-226, tanto por la exposición interna como externa. Esto, a su vez, contribuirá en las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 3, enfocado en la Salud y el Bienestar.

La radiación gamma emitida por el Ra-226 puede causar daños por exposición externa, mientras que su desintegración produce radón, que, al ser inhalado, aumenta significativamente el riesgo de cáncer de pulmón, a raíz de sus descendientes. Por esto es importante cuantificar adecuadamente el Ra-226.

Es esencial controlar y mitigar estos riesgos para garantizar entornos de vida y trabajo saludables, reduciendo la incidencia de enfermedades relacionadas con la radiación y mejorando el bienestar de la población, mediante la evaluación y control del contenido radiactivo en los materiales de construcción.

Por lo tanto, en este Trabajo Fin de Grado, se ha seleccionado un tema específico para obtener los 12 créditos necesarios para la finalización del Grado de Ingeniería Química, en el cual se mostrará la importancia que tiene la ingeniería química dentro del sector nuclear, dando enfoque a la radiación medioambiental. Para ello, se van a aplicar los conocimientos adquiridos en la asignatura optativa de “Tecnología Química Nuclear” cursada en el cuarto año del grado.

2 OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal contribuir al estudio de la cuantificación del Ra-226 en materiales de construcción utilizando la técnica de espectrometría gamma. En particular, en el aspecto relacionado con la potencial difusión del radón a través de los contenedores de medida de las muestras de estos materiales.

Para ello, se han seguido las directrices establecidas por la norma UNE-CEN/TS 17216:2018 y prEN 17216:2023. Para poder ejecutarlo, se establecen varios objetivos específicos, los cuales son:

- Estudiar la radiación natural, mediante un enfoque particular en el comportamiento y cuantificación del Ra-226.
- Comprender y aplicar la técnica de espectrometría gamma para materiales de construcción tanto de la norma UNE-CEN/TS 17216:2018 como de la prEN 17216:2023.
- Analizar la normativa aplicada a los materiales de construcción, enfatizando en la cuantificación del Ra-226 a través de sus descendientes.
- Implementar la metodología de las normas para evaluar la incertidumbre asociada a la posible difusión del gas radón en diferentes contenedores utilizados para la medición de muestras.
- Comparar esta incertidumbre con el resto de las incertidumbres que intervienen en la cuantificación del Ra-226.

3 RADIACIÓN NATURAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a tratar la naturaleza de la radiactividad y la radiación, empezando con una explicación esencial sobre la estructura atómica y la estabilidad de los núcleos atómicos, para a continuación describir los conceptos básicos de la radioactividad y las diferentes formas de radiación.

Asimismo, se detallan los distintos tipos de desintegración radiactiva, y se explica la ley de desintegración radiactiva y cómo ésta describe la pérdida de energía de un núcleo inestable a lo largo del tiempo. Este capítulo también incluye una descripción de las series de desintegración radiactiva, y los conceptos de equilibrio y desequilibrio del núcleo progenitor con sus hijos, fundamentales para comprender la dinámica de los radionucleidos en diferentes entornos.

3.2 RADIATIVIDAD Y RADIACIÓN

Un átomo está compuesto por un núcleo, el cual contiene protones (Z), neutrones (N), y al que le rodea una nube de electrones. La estabilidad del núcleo atómico depende de la relación entre el número de protones y neutrones (A), donde si existe un desequilibrio en dicha relación, los núcleos se vuelven inestables y poseen un exceso de energía. Seguidamente, en la *Tabla 1*, se muestra la notación atómica.

Tabla 1: Descripción Notación Atómica. Fuente: elaboración propia.

Notación Atómica	A_ZX
Z	Número atómico (número de protones)
N	Número de neutrones
A	Número másico (A=N+Z)

La radioactividad es una característica de algunos elementos químicos cuyos núcleos atómicos son inestables. Para que el núcleo recupere su estabilidad, debe ocurrir un cambio interno denominado desintegración radiactiva, el cual emite, propaga y transfiere la energía, conocida comúnmente como radiación, en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas (Consejo de Seguridad Nuclear, 2024).

Las radiaciones se clasifican en radiaciones ionizantes y no ionizantes, según los diferentes tipos de onda, que, a su vez, guardan relación directa con su energía, como se muestra a continuación en la *Figura 1*.

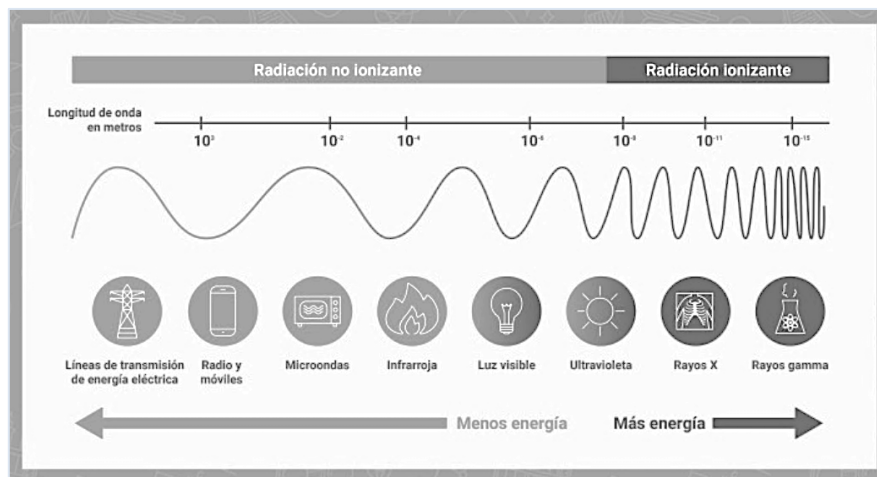


Figura 1: Espectro electromagnético en tipos de radiaciones. Fuente: (Galindo, 2024).

3.2.1 Radiación ionizante

La radiación ionizante es un tipo de radiación la cual tiene la capacidad de arrancar electrones de átomos o moléculas debido a su alta energía, lo que provoca cambios a nivel atómico y la formación de iones, siendo estos átomos o moléculas con carga eléctrica.

Si se llega a dosis altas, esta radiación puede dañar células y órganos, e incluso puede ser letal. Sin embargo, cuando se emplea de manera adecuada, con las dosis correctas y las medidas de protección necesarias, presenta gran variedad de numerosos usos beneficiosos, ya sea en la generación de energía, en el sector industrial, en la investigación, y en el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades, como el cáncer (Galindo, 2024).

Existen varios tipos de radiaciones ionizantes (Consejo de Seguridad Nuclear, 2024), las cuales se describen, a continuación, en la siguiente tabla:

Tabla 2: Tipos de radiaciones ionizantes. Fuente: elaboración propia.

Tipos	Descripción
Radiaciones Alfa (α)	Se trata de núcleos de Helio-4, compuestos por dos neutrones y dos protones, los cuales son emitidos en ciertas desintegraciones nucleares. Aunque presentan una masa considerable, su capacidad de penetración es baja, por lo que una hoja de papel o la piel humana son suficientes para poder detenerlas.
Radiaciones Beta (β)	Están compuestas por <u>flujos de electrones</u> (beta negativas, β^-) o <u>positrones</u> (beta positivas, β^+), liberados en determinadas desintegraciones nucleares. Presentan menor masa que las partículas alfa y son un poco más penetrantes, pero aun así no pueden atravesar una lámina de aluminio, por ejemplo.
Rayos X y Radiaciones Gamma (γ)	Se trata de radiaciones electromagnéticas las cuales no tienen ni carga ni masa. Las radiaciones gamma se generan de la desintegración de núcleos inestables de elementos radiactivos, mientras que los rayos X

	<p>se originan en las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones.</p> <p>Estas radiaciones son bastante penetrantes, y para poder detenerlas se requiere una lámina de plomo de un grosor necesario.</p>
Neutrones liberados	<p>Este tipo de radiación es altamente penetrante debido a la ausencia de carga eléctrica, lo que permite a los neutrones penetrar fácilmente en la estructura de ciertos átomos y provocar su división. Pueden ser absorbidos con elementos químicos como el cadmio o el boro.</p>

3.2.2 Radiación no ionizante

La radiación no ionizante es un tipo de radiación con menor intensidad, la cual no posee la suficiente energía para arrancar electrones de los átomos o las moléculas, aunque sí que puede hacerlas vibrar y generar calor, como ocurre en los hornos de microondas.

Generalmente, no representa riesgos significativos para la salud de la mayoría de las personas. No obstante, los trabajadores expuestos regularmente a ciertas fuentes de esta radiación pueden necesitar protección contra el calor. Algunos ejemplos de este tipo de radiación son la luz visible, la cual es perceptible a través de los ojos, y las ondas de radio, que no son detectables por los sentidos humanos, pero pueden ser decodificadas por receptores de radio.

3.3 DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Como ya se ha mencionado anteriormente, la desintegración radiactiva es un cambio espontáneo en el núcleo de un átomo, dando lugar a la emisión de partículas o radiación electromagnética. Las principales formas de desintegración radiactiva son la desintegración alfa y beta, con la fisión espontánea, siendo este un proceso menos común. Por otra parte, la emisión de rayos gamma, en cambio, no es un proceso de desintegración en sí, sino una desexcitación del núcleo, y es por ello por lo que se desarrollará detalladamente en el apartado 5 de este documento.

La desintegración radiactiva tiene lugar debido a un cambio de masa, donde la masa de los productos es menor a la del nucleido original, liberando así energía en el proceso. Este pequeño cambio de masa se convierte en energía, según la ecuación introducida por A. Einstein.

$$m(A,Z) < Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_p \tag{1}$$

$$Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_p - m(A,Z) = \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Siendo: E la energía en J, m la masa en kg, y v la velocidad de la luz en m/s.

Una forma fácil de ordenar los átomos para estudiar su estabilidad es ordenándolos en una gráfica conocida como Gráfico de Segrè o cinturón de estabilidad nuclear, mostrado en la *Figura 2*, donde en el eje de abscisas se coloca el número de neutrones, y en el eje de ordenadas el número de protones. También, los nucleidos estables están ubicados en la diagonal, representados en color negro. A partir de dicha diagonal, los nucleidos se ordenan por encima o por debajo de la diagonal, según su tipo de decaimiento, como se muestra a continuación:

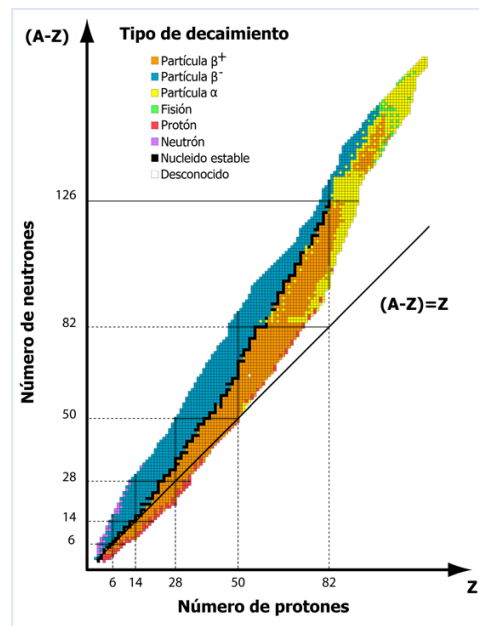


Figura 2: Gráfico de Segrè o Cinturón de estabilidad nuclear. Fuente: (cbrn.es, 2017)

Seguidamente, se va a detallar los distintos tipos de desintegraciones, las cuales son de tipo corpuscular, que implican la emisión de partículas durante el proceso de transición del núcleo progenitor al hijo. Este proceso se rige por la teoría de la probabilidad en la desintegración del núcleo, resultando equivalente a su grado de inestabilidad.

3.3.1 Desintegración Alfa

Una partícula alfa (α) es un núcleo de helio (${}^4_2\text{He}$), y su emisión, en general, es el modo más probable de desintegración en números atómicos altos ($Z > 83$). Cuando un núcleo se desintegra y emite una partícula alfa, este pierde dos unidades de carga y cuatro unidades de masa, como se muestra en la siguiente reacción:



A raíz de la desintegración del núcleo, se libera una cantidad fija de energía (J), Q, que es igual a la diferencia de masa entre el nucleido inicial y los productos finales. Esta energía se debe distribuir debido a la conservación del momento, por lo que, la partícula alfa es monoenergética y la espectrometría alfa posible.

En muchos casos, especialmente en elementos con un número atómico menor, la emisión de una partícula alfa lleva al núcleo directamente al estado fundamental del hijo. Sin embargo, con núcleos más pesados, la desintegración puede en estados excitados del hijo (Gilmore, 2008).

3.3.2 Desintegración Beta

Si se amplía detalladamente una sección del Gráfico de Segrè (Figura 2), como se muestra en la Figura 3, se observa que hay dos rutas para alcanzar la zona de estabilidad que se encuentra a lo largo de la diagonal.

Este proceso se consigue mediante un desplazamiento a lo largo de una línea isóbara, es decir, manteniendo constante el número de masa (A), por lo que la suma de protones y neutrones no cambia. Por lo tanto, las transformaciones nucleares implican convertir neutrones en protones y viceversa.

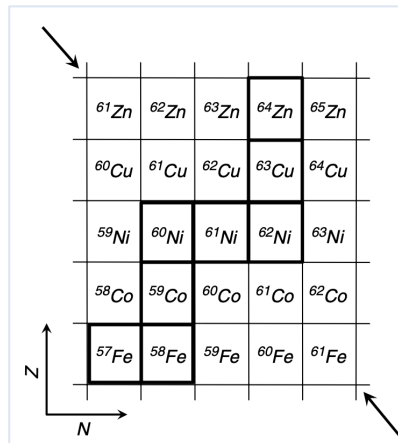


Figura 3: Ampliación Gráfica de Segrè. Fuente: (Gilmore, 2008).

3.3.2.1 Beta negativa

En la desintegración beta negativa (β^-), un neutrón del núcleo atómico se convierte en un protón, emitiendo un electrón (e^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}$).



La energía de desintegración se distribuye entre el electrón emitido y el antineutrino en proporciones variables, desde 0 hasta un valor máximo específico para cada desintegración, lo que da lugar a un espectro continuo de energías para las partículas beta. Este proceso conserva el momento y la energía, lo cual es fundamental para la estabilidad de la reacción (Gilmore, 2008).

3.3.2.2 Beta positiva

En la desintegración beta positiva (β^+), el protón del núcleo atómico se transforma en un neutrón, emitiendo un positrón (e^+) y un neutrino (ν).



Un aspecto característico de este tipo de desintegración es que, para que tenga lugar, se requiere una energía mínima de 1022 keV debido a la creación de un par electrón-positrón. Esta alta energía se debe a la gran diferencia de masa entre los nucleidos inicial y final. El positrón emitido, rápidamente encuentra un electrón, y ambos se aniquilan, generando dos fotones de 511 keV cada uno. Este proceso, conocido como radiación de aniquilación, es una característica distintiva de la desintegración beta positiva, y causa picos característicos de 511 keV y 1022 keV en los espectros gamma.

Para nucleidos deficientes en neutrones cercanos a la estabilidad, donde la energía necesaria para que ocurra no está disponible, existe un medio alternativo de desintegración: la captura electrónica. En este proceso, el electrón necesario para poder convertir el protón es capturado por el núcleo desde una de las capas electrónicas extranucleares, siendo la más probable la capa K debido a su proximidad al núcleo.

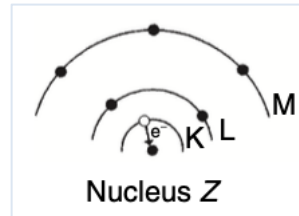


Figura 4: Esquema de captura electrónica desde la capa K. Fuente: (Gilmore, 2008).

La pérdida de un electrón en la capa K deja una vacante que es llenada por un electrón de una capa más alta y menos fuertemente ligada. La energía liberada en este proceso a menudo se manifiesta como un rayo X, conocido como fluorescencia. Esta emisión de rayos X puede ser seguida por otras de menor energía a medida que los electrones se reorganizan hacia una mayor estabilidad.

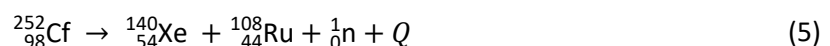
Sin embargo, la energía liberada no se manifiesta siempre como un rayo X, sino que se utiliza para liberar un electrón del átomo en su totalidad, lo que se conoce como el efecto Auger, emitiendo electrones Auger. La probabilidad de este efecto varía con el número atómico (Z); a mayor Z, habrá más rayos X y menos electrones Auger, los cuales son monoenergéticos y generalmente de baja energía, ya que son emitidos desde orbitales atómicos con menores energías de enlace.

Si la energía de desintegración es algo superior al umbral de 1022 keV, tanto la desintegración por positrones como la captura electrónica pueden ocurrir, en una proporción determinada estadísticamente por las diferentes energías de desintegración de ambos procesos (Gilmore, 2008).

3.3.3 Fisión espontánea

La fisión espontánea es un proceso en el que un núcleo pesado se divide espontáneamente, sin necesidad de ser inducido por un neutrón externo, en dos o más fragmentos más ligeros, emitiendo varios neutrones y liberando una gran cantidad de energía, típicamente alrededor de 200 MeV, superior a los procesos explicados anteriormente.

Un ejemplo sería el Californio-252, la reacción del cual se muestra, a continuación:



Este tipo de desintegración, libera gran cantidad de energía (J), la cual se distribuye entre fragmentos de fisión, neutrones y radiación gamma. Los neutrones emitidos pueden iniciar reacciones en cadena y activar otros materiales. Los productos de fisión, generalmente radiactivos, se desintegran mediante emisiones beta y gamma, mientras se estabilizan, siendo esta una característica propia de los materiales fisionables (Gilmore, 2008).

3.4 LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

La ley de desintegración radiactiva describe cómo un núcleo inestable pierde energía mediante la emisión de radiación, siguiendo un patrón estocástico, donde la probabilidad de que un núcleo se desintegre en una unidad de tiempo es constante, y se denomina constante de desintegración, λ (s^{-1}), la cual es específica para cada núcleo.

Matemáticamente, la ley de desintegración radiactiva se expresa como:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (6)$$

La solución de esta ecuación diferencial es la siguiente, e indica que el número de núcleos disminuye exponencialmente con el tiempo (s):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7)$$

Entonces si se aplica la definición de la actividad, A , que se define como el número de desintegraciones por segundo (A.H. Becquerel), se puede relacionar con la cantidad de núcleos mediante:

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

Otra medida importante es el período de semidesintegración, $T_{1/2}$ (s), que es el tiempo necesario para que la actividad inicial se reduzca a la mitad. Y a raíz de la ecuación anterior, se calcula de la siguiente forma:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (9)$$

Asimismo, la vida media de un radionúclido, τ (s), es el promedio de vida de los núcleos antes de desintegrarse, y viene definida por:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

Estas relaciones son fundamentales para entender y predecir el comportamiento de los materiales radiactivos en diversas aplicaciones, desde la datación radiométrica hasta la gestión de residuos nucleares (Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina, 1998).

3.5 SERIES DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

En una cadena de desintegración, cuando un radionucleido padre se desintegra en un radionucleido hijo, la tasa de cambio en el número de átomos del hijo está determinada por la diferencia entre la tasa de producción del padre y la tasa de decaimiento del hijo. Este proceso se puede expresar matemáticamente como:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \quad (11)$$

Si se asume que la cantidad de núcleos hijos es nula al tiempo inicial, es decir en $t = 0$, se puede expresar la relación de actividades entre el núcleo padre y el núcleo hijo mediante la siguiente ecuación:

$$A_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot A_1 \cdot (e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t}) \quad (12)$$

Asimismo, existen tres casos particulares que dependen del período de semidesintegración, los cuales se presentan a continuación en los siguientes apartados (Gilmore, 2008).

3.5.1 Equilibrio transitorio

En un equilibrio transitorio, la actividad del radionúclido hijo tiene una proporción constante con respecto a la del radionúclido padre y aparentemente decae con el período de semidesintegración del padre, es decir, $T_{1/2} \text{ padre} > T_{1/2} \text{ hijo}$.

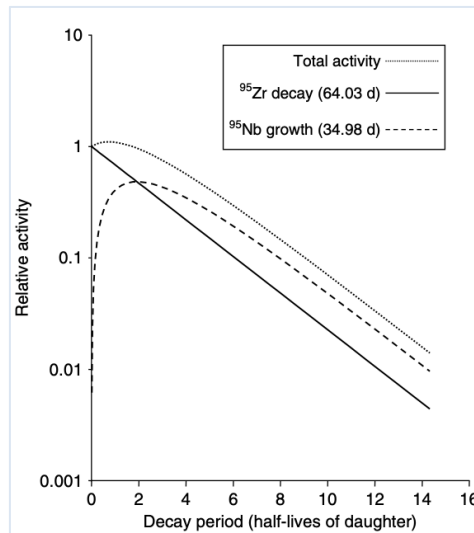


Figura 5: Representación gráfica del equilibrio transitorio del ^{95}Zr y ^{95}Nb . Fuente: (Gilmore, 2008).

En la Figura 5, se observa la desintegración del nucleido padre sin que esta se vea afectada por la ausencia o presencia del nucleido hijo, así como el aumento de la actividad del nucleido hijo. La actividad total en el sistema es la suma de las actividades de los nucleidos padre e hijo.

3.5.2 Equilibrio secular

El equilibrio secular tiene lugar cuando el período de semidesintegración del padre es mucho mayor que el del hijo, es decir, $T_{1/2} \text{ padre} \gg T_{1/2} \text{ hijo}$.

En tales situaciones, el período de semidesintegración del hijo se vuelve insignificante, por lo que la actividad del hijo y la actividad del padre tienden a igualarse, siendo esta la actividad total. A continuación, se muestra un ejemplo de equilibrio secular en la Figura 6.

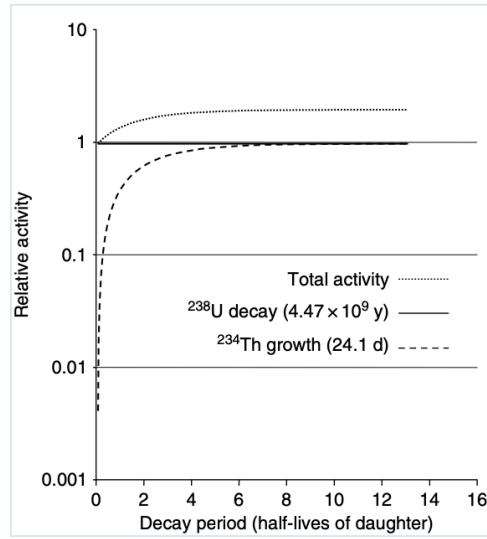


Figura 6: Representación del equilibrio secular del ^{238}U y ^{234}Th . Fuente: (Gilmore, 2008).

3.5.3 No equilibrio

En este caso, si el período de semidesintegración del radionúclido hijo es mayor que el del radionúclido padre, $T_{1/2}$ padre $<$ $T_{1/2}$ hijo, entonces, obviamente, el padre se desintegrará, dejando solo al hijo. La Figura 7, muestra el aumento de la actividad del hijo a partir de un padre el cual es inicialmente puro. En este caso, no se establece ningún equilibrio, y al final, la curva de desintegración es la del hijo que se ha generado.

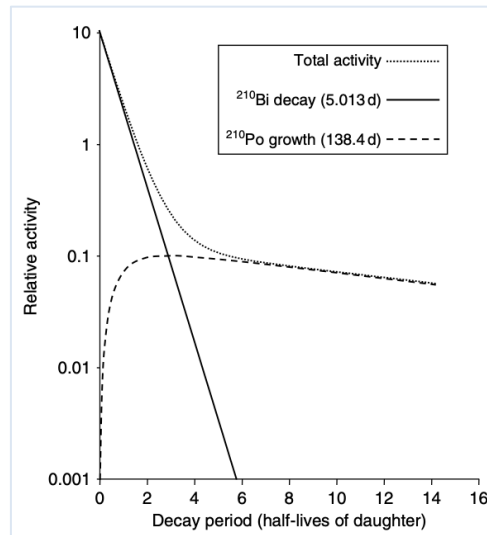


Figura 7: Representación de no equilibrio del ^{210}Bi y ^{210}Po . Fuente: (Gilmore, 2008).

3.1 CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha abordado la naturaleza de la radiactividad y la radiación, explicando la estructura atómica y la estabilidad de los núcleos. Se ha descrito cómo la radiactividad se manifiesta a través de diversos tipos de desintegración, como la alfa, la beta y la fisión espontánea. Además, se ha introducido la ley de desintegración radiactiva, destacando su papel en la comprensión de la dinámica de los radionucleidos a lo largo del tiempo, así como los conceptos de equilibrio transitorio y secular en las series de desintegración radiactiva.

En el próximo capítulo, se profundizará en el elemento del radio, como su descubrimiento, sus características, los riesgos asociados a su exposición, así como su manejo y uso en diversos contextos a lo largo del tiempo. Además, se analizará su concentración en el medio natural y en diferentes materiales, especialmente aquellos utilizados en la construcción, y se explicará la normativa correspondiente a su regulación.

4 RADIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centrará en el radio. Se detallará su origen y su descubrimiento, y se explicará cómo se forma y concentra el radio en la naturaleza, así como su distribución en diferentes entornos como suelos, rocas, biota y agua. Asimismo, se describirá la importancia del conocimiento de la concentración del radio de cara a la utilización de los materiales de construcción, y su normativa pertinente.

4.2 ORIGEN Y DESCRIPCIÓN

El radio (Ra) es un metal alcalinotérreo altamente radiactivo que se encuentra naturalmente en minerales de uranio. En su estado puro, tiene un color blanco plateado, pero reacciona rápidamente con el aire, formando una capa superficial oscura. Debido a su similitud con el calcio, el radio puede acumularse en los huesos, lo que representa un riesgo significativo para la salud a largo plazo, dada su largo periodo de semidesintegración.

Con 33 isótopos conocidos, todos radiactivos, el más común es el Ra-226, que tiene una semidesintegración de 1600 años y está presente en cantidades extremadamente pequeñas en la corteza terrestre. Fue descubierto por Marie y Pierre Curie en 1898, y tuvo una época de popularidad antes de que su uso disminuyera considerablemente debido a los riesgos, posteriormente descubiertos, asociados con su radiactividad (Lobo, 1988)

4.2.1 Descubrimiento del Radio

Marie Sklodowska, mientras estudiaba en la Universidad de la Sorbona, conoció a Pierre Curie, con quien compartía una profunda pasión por la ciencia. Inspirada por el descubrimiento de Henri Becquerel sobre la radiación emitida por el uranio, Marie decidió investigar este fenómeno en su tesis doctoral. En 1898, mientras estudiaba la pechblenda, un mineral de uranio, descubrió que la radiación emitida era mucho mayor de lo esperado, lo que la llevó a proponer la existencia de un nuevo elemento más radiactivo que el uranio, el radio. Este descubrimiento innovador en la aislación y purificación del radio les valió a Marie, Pierre y Henri Becquerel el Premio Nobel en 1903.

Con el tiempo, el radio se comercializó ampliamente, promovido como un remedio para la salud. Se abrieron clínicas y balnearios, y surgieron productos radiactivos como píldoras y agua de radio. En la medicina, el radio se utilizó en los primeros tratamientos de radioterapia para combatir el cáncer. Durante la Primera Guerra Mundial, Marie Curie equipó unidades móviles de radiología con máquinas de rayos X para ayudar en el frente.

Sin embargo, la popularidad del radio también tuvo consecuencias trágicas. En la década de 1920, el radio se utilizaba en pinturas luminiscentes para relojes y otros objetos, y las trabajadoras que manipulaban estos materiales, conocidas como las Chicas del Radio, desarrollaron graves problemas de salud debido a la ingestión accidental de este material radiactivo. Este escándalo

llevó a un mayor enfoque a la seguridad laboral y a la creación de la OSHA (Occupational Safety and Health Administration).

Para la década de 1950, el uso médico del Ra-226 había sido reemplazado por radioisótopos artificiales como el Cesio-137 e Iridio-192. A medida que la conciencia sobre los riesgos del radio aumentó, su uso comercial prácticamente desapareció en los años 60. Hoy en día, su aplicación médica es rara, con el Ra-223 siendo una excepción en ciertos tratamientos de cáncer, aunque su uso sigue disminuyendo debido a la disponibilidad de alternativas más seguras y efectivas (Lui, 2021)

4.3 EL RADIO EN LA NATURALEZA

El Ra-226 es un radionúclido emisor alfa de interés radiológico ambiental, que se encuentra de forma natural, fundamentalmente en rocas y suelos, como un descendiente de la serie radiactiva del Uranio-238 (Figura 8).

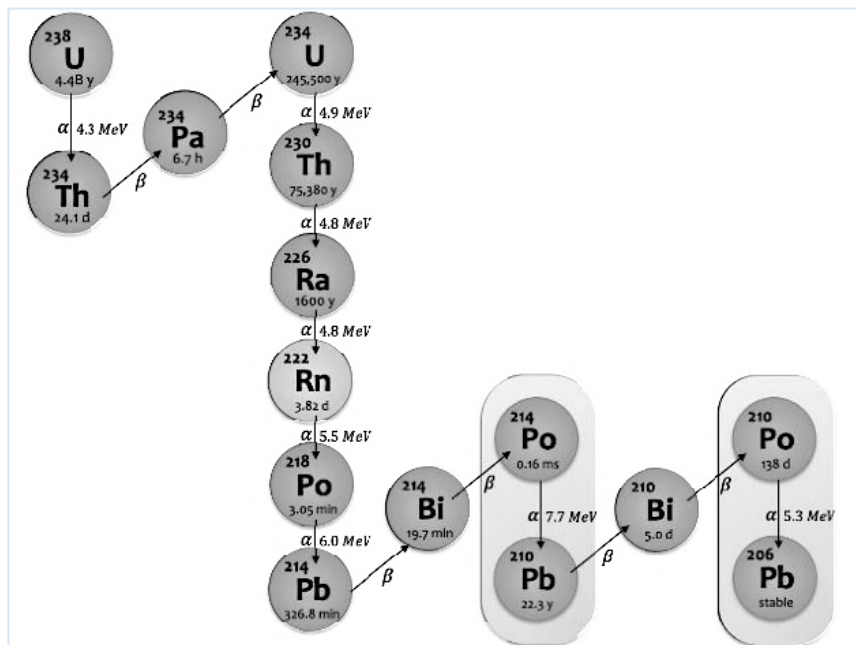


Figura 8: Cadena de desintegración del U-238. Fuente: (Fang, 2024)

El Ra-226 también puede liberarse en la biosfera a través del ciclo del combustible nuclear, particularmente durante actividades como la minería y la concentración de minerales de uranio. Otras fuentes menores, incluyen las emisiones de centrales térmicas de carbón y el uso de fosfatos minerales con niveles significativos de uranio como fertilizantes agrícolas.

Durante su desintegración, se convierte en Radón-222, un gas inerte con un período de semidesintegración de 3,828 días. A lo largo de este proceso, el radón emite partículas alfa, que, aunque tienen un alcance corto, poseen una energía elevada. Estas partículas generan productos de desintegración sólidos como el Polonio-218, Plomo-214, Bismuto-214 y Polonio-214. En la Figura 9 se muestra la cadena de desintegración del Ra-226 ampliada.

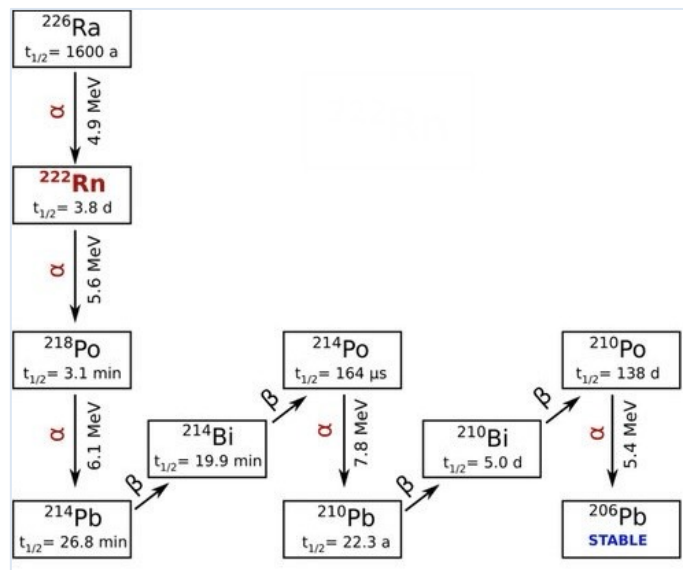


Figura 9. Subcadena de desintegración del Ra-226. Fuente: (Bruenner, 2020)

A continuación, en la Tabla 3 se presentan las especificaciones radiológicas asociadas a la subcadena Ra-226 y sus descendientes, hasta alcanzar el equilibrio con el Rn-222.

Tabla 3. Especificaciones radiológicas de la subcadena del Ra-226. Fuente: Elaboración propia.

Radionucleido	Tipo de emisión	Período de semidesintegración	Energía (MeV)
Ra-226	α	1600 años	4.9
Rn-222	α	3.8 días	5.6
Po-218	α	3.1 min	6.1
Pb-214	β^-	26.8 min	1.1
Bi-214	β^-	19.9 min	3.3
Po-214	α	164 μs	7.8

Como se explicó en el apartado 3, en este caso, debido al periodo de semidesintegración mucho menor del Rn-222 en comparación con la del Ra-226, el Rn-222 alcanza el equilibrio secular con su progenitor Ra-226 después de aproximadamente 7 periodos de semidesintegración, lo que corresponde a alrededor de 28 días. Este equilibrio se establece cuando la tasa de desintegración del Rn-222 iguala la tasa de producción derivada del Ra-226, permitiendo que la actividad del Rn-222 se mantenga constante mientras persista la cantidad de Ra-226 (L. Yu, D. Mallants and G. Olyslaegers, 2011).

El riesgo asociado con este proceso radica en dos de sus productos de desintegración, el Po-214 y el Po-218, los cuales son sólidos y pueden adherirse al polvo y aerosoles, lo que facilita su inhalación. Una vez inhalados, se depositan en los pulmones, donde las partículas alfa emitidas durante su decaimiento pueden dañar el tejido pulmonar.

Tradicionalmente, los métodos para detectar el Ra-226 en muestras ambientales han incluido la medición de la actividad alfa, la medida de su descendiente Rn-222 y la espectrometría alfa tras la electrodeposición del radio.

Sin embargo, todos estos métodos requieren una separación radioquímica, lo que puede resultar laborioso, especialmente en muestras de suelo. Por esta razón, en este tipo de muestras, la cuantificación a través de los emisores gamma de su serie está plenamente justificada.

El Ra-226 se puede concentrar en la naturaleza y pasar a los distintos compartimentos ambientales, a través de una serie de procesos que se nombran a continuación.

1. Adsorción y Desorción: El Ra-226 tiende a adherirse a superficies de minerales como arcillas, óxidos de hierro y manganeso, y materia orgánica. Este proceso de adsorción depende del pH y de la composición iónica del agua. En ambientes con pH neutro a alcalino, el radio se adhiere más fácilmente a estas superficies minerales.

Sin embargo, cuando el pH es bajo, el radio puede desorberse, es decir, liberarse nuevamente al agua. Los minerales de arcilla son especialmente importantes en este proceso debido a su alta capacidad para intercambiar cationes, lo que les permite retener el radio y luego liberarlo bajo ciertas condiciones químicas.

2. Coprecipitación: La coprecipitación es un proceso en el que el Ra-226 se integra en la estructura cristalina de ciertos minerales durante su formación. Un ejemplo típico es la barita (BaSO_4), donde el radio puede reemplazar al bario dentro de su estructura cristalina. Este fenómeno es especialmente relevante en ambientes con altos niveles de sulfatos, como los que se encuentran en áreas de minería de uranio. En la industria, se suele añadir cloruro de bario para facilitar la precipitación del radio en forma de barita insoluble, lo cual ayuda a reducir su concentración en el agua.
3. Intercambio Iónico: El radio puede ser intercambiado con otros cationes, como el calcio y el magnesio, presentes en minerales y sedimentos. Este intercambio es más común en ambientes donde hay una alta concentración de estos cationes, lo que facilita que el radio pase de la fase sólida a la fase líquida, es decir, que se disuelva en el agua.
4. Condiciones Redox: Las condiciones de oxidación-reducción (redox) influyen en cómo se mueve el radio en el medio ambiente. En ambientes reductores, como los sedimentos anóxicos, el radio tiende a formar compuestos insolubles como sulfuros o hidróxidos de metales, lo que lo mantiene inmovilizado. Por otro lado, en condiciones oxidantes, los minerales que contienen radio pueden disolverse, lo que aumenta la movilidad del radio y facilita su desplazamiento en el agua.

4.3.1 Niveles de actividad en muestras ambientales

El contenido de Ra-226 en suelos, agua potable y alimentos varía considerablemente según las condiciones geológicas y ambientales. Seguidamente, se va a adjuntar algunos de los niveles más significativos de actividad de Ra-226 en muestras ambientales, como de aguas, de biota y de suelos de distintos países.

En los alimentos, el Ra-226 se puede acumular a través de las plantas que absorben este elemento del suelo y del agua. La cantidad de Ra-226 en los alimentos depende de la concentración en el suelo y de la capacidad de las plantas para absorberlo, lo que puede llevar a diferencias significativas en la exposición según la dieta y la procedencia de los alimentos.

Tabla 4. Niveles de actividad del Ra-226 en muestras ambientales de biota. Fuente: (UNSCEAR, 2000).

País	Concentración de Ra-226 (mBq/Kg) en:					
	Productos lácteos	Productos cárnicos	Productos de grano	Verduras de hoja	Tubérculos y frutas	Productos pesqueros
Estados Unidos	5.7	20	7 – 100	56	7 – 47	30 – 59
China	6	41	17	75	63	39
Japón	12	36	14	-	11	-
Italia	3 – 19	-	-	27 – 44	14 – 25	
Alemania	2 – 130	30 – 220	20 – 2900	6 – 1150	5 – 9400	100 – 7400
Polonia	10	11 – 19	80 – 110	37 – 43	11 – 215	28 – 43
Rumania	0.9 – 44	2 – 30	30 – 90	-	9 – 190	-
Reino Unido	<0.4 - 200	2.6 – 74	0.7 – 5200	2.2 - 170	9 - 41	8.5 - 2100
Francia	-	-	-			37

Como se puede observar, existe una variabilidad significativa según el país y el tipo de producto. En Estados Unidos, las concentraciones de Ra-226 oscilan entre 5.7 mBq/Kg en productos lácteos y hasta 100 mBq/Kg en productos de grano. China destaca por tener niveles relativamente altos en tubérculos, frutas y verduras de hoja, alcanzando hasta 75 mBq/Kg, lo que podría deberse a condiciones geológicas y agrícolas específicas. Por otro lado, Japón e Italia muestran concentraciones más moderadas.

En el agua potable, los niveles de Ra-226 dependen de su interacción con formaciones rocosas ricas en uranio. Las aguas subterráneas prolongadamente expuestas a estas formaciones pueden contener más Ra-226, y los tratamientos convencionales de agua no siempre lo eliminan correctamente, lo que representa un riesgo para los consumidores. Y en cuanto a suelos y rocas, el Ra-226 se concentra más en áreas con alta actividad geológica, como zonas volcánicas o con formaciones de granito. La distribución no es uniforme y depende de las características fisicoquímicas del suelo o de la roca a estudiar.

Tabla 5. Niveles de actividad del Ra-226 en muestras ambientales de suelos y agua potable.

Fuente: (UNSCEAR, 2000).

País	Concentración en suelos (Bq/Kg)	Concentración agua potable (mBq/Kg)
Estonia	6 - 310	-
Suecia	12 - 170	-
Alemania	5 - 200	1 - 1800
Irlanda	10 - 200	-
Suiza	10 - 900	0 - 1500
Bulgaria	12 - 210	-
Polonia	5 - 120	1.7 – 4.5
Eslovaquia	12 - 120	-
Chipre	0 - 120	-
Grecia	1 - 240	-
España	6 - 250	<20 - 4000
Algeria	5 - 180	-
Costa Rica	11 - 130	-
Estados Unidos	8 - 160	0.4 - 1.8
China	2 - 440	0.2 - 120
Kazakhstan	12 - 120	-
Italia	-	0.2 - 1200
Rumania	8 - 60	0.7 - 21
Reino Unido	37	0 - 180
Francia	-	7 - 700
Finlandia	-	10 - 49000

La media global de Ra-226 para los suelos oscila de 17 – 60 Bq/Kg (UNSCEAR, 2000). Tal y como se observa, la mayoría de las concentraciones para los suelos oscilan entre 5 y 900 Bq/kg, siendo más altos en lugares como Suiza, lo que sugiere una mayor presencia de radiactividad natural debido a las características geológicas de la región, como ya se ha comentado anteriormente. Las actividades en agua potable, las concentraciones varían ampliamente, desde valores bajos como 0.2 mBq/L en China hasta valores extremadamente altos como 49000 mBq/L en Finlandia, lo que representa un riesgo considerable para la salud si no se controla adecuadamente.

4.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Como ya se ha comentado anteriormente, la radiactividad en estos materiales proviene principalmente de radionucleidos naturales como el Ra-226, que es parte de la serie de desintegración del U-238, y se encuentra comúnmente en minerales de uranio en las rocas y suelos. Otros elementos como el Th-232 y el K-40 también contribuyen a esta radiactividad, que está presente en diferentes concentraciones en rocas como granito, pizarra y mármol, ampliamente utilizados en la construcción.

4.4.1 Niveles de radiactividad en materiales de construcción

El nivel de Ra-226 en materiales de construcción puede variar considerablemente dependiendo del tipo de roca o suelo de origen.

A continuación, en la *Tabla 6*, se muestran las concentraciones típicas que presentan distintos materiales de construcción y subproductos industriales más comunes utilizados como materiales de construcción en la Unión Europea.

Tabla 6. Concentración típica y máxima de actividad del Ra-226 en los materiales de construcción y subproductos industriales más comunes, utilizados como materiales de construcción en la Unión Europea. Fuente: (B. Piedecausa, Julio-Agosto2011).

Materiales de construcción comunes	Valores normales de concentración de actividad (Bq/Kg)	Valores máximos de concentración de actividad (Bq/Kg)
Hormigón	40	240
Hormigón aireado ligero	60	2600
Ladrillos de arcilla roja	50	200
Ladrillos de limos/arenas	10	25
Piedra natural	60	500
Yeso natural	10	70
Fosfoyesos	390	1100
Escorias de alto horno	270	2100
Cenizas volantes procedente de la combustión del carbón	180	1110

Estas variaciones que se pueden observar reflejan las diferencias en la composición geológica y en la historia geológica de los materiales.

La radiactividad natural en los materiales de construcción es un factor importante que considerar durante la planificación y construcción de edificios, ya que la evaluación de dichos estos materiales, permite identificar y mitigar posibles riesgos para la salud, asegurando que las dosis de radiación recibidas por los ocupantes de los edificios se mantengan dentro de los límites seguros. Esto se logra a través de mediciones precisas y el cálculo de índices de riesgo radiactivo, los cuales están estandarizados en diversas normativas internacionales, como se explica en el apartado 4.4.2.

4.4.2 Normativa

En el reglamento del Real Decreto 1029/2022 mencionado ya en el inicio del presente documento, se establecen las limitaciones de dosis, que varían según la clasificación de las personas expuestas.

A continuación, se detallan estos límites en la *Tabla 7*, la cual especifica las dosis máximas permitidas para diferentes categorías de individuos, así como en distintas partes del cuerpo, asegurando así la protección adecuada contra los efectos nocivos de la radiación.

Tabla 7: Límites de dosis establecidos según el Real Decreto 1029/2022 publicado en el BOE. Fuente: (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2022)

Clasificación personal	Límite de dosis efectiva	Límite de dosis equivalente para el cristalino	Límite de dosis para la piel y extremidades
Trabajadores expuestos	20 mSv/año	100 mSv/año	500 mSv/año
Miembros del público	1 mSv/año	15 mSv/año	50 Sv/año

Por otra parte, este reglamento también establece, en su Anexo VIII, el uso del índice de concentración de actividad para evaluar la radiación gamma emitida por materiales de construcción que contienen radionucleidos naturales, como el Ra-226, Th-232 y K-40. Este índice es una medida que permite determinar la seguridad radiológica de los materiales, asegurando que no contribuyan significativamente a la dosis de radiación recibida por los individuos, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I = C_{\text{Ra-226}}/300 + C_{\text{Th-232}}/200 + C_{\text{K-40}}/3000 \quad (13)$$

Donde, $C_{\text{Ra-226}}$, $C_{\text{Th-232}}$ y $C_{\text{K-40}}$ son las concentraciones de actividad de los correspondientes radionucleidos en el material de construcción (Bq/Kg), lo que corrobora la necesidad de medir de forma cuantitativa y lo mejor posible estas concentraciones, entre ellas la del Ra-226.

El índice de concentración de actividad se utiliza para evaluar la dosis adicional de radiación gamma que se podría recibir dentro de un edificio construido con materiales específicos, en comparación con la exposición al aire libre. Este índice se aplica al material de construcción completo y no a sus componentes individuales, a menos que esos componentes también sean considerados materiales de construcción.

Un valor de 1 en este índice actúa como un umbral conservador para identificar materiales que podrían exceder los niveles de referencia de radiación establecidos. Además, el cálculo de la dosis de radiación considera factores como la densidad, el espesor del material y el tipo de uso del material en la construcción.

4.5 CONCLUSIONES

En este apartado, se ha detallado todo lo relacionado con el radio, como su descubrimiento, sus características, etc., y también se han especificado los niveles de radiactividad en diferentes medios ambientales, como suelos, rocas y agua, así como los materiales de construcción, prestando especial atención a las normativas existentes y su impacto en la seguridad ambiental y la salud pública.

En el siguiente capítulo, se introducirá la radiación gamma. Se explorará su origen, cómo interactúa con la materia examinando sus interacciones con la materia y las técnicas de espectrometría utilizadas para su medición.

5 RADIACIÓN GAMMA

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se introducirá la radiación gamma, un tipo de radiación electromagnética que, a diferencia de las partículas alfa y beta, carece de masa y carga eléctrica.

Se explorarán los principios fundamentales de la radiación gamma, incluyendo cómo se genera y cómo interactúa con la materia. Además, se abordará la importancia de la espectrometría gamma, una técnica clave para la identificación y cuantificación de radionucleidos en diversos materiales. Así como, las características particulares que presenta, y se explicará el funcionamiento del detector empleado en el laboratorio.

5.2 DESCRIPCIÓN

Como se ha explicado anteriormente, la emisión de radiación gamma no se considera una forma de desintegración radiactiva en sí misma, esto es debido a que ésta no implica un cambio en el número de protones (Z) o neutrones (N) en el núcleo, manteniéndose constante el número másico (A).

La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética, de igual forma que las ondas radio, microondas y la luz visible. Si se observa el espectro electromagnético más detalladamente como en la Figura X, la radiación gamma está en la parte más energética, habiendo un solape con los Rayos X en la parte baja energética de la radiación gamma.

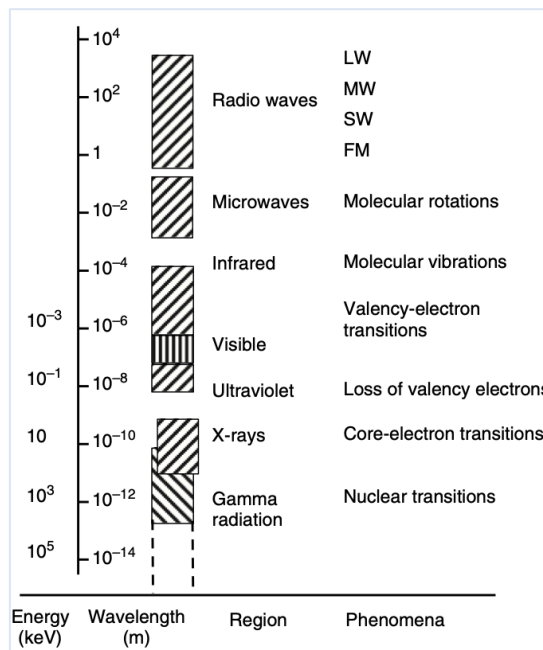


Figura 10. Espectro electromagnético detallado. Fuente: (Gilmore, 2008).

Este tipo de radiación se produce cuando un núcleo en estado excitado, libera un exceso de energía acumulada, es decir, fotones de alta energía, y pasa a un estado de menor energía, alcanzando así su estado fundamental. Este fenómeno suele ocurrir después de las otras formas de desintegración, como las desintegraciones alfa, beta o la fisión espontánea, que dejan a los núcleos hijos en un estado excitado.

Este estado excitado se conoce como estado isomérico cuando su duración es lo suficientemente larga como para ser medible, que, por lo general, las transiciones gamma ocurren en el orden de 10^{-12} segundos, siendo este un rango de medida aceptable. Sin embargo, en algunos casos, los núclidos pueden permanecer en este estado por un período prolongado, que se denomina estado metaestable, indicándose con una "m" como superíndice junto al número másico. Así pues, se llama transición isomérica (IT), al proceso cuando un núcleo en un estado isomérico emite radiación gamma y baja un nivel de energía.

Además, existen otros dos procesos que permiten la desexcitación de nucleones con niveles de energía altos. Uno es la producción de pares, que requiere una energía mínima para ocurrir y es menos común, y el otro es la conversión interna (IC), que es un proceso con más probabilidad de ocurrir, en el que la energía excedente del nucleón se transfiere a un electrón del átomo, expulsándolo del mismo. Esto crea una vacante que se llena con un electrón de capas superiores, generando rayos X o electrones Auger, de manera parecida a lo que ocurre en la captura electrónica.

Este tipo de situaciones plantea varios desafíos, ya que identificar las radiaciones emitidas (como electrones Auger o rayos X) puede ser complejo y es crucial entender qué proceso está ocurriendo. En el caso de la captura electrónica, la radiación emitida es particular del producto de la desintegración. Sin embargo, en la conversión interna, como no hay un cambio en la identidad del átomo (N, Z), las radiaciones son características tanto del átomo original como del núcleo excitado, solo que corresponden a diferentes estados energéticos.

En la espectrometría gamma, es importante considerar que no toda la probabilidad de desintegración de un núcleo progenitor se traduce en la emisión de un rayo gamma, ya que parte de la energía puede ser utilizada en la conversión interna.

Por ejemplo, en la *Figura 11*, se observa como el Cesio-137 puede desintegrarse de dos maneras: en un 94,36% de los casos, lo hace mediante desintegración beta negativa, quedando en un estado excitado a 661,657 keV, desde donde tiene un 84,99% de probabilidad de emitir un fotón. En el 5,6% restante de los casos, el Cs-137 decae, de nuevo por beta negativa, directamente a Ba-137. Esta información es utilizada en las bases de datos para caracterizar los picos gamma, especificando la energía del fotopico (E, en keV) y la intensidad (I), que es la probabilidad de emisión de un fotón para esa energía (%).

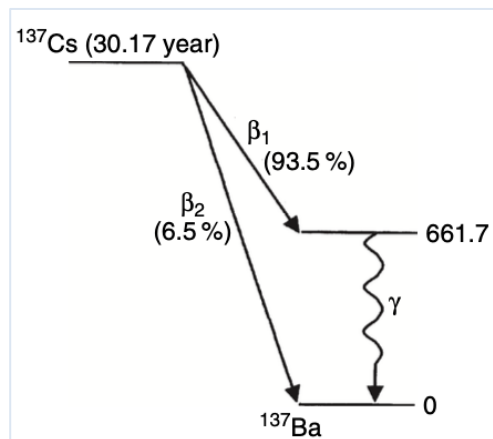


Figura 11. Esquema de la cadena de semidesintegración del Cs-137. Fuente: (Gilmore, 2008).

No toda la probabilidad de una desintegración se traduce en la emisión de un fotón con una energía específica. También hay otras fuentes de fotones, como la radiación de aniquilación, explicada en el apartado 3.3.2.2 de la radiación beta positiva (Gilmore, 2008).

5.2.1 Interacciones con la materia

Los detectores de partículas y radiación funcionan mediante la interacción de partículas cargadas con el material del detector, que produce una señal eléctrica. En concreto, las radiaciones alfa y beta al generar la ionización del medio se pueden medir fácilmente en las cámaras de ionización.

Sin embargo, para la radiación gamma, la cual consiste en fotones sin carga, la energía se transfiere a los electrones del material, generando la ionización que se mide. Este proceso se describe con coeficientes de atenuación, que dependen del número atómico del material. Así pues, se ha de distinguir entre la atenuación, que es la energía sustraída, y la absorción, que es la energía efectivamente absorbida, ya que no toda la energía transferida se absorbe, especialmente a altas energías, como se puede observar en la Figura 12.

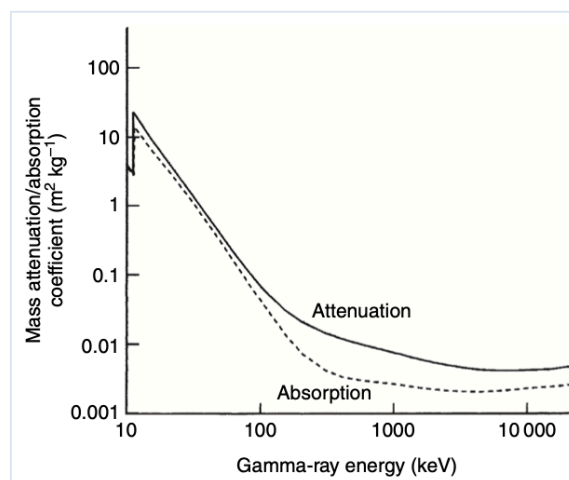


Figura 12. Comparación de los coeficientes de absorción y atenuación. Fuente: (Gilmore, 2008).

A continuación, se van a describir los tres métodos principales por los cuales los fotones interactúan con la materia: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. Como se muestra en la *Figura 13*, en la atenuación de la radiación gamma, la influencia de cada uno de ellos varía según la energía del fotón.

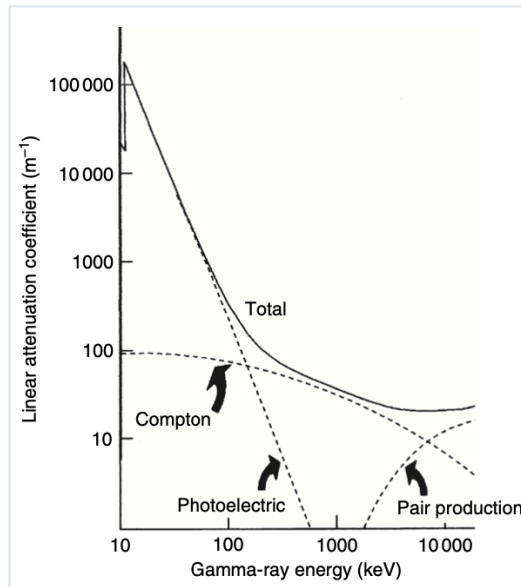


Figura 13. Efecto de los métodos de interacción sobre el coeficiente de atenuación lineal. Fuente: (Gilmore, 2008).

5.2.1.1 Efecto fotoeléctrico:

Como se muestra en la *Figura 14*, este proceso ocurre cuando un fotón incide transfiriendo toda su energía a un electrón de una capa interna del átomo, generalmente de la capa K, lo que resulta en la ionización del átomo y la expulsión de dicho electrón (fotoelectrón). Para que ocurra dicha ionización, la energía del fotón tiene que ser mayor a la energía de enlace del electrón.

Una vez que el electrón ha sido expulsado, la vacante que queda en la capa interna puede ser ocupada por otro electrón de alguna capa superior, que produce emisión de rayos X. Esta reorganización electrónica es importante en la detección de la radiación, ya que contribuye al espectro observado posteriormente.

El efecto fotoeléctrico predomina en bajas energías de fotones, y es más probable en materiales con números atómicos altos, debido a la mayor probabilidad de interacción con los electrones fuertemente ligados. Este proceso es muy importante para la detección de fotones en espectrometría gamma, ya que la energía transferida a los fotoelectrones y la posterior emisión de rayos X, permiten la medición precisa de la energía del fotón incidente, proporcionando información significativa sobre la composición y estructura de los materiales estudiados (Gilmore, 2008).

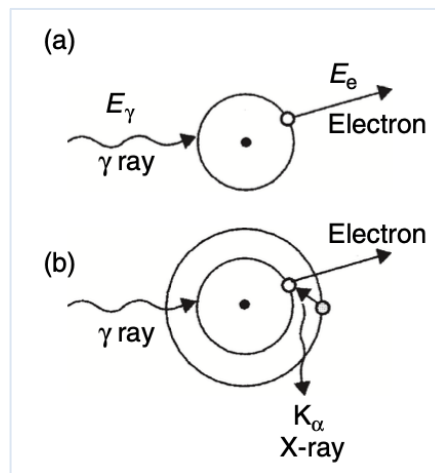


Figura 14. Esquema del efecto fotoeléctrico (a) y posterior emisión de rayos X (b). Fuente: (Gilmore, 2008).

5.2.1.2 Efecto Compton:

Como se muestra en la Figura 15, este fenómeno tiene lugar cuando un fotón incidente colisiona con un electrón libre o débilmente ligado a un átomo, transfiriendo así el fotón parte de su energía al electrón, expulsándolo del átomo y resultando en un fotón dispersado con menor energía y una dirección diferente. La cantidad de energía transferida al electrón y el ángulo de dispersión del fotón, el cual puede variar de 0 a 180°, dependen de la energía inicial del fotón y del ángulo de dispersión.

A medida que aumenta la energía del fotón incidente, la probabilidad del efecto Compton también aumenta, hasta cierto punto, después del cual otros mecanismos de interacción, como la producción de pares, se vuelven más dominantes.

A medida que la energía del fotón incidente aumenta, la probabilidad de que ocurra el efecto Compton también lo hace, pero hasta cierto punto donde otros mecanismos de interacción, como la producción de pares, predominan más. Este efecto es particularmente relevante en espectrometría gamma, porque contribuye a la formación de un espectro continuo en lugar de picos discretos, complicando la interpretación de los datos (Gilmore, 2008).

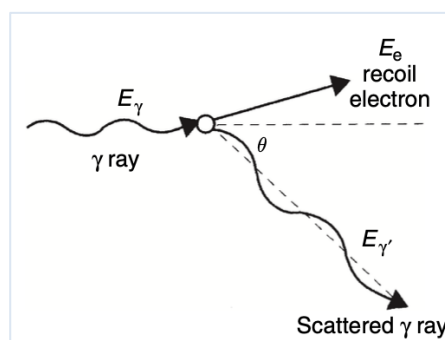


Figura 15. Esquema del mecanismo de dispersión Compton. Fuente: (Gilmore, 2008).

5.2.1.3 Producción de pares:

En este proceso, como se muestra en la *Figura 16*, un fotón de alta energía interactúa con el campo eléctrico de un núcleo atómico, transformándose en un electrón y un positrón. Esta transformación cumple con la ecuación (1) de A. Einstein, donde la energía del fotón se convierte en la masa de las partículas. Este proceso solo puede ocurrir si la energía del fotón es al menos el doble de la masa en reposo del electrón, es decir, 1.022 MeV.

Una vez que el par electrón-positrón se ha creado, el positrón, al ser una partícula de antimateria, eventualmente se encontrará con un electrón, llevando a un proceso conocido como aniquilación, proceso explicado en el apartado 3.3.2.2 de la radiación beta positiva, que también es característico de la producción de pares.

En los detectores de espectrometría gamma, la identificación de los fotones de aniquilación permite la cuantificación precisa de la energía y la caracterización de las fuentes radiactivas, fundamental para entender y controlar los efectos de la radiación en distintos entornos (Gilmore, 2008).

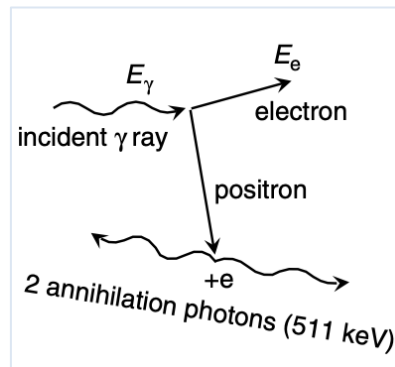


Figura 16. Esquema del mecanismo de producción de pares. Fuente: (Gilmore, 2008).

5.3 ESPECTROMETRÍA GAMMA

5.3.1 Definición

La espectrometría gamma es una técnica que se utiliza para medir la energía y la intensidad de los rayos gamma que son emitidos por radionucleidos presentes en una muestra a caracterizar. Al interactuar con un detector, los fotones generan señales eléctricas que son proporcionales a su energía. Estas señales se recopilan y se representan gráficamente en un espectro, donde se pueden identificar y cuantificar las energías específicas de los fotones y, por tanto, dichos radionucleidos emisores.

La base de esta técnica radica en la capacidad del detector para convertir la energía de los fotones en señales eléctricas, proceso en el cual se involucra la interacción de los rayos gamma con los átomos del material del detector, generalmente mediante los mecanismos explicados ya anteriormente en el apartado 5.2.1. Estos mecanismos determinan la forma en la que se transfiere la energía de los fotones a los electrones del detector, generando así las señales eléctricas necesarias para la creación del espectro de la muestra a determinar.

Los fotones pueden ceder su energía de diferentes maneras dentro del detector, dependiendo de factores como la energía del fotón, el número atómico del material del detector y el ángulo de incidencia y dispersión. Además, la geometría y el tamaño del detector juegan un papel importante en la eficiencia de detección y en la forma del espectro. A continuación, en la *Tabla 8*, se va a detallar las distintas posibilidades según el tamaño del detector (Gilmore, 2008).

Tabla 8. Posibilidades de la espectrometría gamma según el tamaño del detector. Fuente: elaboración propia.

Tipos	Descripción
Detector de gran tamaño	<p>El detector puede absorber toda la energía de los fotones, resultando en picos de energía total claros y definidos en el espectro. Se puede asumir que cada fotón interactúa completamente dentro del detector, transfiriendo así toda su energía a los electrones del material a través de los mecanismos descritos en el apartado 5.2.1, sin pérdidas de energía.</p> <p>Cuando un fotón interactúa por efecto fotoeléctrico, toda su energía se transfiere a un solo electrón, resultando en un pico de energía total.</p> <p>En la dispersión Compton, un fotón transfiere parte de su energía a un electrón, y el fotón resultante sigue interactuando a través de sucesivas dispersiones Compton, hasta que dicho fotón tiene tan poca energía que es completamente absorbido por efecto fotoeléctrico.</p> <p>En la producción de pares, el fotón mediante la aniquilación (apartado 3.3.2.2) produce dos fotones de 511 keV cada uno, los cuales también son completamente absorbidos en un detector grande.</p>
Detector de pequeño tamaño	<p>En este caso, parte de la energía puede escapar, creando así un espectro con picos de escape y continuos Compton. No toda la energía de los fotones incidentes se absorbe, ya que solo una interacción principal ocurre antes de que el fotón restante escape del detector.</p> <p>Una interacción de efecto fotoeléctrico absorbe y registra toda la energía del fotón, formando un pico de energía total en el espectro. Si tiene lugar una dispersión Compton, el fotón dispersado puede escapar del detector, creando así un espectro continuo Compton.</p> <p>En la producción de pares, al producirse los dos fotones de 511 keV por la aniquilación (apartado 3.3.2.2), uno o ambos fotones pueden escapar, generando así picos de escape simples o dobles en el espectro.</p> <p>Además, los rayos X generados por la reorganización de electrones pueden también escapar del detector, produciendo picos adicionales a bajas energías.</p>

<p>Detector real</p>	<p>Estos detectores son una situación intermedia entre los de gran y pequeño tamaño. La absorción completa de la energía del fotón depende de su geometría y tamaño. Los tres mecanismos de interacción (apartado 5.2.1) pueden ocurrir, pero no siempre se llega a absorber toda la energía del fotón.</p> <p>El efecto fotoeléctrico puede generar picos de energía total, aunque si la interacción ocurre cerca de la superficie del detector, pueden aparecer rayos X de escape.</p> <p>En el efecto Compton, los fotones dispersados pueden seguir interactuando dentro del detector, creando así un continuo Compton en el espectro. La producción de pares puede causar picos de escape simples o dobles si los fotones de aniquilación (apartado 3.3.2.2), se escapan.</p>
----------------------	--

Todo lo anteriormente comentado en la *Tabla 8*, se puede observar en la *Figura 17*. Se aprecia como en el espectro del detector de gran tamaño (c), solo es posible ver un pico con la energía total y no se distinguen los 3 mecanismos posibles de interacción por los fotones.

Asimismo, para el espectro de detector de pequeño tamaño (a), ocurre todo lo contrario, ya que es posible apreciar dichos mecanismos más distintivamente. Por último, en el espectro del detector real (b), se ven tanto los 3 mecanismos claramente separados, así como en un pico sin clara distinción con la energía total, debido a la mezcla de dichos mecanismos teniendo lugar al mismo tiempo.

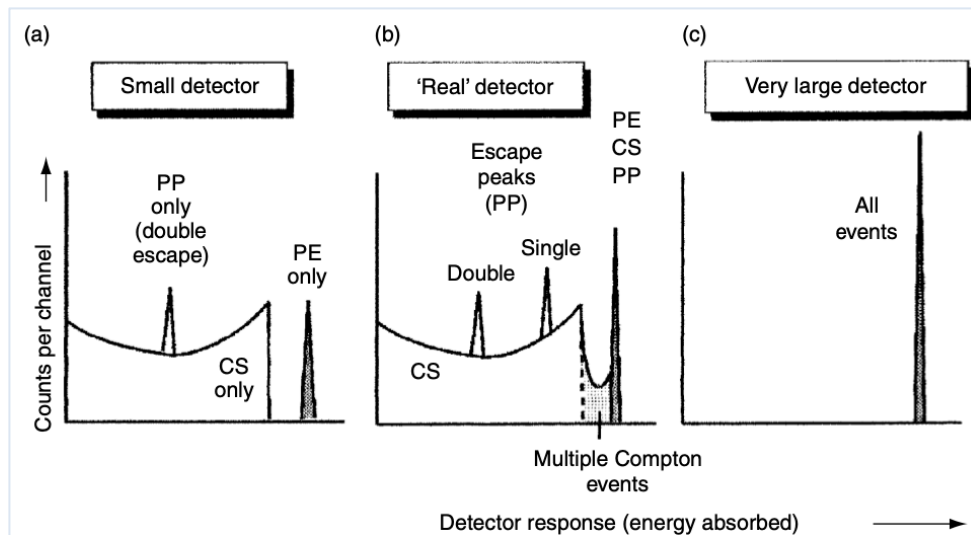


Figura 17. Espectros esperados de detectores de diferentes tamaños: PE, efecto fotoeléctrico; CS, dispersión Compton; PP, producción de pares. Fuente: (Gilmore, 2008).

5.3.2 Características

Además de las características inherentes al espectro gamma debido a la naturaleza del proceso de medición, se identifican otras particularidades distintas.

5.3.2.1 *Efectos de suma*

El efecto suma son los problemas relacionados con el tiempo de respuesta del detector, los cuales pueden hacer que las energías de diferentes radiaciones gamma se sumen en el sistema. Existen dos tipos principales de picos suma, los cuales se describen seguidamente en la *Tabla 9* (ORTEC, 2006):

Tabla 9. Tipos de efectos de suma. Fuente: elaboración propia.

Tipos	Descripción
Suma por coincidencia	Ocurre cuando un nucleido emite radiación gamma en cascada durante su desintegración, detectándose los rayos gamma de forma individual o agrupada.
Suma por azar	Ocurre cuando múltiples señales de fotones son absorbidas por el detector en un solo pulso, lo que da lugar a la suma de sus energías en el espectro. Esta coincidencia puede generar un pico con el doble de la energía de los picos principales, o provocar una pérdida de eficiencia si involucra tanto un pico de energía total, como una interacción secundaria.

5.3.2.2 *Interferencias*

La interferencia en espectrometría gamma tiene lugar cuando dos fotones de energía parecida se superponen en un espectro, creando un único pico cuya separación es compleja y depende de la resolución del detector. Este fenómeno es común en el estudio de muestras radiactivas naturales y puede dificultar la cuantificación precisa de los radionucleidos.

La norma UNE-EN ISO 18589-3 (Comité técnico CTN 73. Energía nuclear, tecnologías nucleares y protección radiológica, 2018), detalla las principales líneas gamma y las interferencias más problemáticas asociadas. En este caso, se han seleccionado la del Ra-226 como progenitor y sus respectivos descendientes, como se muestran a continuación en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Líneas gamma seleccionadas para el Ra-226 para la identificación de radionucleidos y sus posibles interferencias. Fuente: (Comité técnico CTN 73. Energía nuclear, tecnologías nucleares y protección radiológica, 2018).

Radionucleido determinado	Radionucleido medido	Energía Ev (keV)	Probabilidad de emisión, I _E (%)	Radionucleido interferente (Ev, I _E)
Ra-226	Ra-226	186.211	3.555	U-235 (185.720 keV; 57.0%)
Ra-226	Pb-214	295.224	18.414	Bi-211 (351.03 keV; 13.00%)
		351.932	35.60	-
Ra-226	Bi-214	609.312	44.49	-
		1120.287	14.91	-
		1764.494	15.31	-

5.3.2.3 Fondo Ambiental

El fondo en espectrometría gamma proviene de dos fuentes:

- Los materiales del detector y sus interacciones con la radiación gamma.
- El fondo ambiental de la radiación natural, incluyendo rayos cósmicos y emisores gamma de las series del uranio, torio y el potasio-40, presentes en el ambiente, y materiales de construcción.

Y debe tenerse siempre en cuenta para realizar cualquier cuantificación mediante espectrometría gamma.

5.3.3 Detectores semiconductores

Los detectores de semiconductores, es decir, aquellos fabricados con materiales semiconductores funcionan mediante la transferencia de energía de la radiación a los electrones del material, generando así fotoelectrones energéticos y huecos.

Estos detectores permiten que los electrones excitados, mediante la energía absorbida, se desplacen a la banda de conducción, creando estados que se utilizan para medir la energía de la radiación, mientras que los huecos generan una cascada de electrones menos energéticos. Este proceso es esencial para el funcionamiento de los espectrómetros gamma, los cuales se utilizan para identificar y cuantificar emisores gamma en una muestra.

Un ejemplo de este tipo de detectores es el de germanio ultrapuro, como se muestra en la *Figura 18*, que es el utilizado en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universitat Politècnica de València. Este dispositivo consta de un cristal de germanio puro, protegido por una envoltura de acero inoxidable y conectado a un criostato de cobre.

Todo el conjunto se mantiene a baja temperatura mediante inmersión en nitrógeno líquido, lo cual es fundamental para su funcionamiento. Además, cuenta con un preamplificador que procesa las señales eléctricas iniciales generadas por la interacción de la radiación con el detector.

El sistema se alimenta con una fuente de alta tensión continua, que debe ser de al menos 3 kV, y cuenta con una protección de apagado remoto que evita daños al cristal en caso de un aumento de temperatura. Los pulsos generados en el detector son enviados al amplificador lineal, que los acondiciona para su posterior procesamiento en la unidad multicanal (MCB).

Esta unidad multicanal convierte los impulsos analógicos en impulsos digitales, que luego se clasifican en canales específicos según su altura, que es proporcional a la energía gamma que se ha depositado en el detector. Existen unidades multicanal en el mercado con capacidades que varían desde 2000 hasta 16000 canales.

Finalmente, esta unidad multicanal se conecta a un ordenador, donde un software de adquisición, siendo en este caso el GammaVision, permite la visualización y el tratamiento del espectro gamma, proporcionando datos precisos sobre la muestra analizada.



Figura 18. Ejemplo detector de germanio ultrapuro del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UPV. Fuente: Elaboración propia.

5.4 CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha explicado la radiación gamma, comenzando por su naturaleza y cómo interactúa con la materia, enfatizando los mecanismos clave como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. También, se ha detallado la espectrometría gamma, destacando sus características, el funcionamiento de los detectores semiconductores y los retos técnicos como los efectos de suma y las interferencias.

En el siguiente capítulo, se procederá a examinar las normas UNE-CEN/TS 1726:2018 y prEN 17216:2023, enfocándose en los estándares y directrices para la medición y cuantificación de la radiación gamma en materiales de construcción. Se realizará una comparativa de lo incorporado en la nueva norma, así como se explicarán los resultados del estudio de intercomparación realizado para poder validar la nueva norma.

6 NORMA UNE-CEN/TS 17216:2018

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se va a revisar la normativa que aplica directamente a este Trabajo de Fin de Grado. Así, se realizará una revisión de la norma provisional estipulada, UNE-CEN/TS 17216:2018, para compararla con la norma propuesta, prEN 17216:2023, pendiente de aprobación y publicación.

El documento prEN 17216:2023, desarrollado por el Comité Técnico CEN/TC 351, está en proceso de revisión en el Comité Europeo de Normalización (CEN), encargado del desarrollo de normas europeas, y reemplazará a la versión anterior de 2018. Las principales actualizaciones incluyen la conversión de la especificación técnica en una norma europea, la incorporación de datos de validación de laboratorios sobre repetibilidad y reproducibilidad, y la actualización de referencias.

Finalmente, se comentarán los resultados del estudio interlaboratorio publicado por el Joint Research Center (JRC), centro de investigación de la Comisión Europea que proporciona asesoramiento científico y técnico independiente para apoyar las políticas de la Unión Europea, con el objetivo de cuantificar la precisión de la norma.

6.2 COMPARATIVA UNE-CEN/TS 1726:2018 CON prEN 17216:2023

A continuación, se detallarán de forma resumida los distintos apartados de la norma, así como la distinción que existe de una a la otra.

6.2.1 Principios del método de ensayo

En el apartado 5 de la norma UNE-CEN/TS 17216:2018, titulado "Principios del método de ensayo", se detalla cómo medir las concentraciones de radionúclidos emisores de rayos gamma en materiales de construcción usando espectrometría gamma. El método se basa en el análisis de las energías y picos en el espectro gamma, y asegura que la actividad medida refleja el comportamiento radiológico del material, independientemente de su forma física.

Ambas normas subrayan la importancia de alcanzar el equilibrio secular en los radionúclidos y sus productos de desintegración, y proporcionan directrices para manejar posibles desequilibrios en la cadena de desintegración del Th-232.

Una diferencia clave entre las normas, es el enfoque en la calibración y precisión. La norma UNE-CEN/TS 17216:2018 exige calibración con materiales que imiten la composición y densidad del material a analizar, mientras que la prEN 17216:2023 acepta métodos de calibración generales siempre que se incluya una evaluación de incertidumbre.

6.2.2 Muestreo

En la norma prEN 17216:2023 al inicio de este subapartado se adjunta un diagrama del esquema de muestreo más detallado que el de la norma UNE-CEN/TS 17216:2018, el cual se adjunta a continuación.

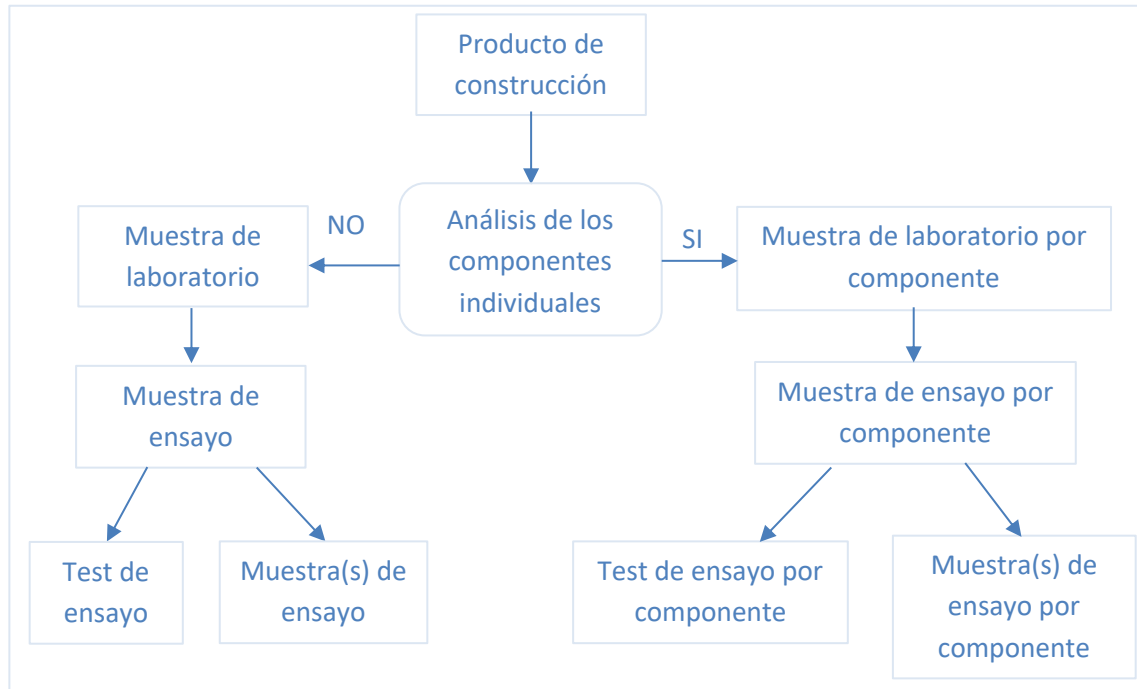


Figura 19. Diagrama del sistema de muestras. Fuente: prEN 17216:2023.

En el apartado 6.2 que trata sobre el muestreo y submuestreo, ambas normas enfatizan que la muestra de laboratorio debe representar fielmente el material desde su recepción hasta su preparación. Destacan la importancia de seguir directrices como las de CEN/TR 16220, especialmente para productos de construcción con múltiples componentes. Coinciden en que cualquier cambio en la composición o pérdida de peso debe reflejarse con precisión en la actividad másica del producto final. Para productos a base de cemento, recomiendan seguir procedimientos específicos como los de EN 12350-1 y EN 12390-2 para asegurar que las muestras estén adecuadamente preparadas antes de los ensayos radiológicos.

El apartado 6.3.1 especifica los equipos necesarios para preparar las muestras de ensayo, incluyendo un aparato de trituración que reduzca las partículas a menos de 2 mm (en la norma provisional era hasta 5 mm), tamices para filtrar partículas mayores de 2 mm, y balanzas con una incertidumbre de medición no superior al 0,1% para asegurar precisión en la masa. También se recomienda el uso de dispositivos de compactación mecánica, como mesas vibratorias, para garantizar la correcta compactación del material en los contenedores de muestras. Además, se subraya la necesidad de una tapa que cierre el contenedor de la muestra sin dejar burbujas de aire, y se especifican los sellantes a emplear, como pasta acrílica, adhesivo epoxi de dos componentes, cinta de aislamiento o un disco de parafina con parafina líquida.

Ambas normas enfatizan la importancia de que los contenedores sean impermeables al radón. Los materiales poliméricos recomendados son el polietileno de alta densidad (HDPE) y el tereftalato de polietileno (PET). Es importante tener en cuenta que los vasos de Marinelli, aunque están hechos de polipropileno (PP), no siempre garantizan impermeabilidad al radón. Además, se recomienda que los contenedores sean compatibles con la geometría del detector para maximizar la eficiencia de detección.

El apartado 6.3.2 detalla los pasos para preparar adecuadamente las muestras. Si las muestras son homogéneas en composición química y concentración de actividad, y su geometría se ajusta al contenedor, no se requiere preparación adicional. En otros casos, las muestras deben triturarse a partículas de menos de 2 mm, preferiblemente en seco, y luego tamizarse y homogeneizarse. Este enfoque, respaldado por ambas normas, resalta la importancia de la homogeneidad de la muestra, especialmente si la distribución de la actividad no es uniforme. También se destaca la necesidad de preparar varias muestras si es necesario, y de sellar herméticamente los contenedores para evitar fugas de radón, permitiendo un período de reposo para que el Rn-222 se equilibre con su radionúclido padre, el Ra-226. De igual modo, en ambas normas se recomienda que se determine la fuga de gas radón en los contenedores de acuerdo con el Anexo A.

6.2.3 Procedimiento

El apartado 7.1 de la norma UNE-CEN/TS 17216:2018 indica que la radiación gamma de las muestras debe medirse con un detector de rayos gamma, siguiendo directrices específicas. Se recomienda validar la calidad de las mediciones mediante intercomparaciones entre laboratorios o participación en pruebas de aptitud reconocidas. Este enfoque coincide con la nueva norma, que también subraya la importancia de validar los resultados para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos.

El apartado 7.2.1 de ambas normas describe los equipos, software y estándares de calibración necesarios para las mediciones. Esto incluye el uso de fuentes de calibración de eficiencia estandarizadas, fuentes de calibración energética que cubran un amplio rango de energías gamma, un horno de secado capaz de mantener una temperatura constante dentro de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, y un desecador para garantizar la estabilidad de las muestras. Además, se especifica la necesidad de un espectrómetro de rayos gamma de semiconductores, preferiblemente un detector de germanio de alta pureza, con una resolución energética (FWHM) mejor de 2,2 keV y un sistema de adquisición de datos con al menos 4.096 canales (existen hoy en día equipos con hasta 16.000 o más canales). Estas características son cruciales para asegurar la precisión y resolución en la detección de picos gamma.

Ambas normas también destacan la importancia del blindaje del detector, que debe estar protegido por todos lados, incluido el fondo, para mantener el nivel de fondo bajo y constante. Esto es esencial para evitar que el ruido de fondo, que puede variar por la presencia de radón o sus productos de desintegración, afecte los resultados. Se detalla la opción de ventilar el detector con gas nitrógeno y la sala para mantener la estabilidad del fondo, una práctica recomendada para medir bajos niveles de radioactividad.

En cuanto al software, se enfatiza la importancia de usar uno específico para el análisis de espectros de rayos gamma, validando su precisión, especialmente en la determinación del continuo bajo un foto-pico y en el análisis de picos con pocos pulsos. El software debe evaluarse tanto en espectros de prueba como de calibración para asegurar la coherencia en los resultados.

El apartado 7.2.2 de ambas normas aborda la calibración de energía y eficiencia del detector de rayos gamma, crucial para garantizar la precisión en la medición de la radiación. La calibración energética implica ajustar el amplificador para que el primer canal corresponda a un nivel de energía entre 0 y 50 keV, y asegurarse de que la energía por canal sea inferior a 0,5 keV, estableciendo una relación precisa entre el número de canal y la energía, con una desviación máxima de 1 keV.

Por otro lado, la calibración de eficiencia requiere determinar la eficiencia específica del detector para ciertos radionúclidos, con una incertidumbre inferior al 10%, siguiendo métodos como la medición directa o la simulación mediante Monte Carlo, asegurando que cualquier discrepancia sea investigada y corregida.

En este apartado también se detallan las energías de rayos gamma para determinar la actividad del Ra-226, Th-228, Ra-228 y K-40. A continuación, en la *Tabla 11*, se mostrará el caso para el Ra-226.

Tabla 11. Energías de rayos gamma para determinar la actividad del Ra-226. Fuente: prEN 17216:2023

Radionucleido determinado	Radionucleido medido	Energía Ev (keV)	Probabilidad de emisión I _E (%)
Ra-226	Plomo-214	352	37.6

El apartado 7.2.3 de ambas normas establece las directrices para la medición de las muestras de ensayo, resaltando la importancia de realizar las mediciones individualmente para cada muestra preparada y asegurando que cada muestra se coloque en una posición reproducible y calibrada en el detector. Se destaca que nunca se debe medir una muestra si la tasa de conteo o el tiempo muerto es superior al nivel en el que se determinó la eficiencia de detección, y es importante realizar correcciones del tiempo muerto de manera adecuada y validada.

También se debe registrar el espectro de fondo a intervalos definidos para su posterior sustracción del espectro de la muestra. Ambas normas subrayan la relevancia de controlar el contenido de materia seca.

6.2.4 Cálculos

En este apartado, la única diferencia es que todas las ecuaciones están reordenadas y explicadas con mayor claridad en la norma prEN 17216:2023. En esta, se define un factor ω que tiene en cuenta todas las variables de la ecuación del cálculo de actividad, excepto las del contaje de la medida, lo que facilita y simplifica el desarrollo del resto de ecuaciones existentes.

Las ecuaciones que se utilizarán en el presente informe se detallarán en el apartado 7, donde se analizan los resultados de la parte experimental.

6.2.5 Informe del ensayo

El apartado 9 de la norma UNE-CEN/TS 17216:2018 aborda que el informe de ensayo del laboratorio presente los resultados de manera precisa y clara, incluyendo información relevante como la identificación de la muestra, los resultados de la medición de radionúclidos como Ra-226, Th-232 y K-40, y los umbrales de decisión y límites de detección. Además, se debe detallar cómo se manejaron las muestras, incluyendo fechas, masa y cualquier desviación del método.

Comparado con el apartado 10 de la norma prEN 17216:2023, ambos enfoques destacan la importancia de un informe exhaustivo que documente tanto los resultados como los procedimientos y posibles desviaciones, garantizando la transparencia y confiabilidad de los datos. Ambas normas coinciden en que una documentación clara es esencial para la correcta interpretación y validación de los resultados en futuros estudios.

6.2.6 Informe de rendimiento

La norma prEN 17216:2023 incluye un apartado 9 no presente en la provisional 2018 y pendiente de completar, en la que los valores típicos de las desviaciones estándar para repetibilidad y reproducibilidad se presentarán en una tabla, basados en los datos del estudio colaborativo, excluyendo mediciones cercanas al límite de detección. Los resultados detallados se incluirán en el Anexo F.

6.2.7 Anexos

6.2.7.1 Anexo A - Método para la determinación del índice de fuga de radón de un contenedor de muestras de ensayo

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados experimentales del presente documento se desarrollarán en base a este anexo. Por lo tanto, este apartado se explicará con más detalle en el apartado 7.

Este anexo incluye en la norma prEN 17216:2023 un ejemplo de cálculo para aclarar la determinación de este índice de fuga.

6.2.7.2 Anexo B - Preparación de fuentes de calibración y determinación de la eficiencia de detección.

El Anexo B de las normas se enfoca en la preparación de las fuentes de calibración estandarizadas para la espectrometría de rayos gamma. Este anexo explica los pasos y métodos necesarios para que estas fuentes de calibración tengan propiedades bien definidas y controladas, lo cual es clave para obtener mediciones precisas y consistentes de radionúclidos como Ra-226, Th-232 y K-40.

También, describe los equipos y materiales necesarios, además del proceso de preparación, destacando la importancia de que estas fuentes sean representativas de las características físicas y químicas de las muestras de ensayo. Esto es fundamental para asegurar que las mediciones con el espectrómetro de rayos gamma sean precisas y comparables, sin importar el laboratorio o las condiciones en las que se realicen.

En la prEN 17216:2023 se añade el cálculo de la eficiencia, el cual en la UNE-CEN/TS 17216:2018 se encuentra en el apartado del procedimiento.

6.2.7.3 Anexo C - Método para la determinación de la actividad másica en un producto que contiene múltiples constituyentes

El Anexo C detalla cómo calcular la concentración de actividad radiactiva en productos de construcción compuestos, combinando las concentraciones de los radionúclidos de cada componente según su proporción en el producto final.

6.2.7.4 Anexo D - Fotopicos complementarios para verificar la concentración de actividad en la muestra de ensayo

El Anexo D detalla una lista de fotopicos adicionales que se pueden utilizar para confirmar la concentración de actividad en las muestras. Estos picos complementarios, si están bien calibrados, permiten una verificación más precisa de los resultados, asegurando la fiabilidad y coherencia de las mediciones, especialmente para radionúclidos como el Ra-226, Th-228 y Ra-228. Que en este caso para el radio es como la *Tabla 10*.

6.2.7.5 Anexo E - Método para la determinación del número correcto de impulsos en un fotopico (sólo para picos únicos)

El Anexo E detalla cómo calcular el número corregido de pulsos en un fotopico aislado, ajustando la medición al restar la contribución del fondo continuo, para asegurar la precisión en la medición de la actividad del radionúclido, eliminando el ruido o interferencias que podrían distorsionar los resultados.

6.2.7.6 Anexo F – Datos del rendimiento

Como se ha mencionado anteriormente, en este anexo F se incluirán los resultados del estudio colaborativo del informe de rendimiento. En él se presentarán dos tablas que detallarán los valores típicos de las desviaciones estándar, tanto para la repetibilidad como para la reproducibilidad. Así como, los parámetros estadísticos de la media y sus percentiles.

6.3 RESULTADOS ESTUDIO COLABORATIVO

Ya como se ha comentado en la introducción en 2023, se llevó a cabo un estudio colaborativo, 'Results of the collaborative assessment experiment for the validation of the precision of CEN/TS 17216' (Paepen, J., Van Ammel, R., Hult, M., Marissens, G., Stroh, H., Emteborg, H., Seghers, J., 2024), con el objetivo de evaluar la precisión tanto en repetibilidad (resultados interlaboratorio) como reproducibilidad (resultados entre laboratorios) de la norma provisional UNE-CEN/TS 17216:2018 y su revisión, prEN 17216:2023.

En el estudio de validación participaron 14 laboratorios europeos, incluido el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UPV, a los cuales se les proporcionaron 6 muestras de 5 diferentes materiales de productos de construcción, como: cemento, arcilla expandida (bloque y polvo), yeso, áridos y hormigón molido. Estos materiales fueron preparados para garantizar su homogeneidad, un aspecto crucial para obtener resultados comparables entre los laboratorios.

En el estudio se especificaba que los laboratorios participantes deberían intentar cumplir con la norma de la forma más completa posible. Cada laboratorio recibió 12 muestras, 2 por material para evaluar la repetibilidad. De acuerdo con el estudio estadístico realizado se establecieron los siguientes requisitos de repetibilidad y reproducibilidad.

Tabla 12. Resultados de la precisión del estudio colaborativo para el Ra-226, Th-232 y K-40.

Fuente: (Paepen, J., Van Ammel, R., Hult, M., Marissens, G., Stroh, H., Emteborg, H., Seghers, J., 2024).

Radionucleido	Rango de validez (Bq/Kg)	Repetibilidad (%)	Reproducibilidad (%)
Ra-226	20 - 120	4.2	12.6
Th-232	20 – 65	5.1	7.7
K-40	50 – 1450	5.1	8.3

Como puede observarse, en repetibilidad el Ra es similar al Th y al K, sin embargo, la reproducibilidad para el Ra-226 es mayor, consecuencia por la alta variabilidad entre los laboratorios, lo que podría indicar problemas con el sellado y tipo de contenedor de las muestras, es decir, con la potencial fuga de radón.

Este estudio también incluyó una encuesta para valorar la significación estadística de los distintos aspectos de la norma: pretratamiento, tipo contenedor, sellado, método de cálculo y cuantificación de incertidumbres.

En relación con el estudio de los contenedores se valoraron distintos aspectos, como el llenado, el tipo de contenedor y su sellado.

En cuanto al llenado del contenedor, 7 de los 14 laboratorios participantes reportaron que no llenaron completamente los contenedores. Y basándose en los datos disponibles, no se puede demostrar la diferencia entre llenar y no completamente el contenedor de la muestra de ensayo.

Por lo que respecta al tipo de contenedor 10 de los 14 laboratorios participantes indicaron que habían utilizado contenedores estancos al radón.

Por otra parte, y en relación con el sellado de los contenedores, de los 14 laboratorios participantes, solo 4 no sellaron sus contenedores. Las técnicas de sellado utilizadas incluyeron el sellado y almacenamiento en una bolsa de vacío (3 veces), cinta adhesiva (2 veces), cinta parafilm (1 vez), parafina (1 vez) y silicona (1 vez).

Aunque desde un punto de vista teórico se identifica la falta de hermeticidad como una fuente de variabilidad, el estudio estadístico de los resultados obtenidos no pudo demostrar estas variables fueran significativas. Una posible explicación es que los materiales de construcción no contuvieran una cantidad significativa de Ra-226 o no emanaran radón.

Por otra parte, y también en relación con este trabajo, en la norma se hace hincapié en la inclusión de la incertidumbre asociada la fuga del radón en el cálculo de la incertidumbre total. Del estudio se observa que solo 1 consideró la incertidumbre debida a la fuga de radón del contenedor de la muestra de ensayo, a pesar ser este es un requisito normativo establecido en el Anexo A de ambas normas.

Además, los resultados del estudio muestran que en muchos casos no se incluyeron las incertidumbres estándar relativas, ya que muchos laboratorios no proporcionaron esta información, y los valores dependen en gran medida de factores como el radionúclido, la geometría y el tiempo de conteo. No se observó una diferencia significativa entre los participantes que afirmaron haber calculado la incertidumbre según lo establecido por la norma y aquellos que no lo hicieron.

Sin embargo, a pesar de la no significación estadística del efecto de estudiar la fuga de radón en los contenedores, y de incluir o no su incertidumbre en la total, el estudio recomienda que ambas se sigan manteniendo en la versión final de la norma.

6.4 CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha realizado una comparación entre las normas UNE-CEN/TS 17216:2018 y prEN 17216:2023, destacando las mejoras en los procedimientos de ensayo, cálculos y la inclusión de anexos que refuerzan la metodología, especialmente en la determinación del índice de fuga de radón en los contenedores de muestras. Además, se presentan los resultados de un estudio colaborativo para la validación la nueva norma, haciendo hincapié en los resultados del llenado, sellado, pruebas de fuga e incertidumbres, relacionado con el presente trabajo.

En el siguiente apartado, se analizarán los resultados experimentales realizados para cuantificar estas incertidumbres, y también su efecto en la incertidumbre total.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

El anexo A describe como se tiene que determinar la fuga de radón y su incertidumbre asociada del contenedor usado para la medida por espectrometría gamma. El anexo da como opciones de fuentes radón, inyectar radón con una jeringa de gas a una matriz sólida, o bien utilizar una muestra sólida con radón. Sin embargo, en el laboratorio no se disponía de ninguna fuente de radón, por lo que se utilizó una muestra de agua que contenía radón suministrada por el Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) de la UPV.

Para realizar el estudio, es necesario probar al menos cinco recipientes similares. Si la fuga de Rn-222 es estable, con una desviación de la media no superior al 50%, el número de recipientes puede reducirse a tres en pruebas posteriores. Esta prueba debe realizarse al menos una vez al año o cada vez que se utilice un nuevo lote de recipientes, sellante o método de sellado.

En este apartado se mostrará primero la validación de la hoja de cálculo empleada a raíz del ejemplo añadido en la norma prEN 17216:2023, y seguidamente, se detallarán los resultados de las medidas realizadas en el laboratorio, así como sus incertidumbres asociadas.

7.2 HOJA DE CÁLCULO VALIDADA

Como ya se ha comentado anteriormente, algo nuevo en la nueva norma, la prEN 17216:2023, es la adición de un ejemplo de cálculo. Es a partir de este ejemplo con el que se va a validar un fichero Excel de cálculo, denominado "Obtención de incertidumbres de fuga de radón", para poder seguir un criterio de que los resultados a obtener se consideren correctos.

En la norma prEN 17216:2023 se proporciona la siguiente tabla y el siguiente gráfico con los resultados.

Tabla 13. Ejemplo de la tasa de recuento medida a partir del fotopico de 352 keV del Plomo-214, y los parámetros calculados para determinar la incertidumbre relativa debida a la fuga de radón.

Fuente: prEN 17216:2023.

Start time	Live time (s)	$R_{cor,j,v}$ (s^{-1})	$\ln(R_{cor,j,v})$ ($\ln(s^{-1})$)	
01/01 10:21 } 2'S	18 000	7,857	2,061	
01/01 15:22 } 5+2'S	18 000	7,507	2,016	
01/01 20:23 } 10+2'S	18 000	7,205	1,975	
02/01 01:24 } 15+2'S	18 000	6,804	1,917	
02/01 06:24 } 20+2'S	18 000	6,524	1,876	
02/01 11:25 } 25+2'S	18 000	6,227	1,829	
02/01 16:26 } 30+2'S	18 000	5,965	1,786	
02/01 21:26 } 35+2'S	18 000	5,673	1,736	
03/01 02:27 } 40+2'S	18 000	5,389	1,684	
03/01 07:27 } 45+2'S	18 000	5,169	1,643	
$p_{1,j}$ (s^{-1})	$u_{p1,j}$ (s^{-1})	λ_{Rn} (s^{-1})	$\lambda_{1,j}$ (s^{-1})	v_i (s^{-1})
2,59E-06	2,05E-08	2,10E-06	4,97E-07	5,89E-02
<i>p_{1,j}</i> and <i>u_{p1,j}</i> are obtained from the values for $\ln(R_{cor,j,v})$ using the least square method. $\lambda_{1,j}$ and v_i are obtained with respectively formula (A.1) and (A.4), and testing of a single test specimen container <i>j</i> .				

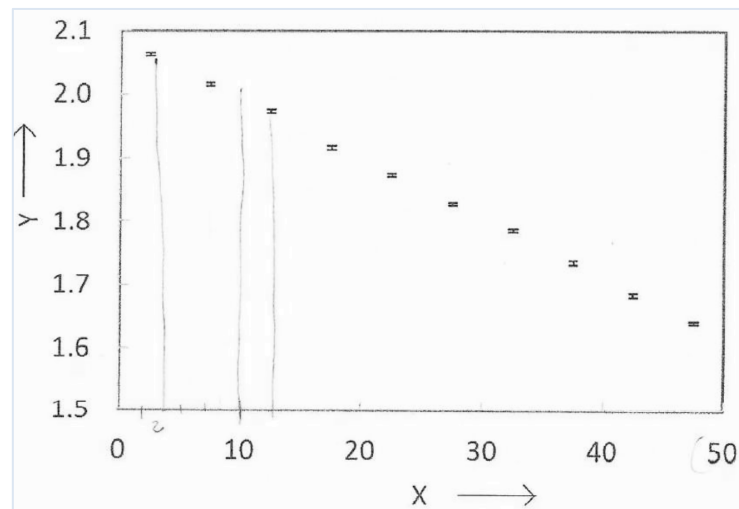


Figura 20. Ejemplo de relación medida entre la tasa de recuento corregida para el fopico elegido y la hora a la que se registró el espectro. Fuente: prEN 17216:2023.

Tomando los resultados de la *Tabla 13*, se va a pasar a calcular las diferentes variables según la norma para corroborar que dan los mismos resultados que el ejemplo, y así proseguir con los resultados propios.

Primero, para poder representar gráficamente las tasas de recuento derivadas de los espectros registrados frente al tiempo, se ha de determinar dicho tiempo, que corresponde a la mitad del intervalo de tiempo en el que se registró el espectro.

Tabla 14. Validación de los cálculos del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.

Rcor (s ⁻¹)	ln Rcor (s ⁻¹)	t (h)
7,857	2,061	2,5
7,507	2,016	7,5
7,205	1,975	12,5
6,804	1,918	17,5
6,524	1,875	22,5
6,227	1,829	27,5
5,965	1,786	32,5
5,673	1,736	37,5
5,389	1,684	42,5
5,169	1,643	47,5

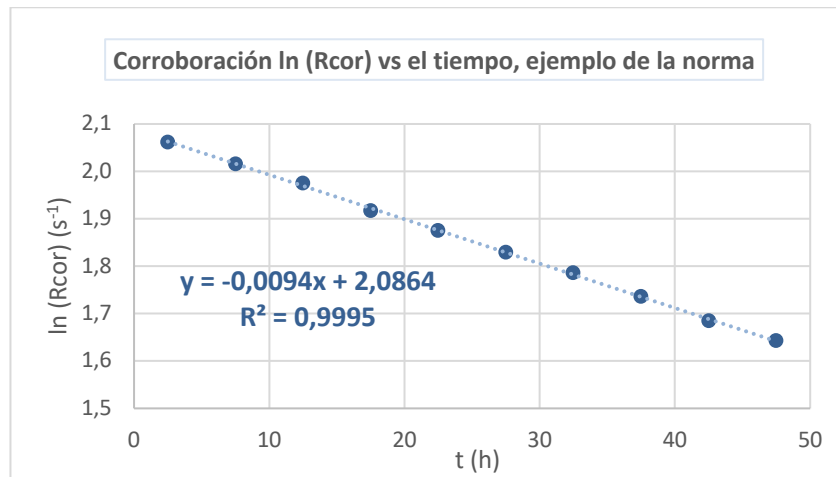


Figura 21. Corroboración del gráfico del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.

Una vez representada la gráfica, y mediante un ajuste de mínimos cuadrados, se toman los valores de la pendiente (p_1), e incertidumbre ($u-p_1$). El valor de la pendiente es la constante de desintegración experimental obtenida.

Tabla 15. Valores de la pendiente y su incertidumbre del ejemplo de la norma. Fuente: Elaboración propia.

	(h ⁻¹)	(s ⁻¹)
p1 (pte)	9,364E-03	2,601E-06
u-p1	7,383E-05	2,051E-08

Seguidamente, se calcula la tasa de fuga del radón del recipiente probado, λ_L :

$$\lambda_L = p_1 - \lambda_{Rn} \quad (15)$$

Donde, p_1 es la pendiente anteriormente calculada, y λ_{Rn} es la constante de desintegración del Rn-22, siendo $2.1E-06 \text{ s}^{-1}$. Una vez calculada dicha tasa, se puede calcular ya la incertidumbre relativa debido a la fuga de Rn-222 del contenedor de la muestra de ensayo, v_L , como se muestra a continuación.

$$v_L(\text{s}^{-1}) = \frac{\left(1 - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} + \lambda_L + 2 \cdot \overline{u_{p1}}}\right) \cdot 0.5}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

La $\overline{\lambda_L}$ y la $\overline{u_{p1}}$ son las medias asociadas a cada variable. A partir de la ecuación (9) explicada en el apartado 3.4 se calcula el periodo de semidesintegración del radón obtenido experimentalmente, sabiendo que el teórico es de 3.8232 días.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los resultados del ejemplo y los obtenidos al aplicar los cálculos del Anexo A.

Tabla 16. Comparativa de los resultados del ejemplo de la norma y los obtenidos calculándolos.

Fuente: Elaboración propia.

	$\rho_1 (\lambda_{Rn}$ experimental) (s ⁻¹)	$T_{1/2}$ experimental (días)	u_{p1} (s ⁻¹)	λ_L (s ⁻¹)	v_L (s ⁻¹)
Ejemplo norma	2,59E-06	3,2090	2,05E-08	4,97E-07	5,89E-02
Obtenidos hoja calculo	2,601E-06	3,0842	2,051E-08	5,012E-07	5,915E-02

Observando los resultados, la hoja Excel esta validada, y será la utilizada en las medidas experimentales que me muestran a continuación.

7.3 MEDIDAS EXPERIMENTALES

7.3.1 Procedimiento

Tal y como ya se ha mencionado, se ha utilizado agua con radón para realizar todas las medidas experimentales. En el caso de materiales de materiales construcción algunas consideraciones aquí realizadas no serían de aplicación.

Primero, antes de preparar las muestras de radón en agua, se estudió con agua del grifo el volumen que cabían en los diferentes contenedores que se iban a emplear en el estudio. Una vez conocido dicho volumen, se procedió a preparar las muestras para su posterior medición con el detector de espectrometría gamma. Las muestras se midieron a lo largo de 4-5 días en intervalos de 1 hora.

Una vez medidos los espectros, se recogieron los datos de las cuentas por segundo del fotopico de 352 keV del Pb-214 y se anotaron en la hoja de cálculo para realizar todos los cálculos que posteriormente se van a detallar. Seguidamente, se muestran imágenes del procedimiento seguido en el laboratorio.

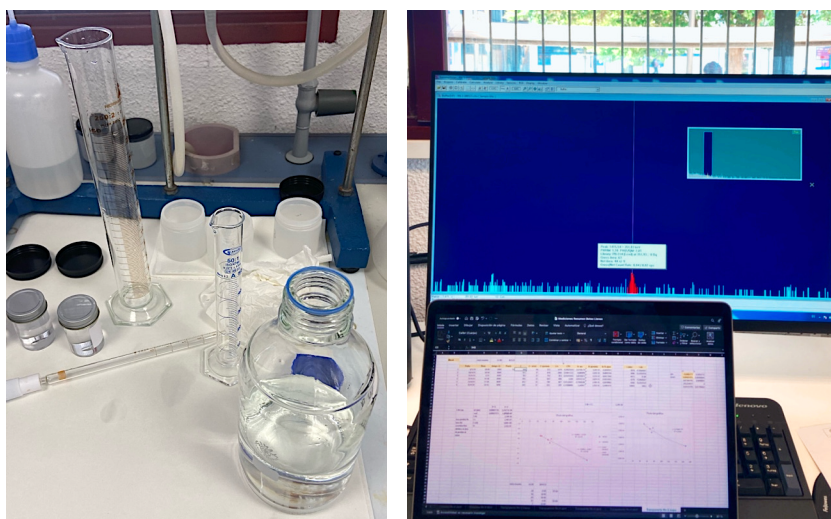



Figura 22. Fotografías realizadas en el laboratorio para las mediciones de las muestras. Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 Contenedores

Para realizar las medidas, se emplearon 4 contenedores de distintos materiales, los cuales se detallan a continuación, explicando sus propiedades (SPG, 2022).

Tabla 17. Tipos de contenedores empleados en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Nombre contenedor	Volumen (mL)	Descripción
<p>Transparente</p> 	58	<p>Recipientes estériles fabricados con poliestireno virgen. Opción de tapa con sello de flujo de metal. Ideal para la contención de muestras: Clínicas, Farmacéuticas e Investigación.</p> <p>Marcado CE. Solo para uso in vitro. Probado contra fugas. Fabricado asépticamente bajo condiciones de sala limpia para excluir la contaminación microbiológica (Sparks Lab Supplies, 2024).</p>
<p>Duquesa</p> 	104	<p>El recipiente está compuesto por polietileno de alta densidad, HDPE, que es resistente a productos químicos, poco flexible, pero fácil de fabricar y de manejar.</p> <p>La tapa es de poliestireno, PS, que es un material muy sostenible y reciclable, pero a más de 80 °C libera estirenos, clasificados como un posible carcinógeno humano. Este contenedor posee una tapa intermedia del mismo material que el recipiente.</p>
<p>Cantabria</p> 	47	<p>El recipiente es de polietileno tereftalato, PET, que es ligero y de producción de bajo coste con grandes posibilidades de reciclaje.</p> <p>La tapa es de polipropileno, PP, que destaca por su dureza, barrera al vapor y resistencia al calor. Este contenedor posee una tapa intermedia de polietileno de alta densidad, HDPE, que es resistente a productos químicos, poco flexible, pero fácil de fabricar y de manejar.</p>
<p>Petri</p> 	100	<p>Este contenedor está fabricado con poliestireno (PS) de alta transparencia y cuenta con una superficie plana grande. La tapa, hecha del mismo material.</p>

Estos contenedores son de los tipos recomendados por la norma para realizar las medidas, excepto el poliestireno. Además, todos los contenedores se sellaron con Parafilm, sellado habitual en el laboratorio.

7.3.3 Cálculos

En la validación de los cálculos del ejemplo, se comienza directamente con la tasa de cuentas ya corregidas. Entonces, antes de presentar los resultados obtenidos, se van a explicar los cálculos realizados desde la obtención de la tasa de cuentas medidas por el detector hasta la corrección de estas mismas. Como ejemplo, se va a tomar una de las mediciones del caso del Transparente. Inicialmente, se parte de los siguientes datos.

Tabla 18. Datos extraídos del programa GammaVision para realizar los cálculos. Fuente: Elaboración propia.

Nº medición	Fecha	Hora	Tiempo medida, t_L (s)	Cuentas
1	20/4/23	15:48	3600	981
2	20/4/23	18:54	3600	957
3	21/4/23	10:22	3600	819
4	21/4/23	16:46	3600	849
5	24/4/23	12:38	3600	396
6	25/4/23	12:34	3600	376

El primer paso es restar el fondo ambiental que puede existir dentro del laboratorio y en el propio equipo. Para ello, se accede al espectro del fondo medido en marzo de 2023, de donde se obtiene un valor medio de 33 cuentas para el Pb-214.

Una vez restado el fondo, las cuentas se ajustan, y a continuación se calculan las cuentas por segundo (R) dividiendo el número de cuentas por el tiempo medido. Luego, se representan en un gráfico el tiempo en horas de las mediciones y el logaritmo neperiano de R, lo que permite obtener la pendiente (p1) de la recta esperada. Con esta pendiente, se calcula la tasa de pérdida de radón, λ_L , como se indica en la ecuación (15).

Con este valor de la pendiente (p1), se calcula la R corregida a partir de la siguiente ecuación.

$$R_{\text{cor}}(t) = R_{\text{cor}}(0) \cdot e^{-(\lambda_{\text{Rn}} + \lambda_L) \cdot t_L} \quad (17)$$

Finalmente, se representan las cuentas corregidas en función del tiempo en horas en un gráfico, como en el ejemplo de la norma en la Figura 21. A partir de la R corregida, se continúa con el procedimiento detallado en el apartado 7.2.

Tabla 19. Cálculos para obtener la R corregida. Fuente: Elaboración propia.

Cuentas ajustadas	R (s ⁻¹)	ln R (s ⁻¹)	R _{cor} (s ⁻¹)	ln R _{cor} (s ⁻¹)	t (h)
948	0,273	-1,300	0,270	-1,309	50,300
924	0,266	-1,325	0,263	-1,334	53,400
786	0,228	-1,481	0,225	-1,489	68,867
816	0,236	-1,445	0,234	-1,453	75,267

363	0,110	-2,207	0,109	-2,216	143,133
343	0,104	-2,259	0,104	-2,268	167,067

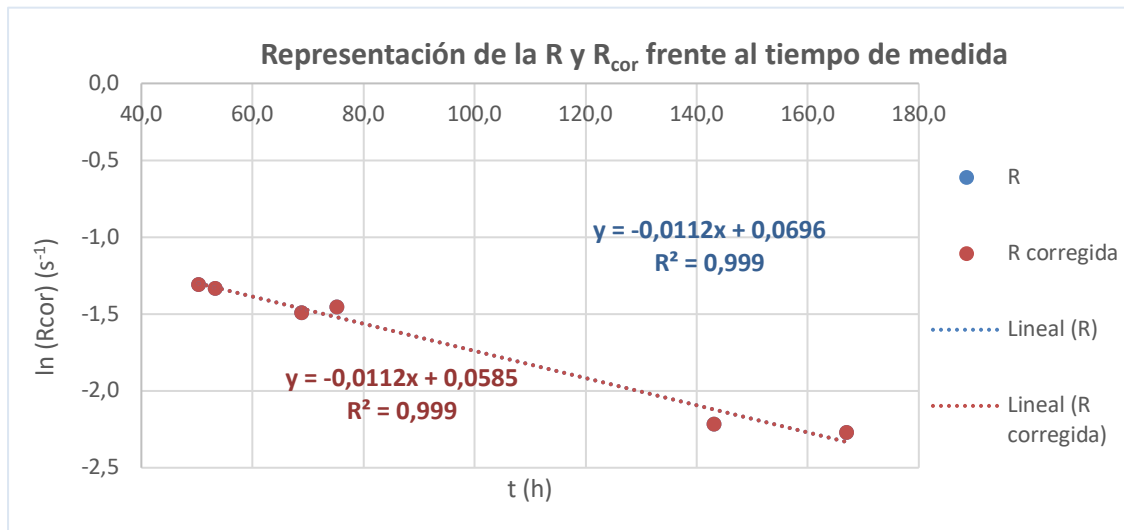


Figura 23. Representación de la R y Rcor frente al tiempo de medida. Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo, se adjunta una captura del espectro para este caso, el cual es muy similar en todas las muestras medidas en este trabajo.

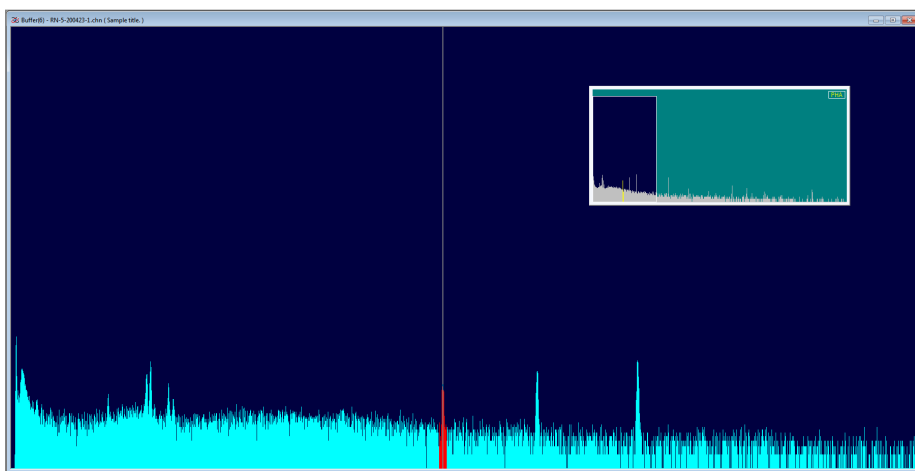


Figura 24. Espectro de la muestra 'Rn-5 abril 23' del contenedor Transparente. Fuente: Laboratorio Radiactividad Ambiental.

Por último, adicionalmente a los cálculos de la norma, se ha calculado la tasa de fuga de radón en porcentaje para poder manejar mejor a simple vista los resultados, y se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda_L(\%) = \frac{p_1(\lambda_{Rn \text{ experimental}}) - \lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn}} \cdot 100 \quad (18)$$

7.3.4 Resultados

Seguidamente, se va a detallar un resumen de los resultados de las medidas obtenidos para los distintos 4 contenedores. Es importante señalar que todas las muestras se realizaron con el contenedor lleno, excepto todas las muestras de la Petri debido a la naturaleza del contenedor, y una muestra inicial del Transparente que se realizó a medio llenar, y dado que los resultados fueron similares, se decidió no continuar con pruebas a medio llenar.

7.3.4.1 Transparente

De este tipo de contenedor, se realizaron muestras de 5 contenedores diferentes, y solo 1 a medio llenar.

Tabla 20. Resultados obtenidos para el contenedor Transparente. Fuente: Elaboración propia.

Transparente	Rn-2 marzo 23	Rn-4 abril 23	Rn-5 abril 23	Rn-6 abril 23	Rn-4 marzo 23 (medio lleno)
$p_1 (\lambda_{Rn} \text{ experimental})$ (s^{-1})	2,740E-06	2,555E-06	2,455E-06	2,244E-06	2,393E-06
$u_{p1} (s^{-1})$	1,066E-07	1,263E-07	1,705E-07	1,874E-07	2,133E-07
$T_{1/2} \text{ experimental}$ (días)	2,9276	3,1402	3,2679	3,5756	3,3519
$\lambda_L (s^{-1})$	6,404E-07	4,548E-07	3,550E-07	1,437E-07	2,935E-07
Tasa λ_L (%)	30,493	21,66	16,903	6,843	13,97
$v_L (s^{-1})$	7,064E-02	5,505E-02	4,570E-02	2,322E-02	3,956E-02

Se observa que, este contenedor tiene una gran hermeticidad, lo que se refleja en los valores del periodo de semidesintegración de radón, que se aproximan al teórico y presentan baja variabilidad. La tasa de fuga de radón varía del 6 al 30 %, y los valores de incertidumbre relativa a la fuga del radón varían entre sí del 2 al 7%.

Los resultados indican que el contenedor Transparente es eficaz para minimizar la fuga de radón, lo cual es crucial para obtener mediciones precisas de la actividad del Ra-226. Se ha llegado a la conclusión de que esto podría deberse al sello de flujo que tiene en la tapa, como se menciona en el apartado 7.3.2.

7.3.4.2 Duquesa

De este tipo de contenedor, se realizaron muestras de 3 contenedores diferentes. Además, se observó que, dependiendo del lote, el borde por donde se debe cerrar no siempre es un círculo uniforme. La resistencia de esta parte variaba según que contenedores, y al llenarlos de la misma forma, aquellos con menor resistencia presentaron fugas, dejando escapar algunas burbujas. Por esta razón, se intentó seleccionar los contenedores que, a simple vista, parecían más resistentes.

Tabla 21. Resultados obtenidos para el contenedor Duquesa. Fuente: Elaboración propia.

Duquesa	Rn-1 marzo 24	Rn-2 marzo 24	Rn-3 marzo 24
$p_1 (\lambda_{Rn} \text{ experimental})$ (s^{-1})	3,498E-06	3,596E-06	3,106E-06
$u_{p1} (s^{-1})$	6,834E-08	1,050E-07	5,771E-08
$T_{1/2} \text{ experimental}$ (días)	2,2934	2,2309	2,5826
$\lambda_L (s^{-1})$	1,398E-06	1,496E-06	1,006E-06
Tasa λ_L (%)	66,579	71,242	47,926
$v_L (s^{-1})$	1,173E-01	1,220E-01	9,601E-02

En este caso, el periodo de semidesintegración experimental no varía razonablemente entre las propias muestras, pero si se aleja del valor teórico de 3,832 días, lo que sugiere que ofrece una hermeticidad razonable, pero aún permite cierta fuga de radón. Además, la tasa de fuga de radón varía del 47 a 71%, y los valores de incertidumbres relativas asociadas a la fuga de radón presentan variaciones entre ellos del 9 al 12%.

Todo ello puede ser debido a la naturaleza del contenedor de poseer una tapa intermedia que no ayuda a la hermeticidad y provoca fugas, lo que refuerza la necesidad de una mejora en el sellado para garantizar mediciones más consistentes.

7.3.4.3 Cantabria

De este tipo de contenedor, se realizaron muestras de 4 contenedores diferentes, y presentan una situación similar a los Duquesa: tienen una tapa intermedia cuya resistencia al ponerla varía según el lote, lo que puede causar la fuga de burbujas del líquido. Por esta razón, se seleccionaron los contenedores que parecían más resistentes a simple vista.

Además, debido a que mostraron más fugas que los Duquesa, en la medición de 2023 se selló la tapa intermedia y luego la tapa definitiva con Parafilm. En las mediciones de 2024, se selló únicamente la tapa definitiva con un tipo de cinta aislante para probar la diferente hermeticidad, y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 22. Resultados obtenidos para el contenedor Cantabria. Fuente: Elaboración propia.

Cantabria	Rn-3 julio 23	Rn-4 marzo 24	Rn-5 marzo 24	Rn-6 marzo 24
$p_1 (\lambda_{Rn} \text{ experimental})$ (s^{-1})	3,834E-06	3,818E-06	3,530E-06	3,790E-06
$u_{p1} (s^{-1})$	1,777E-07	1,177E-07	1,124E-07	6,784E-08
$T_{1/2} \text{ experimental}$ (días)	2,0927	2,1011	2,2725	2,1169
$\lambda_L (s^{-1})$	1,734E-06	1,718E-06	1,430E-06	1,690E-06
Tasa λ_L (%)	82,556	81,817	68,107	80,467
$v_L (s^{-1})$	1,322E-01	1,315E-01	1,189E-01	1,304E-01

Los resultados indican que, aunque los valores obtenidos son consistentes entre las muestras, se alejan de los valores teóricos esperados para el periodo de semidesintegración del radón. Las tasas de fuga de radón varían del 68 al 82%, y en este caso, las incertidumbres asociadas a la tasa de la fuga del radón se asemejan bastante, oscilando del 11 al 13%.

7.3.4.4 *Petri*

De este tipo de contenedor, se realizaron muestras de 5 contenedores diferentes, y se estudió sabiendo ya de antemano que no garantiza una hermeticidad completa debido a su diseño. El cierre, ubicado en la mitad del contenedor, impide que se pueda llenar completamente, y aunque la tapa se cierra a presión, no es lo suficientemente robusta, lo que provoca fugas. Se obtuvieron los siguientes resultados, destacando que en las mediciones de abril y mayo no existe incertidumbre asociada a la pendiente obtenida debido a que solo se realizaron 2 mediciones, por lo que se obtiene una línea recta.

Tabla 23. Resultados obtenidos para el contenedor Petri. Fuente: Elaboración propia.

Petri	Rn-0 marzo 23	Rn-0 abril 23	Rn-2 mayo 23	Rn-4 junio 23	Rn-5 junio 23
$p_1 (\lambda_{Rn} \text{ experimental}) (s^{-1})$	8,71742E-06	1,42995E-05	6,87272E-06	2,92358E-06	5,69621E-06
$u_{p1}(s^{-1})$	6,95986E-07	-	-	4,88427E-07	3,7468E-07
$T_{1/2} \text{ experimental (días)}$	2,1553	0,5610	1,1673	2,7441	1,4084
$\lambda_L(s^{-1})$	6,62E-06	1,22E-05	4,77E-06	8,24E-07	3,60E-06
Tasa λ_L (%)	315,115	580,928	227,272	39,218	171,248
$v_L(s^{-1})$	2,19E-01	2,46E-01	2,01E-01	8,41E-02	1,83E-01

Como se esperaba y es fácil observar, los valores de la tasa de fuga de radón y las incertidumbres asociadas muestran una gran variabilidad, lo que evidencia la limitada eficacia de este contenedor para evitar la fuga de radón. Las únicas muestras que podrían asemejarse a los demás contenedores serían la de marzo y Rn-4 de junio, ya que presentan un periodo de semidesintegración parecido al obtenido por los contenedores Duquesa y Cantabria.

7.3.4.5 *Comparativa*

Una vez obtenidos todos los resultados, se procede a comparar la efectividad de cada contenedor, es decir, cuál se aproxima más al periodo de semidesintegración del radón, que es 3,8232 días. Para ello, se calculará el promedio del periodo de semidesintegración y la tasa de pérdida de radón en porcentaje, como se muestra seguidamente.

Tabla 24. Comparativa de resultados de los contenedores. Fuente: Elaboración propia.

	Transparente	Duquesa	Cantabria	Petri
Promedio $T_{1/2}$ experimental (días)	3,2278	2,3689	2,1458	1,6072
Desviación estándar, s	0,2710	0,1876	0,0851	0,854
Coficiente de variación (%)	8,397	7,919	3,965	53,164
Promedio Tasa λ_L (%)	18,974	61,916	78,237	266,7564
Desviación estándar, s	9,854	12,338	6,8083	202,174
Coficiente de variación (%)	51,936	19,927	8,7021	75,790

Como se puede observar y se mencionó anteriormente, el contenedor que presenta una mayor hermeticidad, es decir, que logra reducir al mínimo la emanación de radón, es el contenedor denominado Transparente.

El contenedor Transparente destaca por una gran hermeticidad, ya que presenta las tasas de fuga de radón más bajas entre los cuatro contenedores y un periodo de semidesintegración del radón muy cercano al teórico. Esto puede atribuirse a su mayor robustez en comparación con los otros contenedores, ya que está hecho de un material menos maleable y cuenta con una tapa metálica con sello de flujo, lo que garantiza un cierre más firme. Además, al no tener tapas intermedias, se reduce la posibilidad de fugas, como se observó durante el procedimiento experimental. Estas características se traducen en mediciones más precisas y consistentes, lo que convierte a este contenedor en la opción más confiable para estudios de radiactividad.

En comparación, el contenedor Duquesa muestra una hermeticidad moderada, con resultados algo menos precisos, pero aún aceptables para la mayoría de los análisis. El contenedor Cantabria también presenta una hermeticidad media, con variaciones en los resultados que reflejan una menor eficiencia en el sellado en comparación con el Transparente. Es importante destacar que, en el caso de los contenedores que poseen una tapa intermedia que debe ajustarse al recipiente, es necesario tener habilidad y práctica al llenarlos antes de realizar la muestra definitiva para medirla.

Finalmente, por otro lado, el contenedor Petri destaca por ser el menos efectivo, con una alta tasa de fuga de radón y una gran variabilidad en los resultados. Esta falta de hermeticidad lo convierte en una opción inadecuada para realizar estas mediciones.

7.4 INCERTIDUMBRES

La incertidumbre asociada al cálculo de la actividad total, $u_{i,total}$ (Bq/kg), se calculó como:

$$u_{i,total}^2 = u_{i,R}^2 + a_i^2 \cdot v_{i,total}^2 \quad (19)$$

Donde:

- $u_{i,R}$ es la incertidumbre de la actividad másica de la(s) muestra(s) de ensayo del radionucleido i , en Bq/kg
- a_i es la actividad másica del radionucleido i , en Bq/kg
- $v_{i,total}$ es la incertidumbre relativa total de la concentración de actividad del radionucleido i asociada a las fuentes adicionales de incertidumbre

En ambas normas se especifica que las principales fuentes de incertidumbre relativa a la hora de determinar la actividad de la concentración, y en la nueva norma prEN 17216:2023 se detallan por: la fuga de radón del contenedor de la muestra de ensayo; y la eficiencia de detección, incluidas las incertidumbres asociadas con los factores de corrección aplicados, como la densidad o la geometría. A su vez, la norma específica que se deben incluir fuentes adicionales de incertidumbre cuando se consideren significativas.

La incertidumbre relativa total de la concentración de actividad por radionucleido, $v_{i,total}$, se calcula de la siguiente manera.

$$v_{i,total}^2 = v_{i,L}^2 + v_{i,\varepsilon}^2 \quad (20)$$

Donde:

- $v_{i,L}$ es la incertidumbre relativa de las fugas de radón calculada anteriormente para cada contenedor
- $v_{i,\varepsilon}$ es la incertidumbre relativa correspondiente a la eficiencia del contaje

Como se mencionó en el apartado 6.3, cada laboratorio tiene su propio procedimiento de trabajo. En el caso del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UPV, se añaden otras incertidumbres relativas, como son las incertidumbres para la cantidad de muestra, la preparación de patrones y las características radiológicas del radionucleido. Por otra parte, en este caso la incertidumbre relacionada con la corrección de la densidad no se aplica, ya que las mediciones suelen realizarse con materiales de densidades similares a las que ya han sido calibradas.

Por lo que, para este caso, la incertidumbre relativa total de la concentración de actividad por radionucleido se calcula de la siguiente manera.

$$v_{i,total}^2 = v_{i,L}^2 + v_{i,\varepsilon}^2 + v_{i,cant. muestra}^2 + v_{i,prep. patrones}^2 + v_{i,carac. rad.}^2 \quad (21)$$

Donde:

- $v_{i,cantidad muestra}$ es la incertidumbre relativa correspondiente a la cantidad de muestra
- $v_{i,prep. patrones}$ es la incertidumbre relativa correspondiente a la preparación de los patrones

- $V_{i,carac. rad.}$ es la incertidumbre relativa correspondiente a las características radiológicas del radionucleido

Para analizar la importancia de calcular la incertidumbre relativa de las fugas de radón en los distintos contenedores, tal como se detalla y se ha calculado en este trabajo, se procederá a calcular la incertidumbre total para cada contenedor.

Cabe destacar que la incertidumbre de la eficiencia solo se dispone para el contenedor de Cantabria; sin embargo, a modo de ejemplo, se supondrá que es la misma para los distintos contenedores.

Tabla 25. Valores para las incertidumbres relativas fijos. Fuente: Elaboración propia.

$V_{i,\varepsilon}$	$V_{i,cant. muestra}$	$V_{i,prep. patrones}$	$V_{i,carac. rad.}$
0,0135	0,002	0,02	0,004

Tabla 26. Estudio incertidumbres de los distintos contenedores. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de contenedor	Promedio $v_{i,L}$	v_{total}^2	v_{total}	Importancia (%)
Cantabria	0,1282	0,0170	0,1306	98,218
Duquesa	0,1118	0,0131	0,1144	97,673
Transparente	0,0447	0,0026	0,0510	87,663
Petri	0,1868	0,0355	0,1884	99,148

Como se puede observar, los contenedores con mayor incertidumbre de fugas de radón son los que, a su vez, incrementan significativamente la incertidumbre total. En cambio, el contenedor Transparente, al tener menor incertidumbre debido a su mayor hermeticidad, influye menos en la incertidumbre total, resultando en un menor valor de esta.

También, de acuerdo con los valores de incertidumbre relativa de la inclusión de fugas del radón aumenta significativamente la incertidumbre relativa total, que esta a su vez se tiene que sumar a la del contaje final.

En la norma se establece que, aunque no se realice el estudio detallado de la incertidumbre, se debe añadir al menos un 5%. Al analizar los resultados, se observa que este sería el caso del contenedor Transparente, el cual contribuye aproximadamente con un 88% a la incertidumbre total de la concentración de actividad, representando así el escenario más favorable.

7.5 CONCLUSIÓN

En este capítulo, se ha realizado el análisis de los resultados obtenidos de las mediciones, basándose en el Anexo A de la norma, utilizando diferentes contenedores, evaluando su hermeticidad y su impacto en la precisión de las mediciones. Se destacan las variaciones en la eficacia de los contenedores y se enfatiza la importancia de seleccionar aquellos que minimicen las fugas de radón para reducir la incertidumbre en los resultados.

8 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha alcanzado el objetivo principal de contribuir al estudio de la cuantificación del Ra-226 en materiales de construcción utilizando la técnica de espectrometría gamma. En particular, en el aspecto relacionado con la difusión del radón a través de los contenedores de medida de las muestras de estos materiales, de acuerdo a las directrices establecidas por la norma UNE-CEN/TS 17216:2018 y prEN 17216:2023.

A partir de todo lo comentado en el trabajo, puede concluirse que:

- Se ha abordado el estudio de la radiación natural, centrándose particularmente en el comportamiento y la cuantificación del Ra-226. Debido a que este radionucleido emite una radiación gamma de baja intensidad, se ha comprobado que es necesario esperar a que alcance el equilibrio secular con sus descendientes, como el radón (Rn-222), para poder cuantificar adecuadamente el Ra-226, teniendo por consiguiente que asegurar dicho equilibrio se alcanza efectivamente.
- Se ha llevado a cabo la búsqueda de la concentración de actividad del Ra-226 en muestras ambientales, como agua, biota, suelos, rocas, y en diversos materiales de construcción.
- Se ha abordado la radiación gamma, explicando su naturaleza y las formas en que interactúa con la materia, con especial énfasis en mecanismos clave como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. También se ha descrito en detalle la espectrometría gamma, resaltando las características de esta técnica, el funcionamiento de los detectores semiconductores, así como los desafíos técnicos que presenta, como los efectos de suma y las interferencias.
- Se ha comparado la norma provisional UNE-CEN/TS 17216:2018 y la norma aún en proceso de validación, prEN 17216:2023. En general, se observó que la nueva norma es una ampliación de la anterior, con una explicación más detallada de la metodología y en la que se va a incluir el estudio de la precisión en repetibilidad y reproducibilidad de la norma, para finalmente reemplazar la versión de 2018.
- Se analizaron los resultados del estudio colaborativo entre 14 laboratorios europeos para validar la norma prEN 17216:2023, en el aspecto relacionado de la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones. Además, en relación con este trabajo, no se observó significación estadística tanto sobre el estudio de la fuga de radón como la inclusión de su incertidumbre en el cálculo de la incertidumbre total. A pesar de lo cual, el estudio recomienda mantener ambos aspectos en la versión final de la norma.
- El trabajo experimental y de los cálculos realizados se han basado en el Anexo A de la norma, validándolos con el ejemplo proporcionado en la prEN 17216:2023. Para ello, se seleccionaron 4 contenedores: Transparente, Cantabria, Duquesa y Petri. Se concluyó que ninguno de los contenedores cumple con las condiciones de hermeticidad al 100% para el radón, como lo establece la norma.

Sin embargo, se destacó que el contenedor Transparente, hecho de poliestireno con una tapa de metal y sello de flujo, ofrece una mayor hermeticidad en comparación con los demás. Por el contrario, el contenedor Petri no proporciona ningún tipo de hermeticidad, lo que resulta en una emanación casi total del radón. Los otros dos contenedores, hechos mayormente de polietileno, mostraron una hermeticidad intermedia, no ideal pero tampoco completamente ineficiente.

- En cuanto a las incertidumbres calculadas, se observó que, cuanto menor es la hermeticidad del contenedor frente al radón, mayor es la incertidumbre relacionada con las fugas, lo que afecta significativamente la incertidumbre total del proceso y disminuye la robustez y precisión de la medición. Además, cabe destacar que, aunque algunas fuentes de incertidumbre puedan parecer menores, su acumulación puede tener un impacto considerable en la incertidumbre total de la medición, como es en este caso la asociada a la fuga del radón del contenedor empleado.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es importante que los laboratorios estudien la implementación de la incertidumbre relacionada con la fuga de gas radón, ya que es una fuente significativa de variabilidad en las mediciones. Incorporar esta incertidumbre, como se ha visto en este trabajo, puede aumentar notablemente la incertidumbre final de la muestra, por lo que su inclusión debe ser detenidamente evaluada.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina. (1998). *ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA*. Obtenido de CURSO DE POST-GRADO EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y SEGURIDAD NUCLEAR:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/051/31051294.pdf
- B. Piedecausa. (2011). Hormigón Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *CEMENTO HORMIGÓN • Nº 946*, 34-50. Obtenido de Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón.:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27056/1/Radiactividad%20natural%20de%20os%20materiales%20de%20construcción_Parte%202.pdf
- B. Piedecausa. (Julio-Agosto de Julio-Agosto2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo. *CEMENTO HORMIGÓN • Nº 945*, 40-65. Obtenido de Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo.:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27055/1/Radiactividad%20natural%20de%20os%20materiales%20de%20construcción_Parte%201.pdf
- Bruenner, S. (2020). Obtenido de Radon daughter removal from PTFE surfaces and its application in liquid xenon detectors: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-021-09047-2>
- C. Besançon. (2020). The Role of Barite in the Post-Mining Stabilization of Radium-226: A Modeling Contribution for Sequential Extractions. *Barite*.
- cbrn.es*. (17 de Febrero de 2017). Obtenido de Estabilidad Nuclear:
<https://cbrn.es/?tag=estabilidad-nuclear>
- Comité técnico CTN 73. Energía nuclear, tecnologías nucleares y protección radiológica. (Febrero de 2018). *Asociación Española de Normalización*. Obtenido de Medición de la radiactividad en el medio ambiente. Suelo. Parte 3: Método de ensayo de radionucleidos emisores gamma usando espectrometría gamma.:
https://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/UNE/UNE-EN%20ISO%2018589-3_2015.pdf
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2024). *Las radiaciones*. Obtenido de Consejo de Seguridad Nuclear: <https://www.csn.es/ca/las-radiaciones>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2024). *Radiaciones ionizantes*. Obtenido de Consejo de Seguridad Nuclear: <https://www.csn.es/ca/radiaciones-ionizantes>
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. (29 de Junio de 1996). Obtenido de Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado: <https://www.boe.es/doue/1996/159/L00001-00114.pdf>

- F. Girault, F. Perrier. (Noviembre 2012). Measuring effective radium concentration with large numbers of samples. Part II – general properties and representativity. *Journal of Environmental Radioactivity*, 189-202.
- Fang, F. (2024). Obtenido de Radon Progeny Plate-Out and the Effects of Airflow and Electric Charge for Dark Matter Experiments: <https://scholar.smu.edu/jour/vol8/iss1/2/>
- Galindo, A. (3 de Mayo de 2024). Obtenido de Organismo Internacional de Energía Atómica: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion>
- Gilmore, G. R. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. Wiley.
- Jefatura del Estado. (4 de Mayo de 1964). Obtenido de Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1964/BOE-A-1964-7544-consolidado.pdf>
- L. Yu, D. Mallants and G. Olyslaegers. (Mayo de 2011). Obtenido de Assessment of radon release from concrete components in the Dessel low-level waste near surface disposal facility: https://www.researchgate.net/publication/303628777_Assessment_of_radon_release_from_concrete_components_in_the_Dessel_low-level_waste_near_surface_disposal_facility
- Lobo, A. M. (1988). *Centro e Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*. Obtenido de Determinación de Ra-226 por espectrometría gamma: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/021/20021966.pdf
- Lui, E. (23 de Marzo de 2021). *Stanford University*. Obtenido de The History of Radium: <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph241/lui2/>
- Martínez, A. (2021). Trabajo Fin de Máster. Estudio de mejora del procedimiento de evaluación de la actividad gamma en materias primas y productos de la industria cerámica.
- Ministerio de la Presidencia. (26 de Julio de 2001). Obtenido de Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2001/BOE-A-2001-14555-consolidado.pdf>
- Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (21 de Diciembre de 2022). *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado*. Obtenido de Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-21682-consolidado.pdf>
- Nuclear Energy Agency. (2020). Obtenido de JANIS 4.1: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_39910/janis
- OMS. (2 de Febrero de 2021). *El radón y sus efectos en la salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud, OMS: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

ORTEC. (2006). *GammaVision - 32 Gamma - Ray Analysis and MCA Emulator for Microsoft Windows 2000 Professional and XP Professional*. . U.S.A: Advanced Measurement Technology, Inc.

Paepen, J., Van Ammel, R., Hult, M., Marissens, G., Stroh, H., Emteborg, H., Seghers, J. (2024). *NORMCONSTRUCT: Results of the collaborative assessment experiment foe the validation of the precision of CEN/TS 17216*.

Sparks Lab Supplies. (2024). Obtenido de Sterile Containers: <https://www.sparks.ie/20-Sterile-Containers>

SPG. (22 de Julio de 2022). Obtenido de Conoce cuáles son y para qué sirven los códigos de identificación de los plásticos: <https://www.spg-pack.com/blog/codigos-identificacion-plasticos/>

UNSCEAR. (2000). Obtenido de ANNEX B: Exposures from natural radiation sources: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf

Vinson, D. S. (2011). *Division of Earth and Ocean Sciences Duke University* . Obtenido de Radium Isotope Geochemistry in Groundwater Systems: The Role of Environmental Factors: <https://dukespace.lib.duke.edu/server/api/core/bitstreams/f852ad59-de32-4d0a-93bc-9af23637ea8e/content>

DOCUMENTO II:

PRESUPUESTO

ÍNDICE PRESUPUESTO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	DESGLOSE DE COSTES.....	1
2.1	MANO DE OBRA.....	1
2.2	MATERIALES Y EQUIPOS	1
3	PRESUPUESTO TOTAL	2

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Presupuesto de Mano de Obra. Fuente: Elaboración propia.</i>	1
<i>Tabla 2. Presupuesto de equipos y herramientas. Fuente: Elaboración propia.</i>	1
<i>Tabla 3. Presupuesto del material. Fuente: Elaboración propia.</i>	2
<i>Tabla 4. Presupuesto de Ejecución Material (PEM). Fuente: Elaboración propia.</i>	2
<i>Tabla 5. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Fuente: Elaboración propia.....</i>	2

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es establecer el presupuesto necesario para la realización de este Trabajo Fin de Grado (TFG), el cual es importante para que futuras investigaciones que busquen contribuir a la cuantificación de Radio-226 mediante el uso de espectrometría gamma en materiales de construcción sepan la inversión que deben hacer.

Para realizar el presupuesto, se considerarán los costes de mano de obra, los materiales utilizados en las mediciones, la amortización de los equipos y los gastos adicionales.

2 DESGLOSE DE COSTES

2.1 MANO DE OBRA

En este apartado, se detallan los costes asociados a la mano de obra del personal involucrado en este proyecto. El personal se compone por una estudiante del Grado en Ingeniería Química, la tutora y la cotutora departamento de Ingeniería Química y Nuclear.

Tabla 1. Presupuesto de Mano de Obra. Fuente: Elaboración propia.

Mano de Obra					
Ref	Ud	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
O1	h	Alumna de Ingeniería Química	19,99	300	5997,00
O2	h	Tutora	51,40	25	1285,00
O3	h	Cotutora	51,40	25	1285,00
TOTAL					8567,00

2.2 MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación, se detallarán los costes del equipo de espectrometría gamma y el software utilizado en la preparación de calibrados y muestras, así como en su medición, han sido considerados en este estudio. Para ello, se ha estimado su amortización lineal a lo largo de su vida útil, específicamente para una duración de 5 meses durante los cuales se lleva a cabo el proyecto.

Tabla 2. Presupuesto de equipos y herramientas. Fuente: Elaboración propia.

Equipos y herramientas						
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Tiempo amortización (años)	Cantidad (€/mes)	Importe (€)
E1	1	Equipo espectrometría gamma (detector Ge alta Pureza)	100000	10	833,33	4166,65
E2	1	Software Gammavision®	12000	6	166,66	833
E3	1	Ordenador personal	1000	4	20,83	104,16
TOTAL						5103,81

CUANTIFICACIÓN DE RA-226 MEDIANTE EL USO DE ESPECTROMETRÍA GAMMA EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. APLICACIÓN NORMA UNE-CEN/TS 17216:2018.

A continuación, se especificarán los costes de los materiales utilizados en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental, tanto el patrón gamma y el nitrógeno líquido necesario para el equipo, como los contenedores empleados en este proyecto.

Tabla 3. Presupuesto del material. Fuente: Elaboración propia.

Materiales						
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Tiempo amortización (años)	Cantidad (€/mes)	Importe (€)
M1	1	Nitrógeno líquido (botella)	90,27	0,02	33,91	169,56
M2	1	Patrón gamma (se preparan 1 vez cada 5 años)	3000	5	50	250
Ref	Ud	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)	
M3	1	Contenedor Transparente	0,36	5	1,8	
M4	1	Contenedor Duquesa	0,42	3	1,26	
M5	1	Contenedor Cantabria	0,45	4	1,8	
M6	1	Contenedor Petri	0,31	5	1,55	
TOTAL						425,97

3 PRESUPUESTO TOTAL

A continuación, se detallará el presupuesto de ejecución material (PEM) para este proyecto.

Tabla 4. Presupuesto de Ejecución Material (PEM). Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto Ejecución Material (PEM)	
Capítulo	Importe (€)
Mano de Obra	8567,00
Equipos y herramientas	5103,81
Materiales	425,97
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	14096,78

Finalmente, el presupuesto total para la realización del Trabajo Fin de Grado es de **DIECINUEVE MIL SETECIENTOS TREINTA Y CINCO EUROS CON CUARENTA Y NUEVE CÉNTIMOS**.

Tabla 5. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto Ejecución por Contrata (PEC)	
Capítulo	Importe (€)
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	14096,78
Gastos Generales 13%	1832,58
Beneficio Industrial 6%	845,81
IVA 21%	2960,32
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	19735,49