

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE**

# **DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA MEDIR LA EXHALACIÓN DE RADÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DETECTORES DE TRAZAS.**

AUTORA: Marta Acosta Sabater

TUTORA: Belén Jeanne Juste Vidal

COTUTORA: María Pino Sancho Fernández

**Curso Académico: 2020-2021**



*Gracias a Gúmer por darme la oportunidad de poder formar parte del grupo de investigación  
SENUBIO durante este tiempo y a ellos por acogerme en su laboratorio.*

*En especial, agradecer a Aina, María y Belén por la ayuda recibida y las facilidades, que han  
hecho que este proyecto sea posible.*

*Agradecer a Antonio Lidón y a Abonos Conde por la aportación de manera desinteresada de las  
arenas objeto de estudio de este trabajo.*

*Gracias también a Clara que apareció cuando menos la esperaba y más la necesitaba, gracias  
por hacer que el máster haya sido un poco mejor contigo al lado.*

*Gracias a Ferran por estar siempre sea cual sea el motivo y no soltar nunca mi mano.*

*Pero sobre todo a mis padres por no dejar de confiar nunca en mi.*

*Esto también es un trocito de cada uno de vosotros.*



## Resumen

El gas radón es un gas noble radioactivo que se produce de la desintegración del radio y del uranio. Cuenta con tres isotopos naturales, siendo el  $^{222}\text{Rn}$  el que se encuentra en la atmósfera de forma más abundante y del que se obtienen las medidas ambientales.

El gas radón presente en el interior de los edificios tiende a acumularse dentro de ellos, este radón puede proceder del propio terreno, de los materiales usados para la construcción y cuyas materias primas contengan radón o alguno de sus descendientes, y del agua de consumo. La principal fuente de radón en el interior de los edificios es el propio terreno, por este motivo, las concentraciones más altas se encuentran en las plantas bajas, que están en contacto con el terreno. Todo esto induce a la necesidad de realizar un estudio de la exhalación de radón del suelo y promover acciones que mitiguen la entrada de este gas.

La peligrosidad del radón para la salud ha causado que actualmente se tenga un mayor control de las fuentes y de las emisiones radioactivas. Desde 2010 la Organización Mundial de la Salud considera este gas como una de las principales causas del cáncer de pulmón. Los descendientes del gas son adheridos a las partículas del aire y de esta forma, al inhalarlo, dañan el tejido pulmonar. Por lo tanto, la OMS recomienda como límite de concentración en espacios interiores  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

Aunque la OMS recomiende una concentración límite de  $100 \text{ Bq/m}^3$  para locales cerrados, la Directiva 2013/59/EURATOM fija como valor máximo  $150 \text{ Bq/m}^3$  de radón en el aire para edificios de obra nueva y  $300 \text{ Bq/m}^3$  para edificios ya construidos. Además, en el apartado HS6 del Código Técnico de la Edificación se fija un nivel promedio anual a nivel nacional de concentración de radón de  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Debido a la nocividad del gas radón para la salud humana, las elevadas concentraciones que se registran y la necesidad de controlar su emisión, en el presente Trabajo Fin de Máster se pretende estudiar la efectividad de una cobertura de arena para evitar la difusión de radón exhalado por una fuente natural de uranio-238 que se encuentra cubierta por esta arena. El estudio comprenderá, por un lado, la aplicación de diferentes técnicas de medida, concretamente se va a utilizar un detector de la concentración de radón en continuo, electretes y detectores de trazas. Los detectores de trazas se utilizan de manera generalizada en diferentes áreas de la detección radiactiva ambiental, pero su uso en la medida de exhalación de radón superficial por el suelo no está tan estandarizada, de ahí el interés de desarrollar un procedimiento validado para su uso en esta aplicación.

Por otra parte, el estudio abordará también la determinación de la influencia en la cantidad de radón exhalado de diferentes parámetros como: el tipo de fuente, la granulometría de la arena empleada, y la humedad de la misma.

Finalmente, se analizarán y compararán los diferentes valores de tasa de exhalación obtenidos en función del tiempo de exposición para cada situación y para cada una de las metodologías. Con todo ello se validará la metodología de los detectores de trazas para la medida de exhalación superficial de radón.

**Palabras clave:** Radón, trazas, exhalación, arena, validación.



## Resum

El gas radó és un gas noble radioactiu que es produeix de la desintegració del radi i de l'urani. Compta amb tres isòtops naturals, sent el  $^{222}\text{Rn}$  el que es troba en l'atmosfera de forma més abundant i del qual s'obtenen les mesures ambientals.

El gas radó present a l'interior dels edificis tendeix a acumular-se dins d'ells, aquest radó pot procedir del propi terreny, dels materials usats per a la construcció i les matèries primeres de la qual continguen radó o algun dels seus descendents, i de l'aigua de consum. La principal font de radó a l'interior dels edificis és el propi terreny, per aquest motiu, les concentracions més altes es troben en les plantes baixes, que estan en contacte amb el terreny. Tot això indueix a la necessitat de realitzar un estudi de l'exhalació de radó del sòl i promoure accions que mitiguen l'entrada d'aquest gas.

La perillositat del radó per a la salut ha causat que actualment es tinga un major control de les fonts i de les emissions radioactives. Des de 2010 l'Organització Mundial de la Salut considera aquest gas com una de les principals causes del càncer de pulmó. Els descendents del gas són adherits a les partícules de l'aire i d'aquesta manera, en inhalar-lo, danyen el teixit pulmonar. Per tant, l'OMS recomana com a límit de concentració en espais interiors  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

Encara que l'OMS recomane una concentració límit de  $100 \text{ Bq/m}^3$  per a locals tancats, la Directiva 2013/59/EURATOM fixa com a valor màxim  $150 \text{ Bq/m}^3$  de radó en l'aire per a edificis d'obra nova i  $300 \text{ Bq/m}^3$  per a edificis ja construïts. A més, en l'apartat HS6 del Codi Tècnic de l'Edificació es fixa un nivell mitjà anual a nivell nacional de concentració de radó de  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

A causa de la nocivitat del gas radó per a la salut humana, les elevades concentracions que es registren i la necessitat de controlar la seua emissió, en el present Treball Fi de Màster es pretén estudiar l'efectivitat d'una cobertura d'arena per a evitar la difusió de radó exhalat per una font natural d'urani-238 que es troba coberta per aquesta arena. L'estudi comprendrà, d'una banda, l'aplicació de diferents tècniques de mesura, concretament s'utilitzarà un detector de la concentració de radó en continu, electretes i detectors de traces. Els detectors de traces s'utilitzen de manera generalitzada en diferents àrees de la detecció radioactiva ambiental, però el seu ús en la mesura d'exhalació de radó superficial pel sòl no està tan estandarditzada, d'ací l'interés de desenvolupar un procediment validat per al seu ús en aquesta aplicació.

D'altra banda, l'estudi abordarà també la determinació de la influència en la quantitat de radó exhalat de diferents paràmetres com: el tipus de font, la granulometria de l'arena emprada, i la humitat d'aquesta.

Finalment, s'analitzaran i compararan els diferents valors de taxa d'exhalació obtinguts en funció del temps d'exposició per a cada situació i per a cadascuna de les metodologies. Amb tot això es validarà la metodologia dels detectors de traces per a la mesura d'exhalació superficial de radó.

**Paraules clau:** Radó, traces, exhalació, arena, validació



## Abstract

The radon gas is a radioactive noble gas which is produced from the decay of radium and uranium. It has three natural isotopes, the  $^{222}\text{Rn}$  is the most abundant in atmosphere and environmental measurements are obtained from it.

The radon gas present inside buildings tends to accumulate inside them. This radon can come from the land itself, from materials used for construction and whose raw materials contain radon or one of its descendants, and from drinking water. The main source of radon inside buildings is the ground itself, for this reason, the highest concentrations are found in plants that are in contact with the ground. All this leads to the need to carry out a study of radon exhalation and promote actions that mitigate the gas.

The hazard of radon to human health has led to greater control over radioactive sources and emissions today. Since 2010 the World Health Organization has considered this gas as one of the main causes of lung cancer. The descendants of the gas are attached to the particles of the air and in this way damage the lung tissue. Therefore, the WHO recommends  $100\text{Bq}/\text{m}^3$  as a concentration limit for indoor spaces.

Although the WHO recommends a limit concentration of  $100\text{Bq}/\text{m}^3$  for indoor areas, Directive 2013/59/EURATOM sets a maximum value of  $150\text{Bq}/\text{m}^3$  of radon in the air for new construction buildings and  $300\text{Bq}/\text{m}^3$  for buildings already built. In addition, the section HS6 of the Technical Building Code sets a national average annual radon concentration level of  $300\text{Bq}/\text{m}^3$ .

Due to the harmfulness of radon gas to human health, the high concentrations recorded and the need to control its emission, this Master's Final Project aims to study the amount of radon exhaled by a covered natural source of uranium-238 by sand. The study will cover, on the one hand, the application of different measurement techniques, specifically the use of a continuous radon concentration detector, electrets and tracks detectors. Tracks detectors are widely used in different areas of environmental radioactive detection, but their use in the measure of exhalation of surface radon through the soil is not as standardized, hence the interest in developing a validated procedure for use in this application.

On the other hand, the determination of the influence on the amount of radon exhaled by different parameters such as: the type of source, the grain size of the sand used, and its humidity, will also be addressed in this study.

Finally, the different exhalation rate values obtained as a function of the exposure time for each situation and for each of the methodologies will be analyzed and compared. This will validate the methodology of tracks detectors for measuring radon surface exhalation.

**Keywords:** Radon, tracks, exhalation, sand, validation.



### **Índice de documentos**

- **Documento I. Memoria.**
- **Documento II. Presupuesto.**



# MEMORIA



## Índice de la memoria

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	21
1.1. Motivación .....	21
1.2. Justificación .....	21
1.3. Justificación académica .....	22
2. INTRODUCCIÓN .....	23
2.1 Radiación .....	23
2.2. El radón .....	24
2.2.1. Exhalación de radón .....	26
2.2.2. Radón en edificios .....	26
2.2.3. Detección y medida de radón .....	28
2.3. Problemas ocasionados por el radón .....	30
2.3.1. Efectos del radón sobre la salud .....	30
2.3.2. Prevención y mitigación del radón .....	30
2.4. Legislación .....	31
3. OBJETIVOS .....	32
4. METODOLOGÍA.....	33
4.1. Diseño del equipo experimental .....	33
4.2. Materiales empleados.....	33
4.2.1. Arenas.....	33
4.2.2. Fuentes de Radón.....	34
4.3. Técnicas e instrumentos de medida .....	36
4.3.1. Detector de yoduro de sodio .....	36
4.3.2 Detector de germanio .....	37
4.3.3. Radon Scout .....	38
4.3.4. Cámara H conectada a un electrete .....	39
4.3.5. Detectores de trazas .....	41
4.3. Caracterización de las fuentes .....	43
4.3.1. Caracterización pechblenda .....	43
4.3.2. Caracterización fosfoyesos.....	43
4.4. Ensayos de Radón en aire .....	44

4.4.1. Descripción del sistema experimental .....	45
4.4.2. Estudio de la influencia del tamaño de partícula .....	46
4.4.3. Estudio de la influencia de la humedad .....	47
4.4.4. Ensayos de verificación de los detectores de trazas .....	48
4.5. Ensayos de exhalación de radón .....	48
4.5.1. Descripción del sistema experimental .....	49
4.5.2. Ensayos de verificación de los detectores de trazas .....	50
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
5.1. Caracterización de fuentes.....	52
5.1.1. Pechblenda .....	52
5.1.2. Fosfoyesos .....	53
5.2. Resultados de los ensayos de radón en aire .....	55
5.2.1. Influencia del tamaño de partícula .....	55
5.2.2. Influencia de la humedad.....	57
5.2.3. Verificación de los detectores de trazas .....	62
5.3. Resultados de los ensayos de exhalación de radón .....	69
5.3.1. Verificación de los detectores de trazas .....	69
6. CONCLUSIONES .....	71
7. REFERENCIAS.....	72

## Índice de Figuras

Figura 1. Contribución de las distintas fuentes de exposición de radiación, tanto natural como artificial (Berenguer, 1995). .....	23
Figura 2. Tipos de radiación ( <i>Acerca de la Radiación   Novusmed, n.d.</i> ).....	24
Figura 3. Cadena de desintegración del $^{238}\text{U}$ , remarcada en azul la parte correspondiente al $^{222}\text{Rn}$ (OECD-NEA, n.d.). .....	25
Figura 4. Dibujo del perfil de un suelo donde se señalan los procesos que experimenta el gas radón (Aina Noverques et al., 2019). .....	26
Figura 5. Permeabilidad del radón al aire dependiendo del tipo de terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020). .....	27
Figura 6. Influencia del grado homogéneo de saturación de agua del terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020).....	28
Figura 7. Influencia del grado heterogéneo de saturación de agua del terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020).....	28
Figura 8. Esquema resumen de los distintos métodos de medición de radón. ....	29
Figura 9. Bidón impermeable al radón utilizado como equipo experimental. ....	33
Figura 10. Fuente natural del $\text{U}^{238}$ utilizada en el estudio.....	34
Figura 11. Balsas y acopios de residuos en el Hondón, Cartagena. ....	35
Figura 12. Fosfoyesos utilizados en el estudio. ....	36
Figura 13. Detector de yoduro con analizador multicanal y blindaje ( <i>NAIS-3x3<sup>TM</sup> NaI LED Temperature-Stabilized* Scintillation Detector, n.d.</i> ). ....	36
Figura 14. Modelo de espectro continuo que se obtiene en el software Gamma Acquisition Analysis.....	37
Figura 15. Detector de Germanio utilizado en el estudio. ....	38
Figura 16. Modelo de espectro continuo obtenido en el detector de germanio. ....	38
Figura 17. Radon Scout.....	39
Figura 18. Cámara H (Rad Elec Inc., 1991)(Rad Elec Inc., 1991) .....	40
Figura 19. Electretes Long-Term (Rad Elec Inc., 1991).....	40
Figura 20. Medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage (Rad Elec Inc., 1991).....	41
Figura 21. Microscopio, reveladora y detector de trazas. ....	41
Figura 22. Extracción del detector de la cámara.....	42
Figura 23. <i>Slide</i> con los detectores.....	42
Figura 24. <i>Slides</i> en el carrusel. ....	42
Figura 25. Mezcla NaOH-agua para el primer baño.....	43

Figura 26. Microscopio para la lectura del <i>slide</i> una vez revelado. ....	43
Figura 27. Placas petris de fosfoyesos para su caracterización. ....	44
Figura 28. Esquema de las mediciones de radón en aire. ....	44
Figura 29. Soporte metálico utilizado en los ensayos de medición de radón en el aire. ....	45
Figura 30. Montaje experimental de los ensayos de medición de radón en aire ....	45
Figura 31. Detectores de trazas dispuestos para medir. ....	46
Figura 32. Viales con arena para su análisis en el detector de yoduro. ....	47
Figura 33. Estufa con arena para el secado de esta. ....	47
Figura 34. Esquema de las mediciones de exhalación de radón. ....	48
Figura 35. Esquema del montaje experimental de los ensayos de exhalación de radón. ....	49
Figura 36. Fosfoyesos situados en la parte inferior del bidón. ....	49
Figura 37. Montaje experimental de los ensayos de radón exhalado para cada tipo de arena. ....	50
Figura 38. Espectro de la fuente natural de $^{238}\text{U}$ utilizada en los ensayos de medición de radón en aire. ....	52
Figura 39. Espectros de los fosfoyesos utilizados como fuente en los diferentes ensayos. ....	54
Figura 40. Representación de la influencia del tamaño de partícula. ....	55
Figura 41. Espectros de los dos tipos de arenas después del ensayo. ....	56
Figura 42. Espectros de los dos tipos de arenas tal y como se recibieron. ....	57
Figura 43. Estado inicial. ....	58
Figura 44. Arenas con 25mL después de 5 min. ....	58
Figura 45. Arenas con 50mL después de 5 min. ....	58
Figura 46. Arenas con 10mL después de 5 min. ....	59
Figura 47. Arenas con 20mL después de 5 min. ....	59
Figura 48. Arenas con 30mL después de 5 min. ....	59
Figura 49. Arenas en el estado inicial en el estudio de la influencia de la humedad. ....	60
Figura 50. Representación de la influencia de la humedad para la arena de 0-0,7 mm. ....	60
Figura 51. Representación de la influencia de la humedad para la arena de 2,2-8 mm. ....	61
Figura 52. Espectro después del segundo ensayo de influencia de la humedad para la arena de 0-0,7 mm de tamaño de partícula. ....	62
Figura 53. Representación gráfica del ensayo de la fuente natural de $\text{U}^{238}$ para los dos tiempos de exposición. ....	63
Figura 54. Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 0-0,7mm expuesta a la fuente natural de $\text{U}^{238}$ para los distintos tiempos de exposición. ....	63

Figura 55. Representación gráfica del ensayo de influencia del tamaño de partícula donde las arenas han sido expuestas a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días. .... 64

Figura 56. Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 0-0,7 mm expuesta a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días en el estudio de la influencia de la humedad..... 64

Figura 57. Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 2,2-8 mm expuesta a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días en el estudio de la influencia de la humedad..... 65

Figura 58. Representación gráfica del ensayo de los dos tipos de arena expuesta a fosfoyesos durante 3 días. .... 65

Figura 59. Detectores de trazas en el proceso de revelado..... 68

## Índice de Tablas

Tabla 1. Arenas de diferente granulometría utilizadas para el estudio.....	34
Tabla 2. Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la concentración de gas radón. ....	50
Tabla 3. Dimensiones cámara H. ....	51
Tabla 4. Caracterización de la fuente natural de uranio. ....	52
Tabla 5. Áreas de las regiones de interés de los espectros de los fosfoyesos. ....	54
Tabla 6. Composición isotópica de los residuos utilizados .....	54
Tabla 7. Áreas de las regiones de interés de los espectros de estudio de la influencia del tamaño de partícula. ....	56
Tabla 8. Áreas de las regiones de interés de los espectros del segundo estudio de la influencia de la humedad.....	62
Tabla 9. Concentración promedio y desviación típica para los detectores de trazas.....	66
Tabla 10. Resultados de los diferentes ensayos para ambas técnicas.....	67
Tabla 11. Resultados obtenidos de exhalación de radón.....	69
Tabla 12. Parámetros utilizados en el cálculo de exhalación de radón mediante detectores de trazas. ....	69
Tabla 13. Valores de tasa de exhalación utilizando como técnica los detectores de trazas. ....	70

## **1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN**

### **1.1. Motivación**

La idea de que la radiación natural no tenía efecto perjudicial para la salud existía hasta aproximadamente los años 70 y 80, cuando se comprobó la existencia en el interior de viviendas en diferentes países de un nivel de radón significativo (Berenguer, 1995).

A finales de los 80, se vio que en el interior de los edificios se podía encontrar altas concentraciones de radón. El radón que se encuentra en las viviendas se debe mayoritariamente al tipo de suelo sobre el que está construida dicha vivienda. El radón, que puede penetrar dentro de la vivienda por cualquiera grieta, tiende a acumularse si la vivienda no está bien ventilada.

El gas radón es considerado como causante del cáncer de pulmón según la Organización Mundial de la Salud. A pesar de la problemática que esto conlleva, en España hay pocas entidades que midan la exhalación de radón del terreno para poder llevar a cabo medidas de prevención y mitigación frente a la exposición elevada al radón.

En la mayoría de la normativa vigente, se establece como referencia la concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup> tanto en el interior de edificios de obra nueva o en el interior de los ya construidos. También hay normativas sobre los límites de dosis que una persona puede recibir, pero por el momento no hay ninguna que haga referencia a concentraciones de radón exhalado.

Es interesante estudiar la posibilidad de medir la exhalación del suelo antes de construir un edificio en las zonas donde se conozca que hay elevada concentración de radón. Para la medida de exhalación de radón, las técnicas habitualmente empleadas son las cámaras de acumulación asociadas a equipos en continuo y la cámara h conectada a un electrete entre otras. Sin embargo, existen otras técnicas de medida de radón que presentan ventajas importantes frente a las técnicas mencionadas. Una de estas técnicas son los detectores de trazas. Las ventajas más destacables de los detectores de trazas es que son más económicos que los detectores de radón que se suelen usar, otra ventaja importante es que los resultados que se obtienen mediante los detectores de trazas son resultados muy fiables. Por ello, en el presente TFM se plantea el estudio de la utilización de los detectores de trazas para medir la exhalación de radón del terreno, para su validación mediante la comparación de los resultados experimentales con las mediciones de otras técnicas.

Así, la validación de la exhalación de radón mediante los detectores de trazas supondrá un avance importante para la comunidad científica y la sociedad en general, contando con una técnica ventajosa para dicha determinación.

### **1.2. Justificación**

Conociendo la normativa vigente en España, sobre todo sabiendo las restricciones del Código Técnico de la Edificación y de la Directiva 2013/50/EURATOM pendiente de trasposición en España, resulta imprescindible medir la exhalación de radón antes de construir edificios.

Para poder medir la exhalación de radón se necesita conocimiento sobre los métodos de medición que mejor se ajusten a las características de cada localización, como pueden ser las

características del suelo o las condiciones meteorológicas del lugar en el que se va a medir la exhalación, así como otras características relacionadas con el coste y disponibilidad de los equipos, o el tiempo de medida.

Actualmente, hay pocos estudios comparativos de técnicas de medición de radón exhalado, es por ello por lo que este Trabajo Final de Máster pretende validar una metodología más económica que las comúnmente utilizadas y de la que se obtienen resultados más fiables.

### **1.3. Justificación académica**

Este Trabajo Fin de Máster también supone la culminación de los estudios del Máster en Seguridad Industrial y Medio Ambiente y la obtención del título otorgado por el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universitat Politècnica de València.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1 Radiación

La radiación se define como la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas. La radiación convive con los seres vivos desde su existencia y proviene de fuentes naturales, pero el ser humano ha desarrollado equipos que utilizan radiaciones en su funcionamiento.

La radiación natural forma parte del medio ambiente y sus componentes mayoritarios son las radiaciones cósmicas y el radón, estas radiaciones se encuentran de forma natural en suelos y rocas. A este tipo de radiación se le debe añadir la radiación artificial y el aumento de la dosis que reciben las personas que reciben algún tipo de exposición a la radiación artificial. En la **Figura 1** se observa gráficamente la contribución de las distintas fuentes de exposición, tanto natural como artificial.



**Figura 1.** Contribución de las distintas fuentes de exposición de radiación, tanto natural como artificial (Berenguer, 1995).

Hay dos tipos de radiación, la radiación no ionizante y la radiación ionizante, la diferencia entre ambas es la cantidad de energía para producir ionizaciones de los átomos del medio que son irradiados. En el caso de la radiación no ionizante no tienen la suficiente energía para que esto se produzca, mientras que en las radiaciones ionizantes sí, y van desde los rayos X hasta la radiación cósmica, dependiendo de la longitud de onda y la cantidad de energía.

A continuación, se va a profundizar sobre las radiaciones ionizantes, que son objeto de este estudio.

Las radiaciones ionizantes pueden ser de dos tipos. Por un lado, las que se presentan en forma de partículas con masa que son la radiación alfa, radiación beta y neutrones. Se miden por el nivel de penetración y por el tipo de carga eléctrica. Y, por otro lado, las radiaciones que se presentan en forma de radiación electromagnética, en este caso sin carga ni masa que son los rayos X, procedentes de las capas externas del átomo y los rayos gamma que proceden de un núcleo atómico inestable. En este caso ambas radiaciones son muy penetrantes. En la **Figura 2** se muestran de forma gradual los tipos de radiación.

## TIPOS DE RADIACIÓN

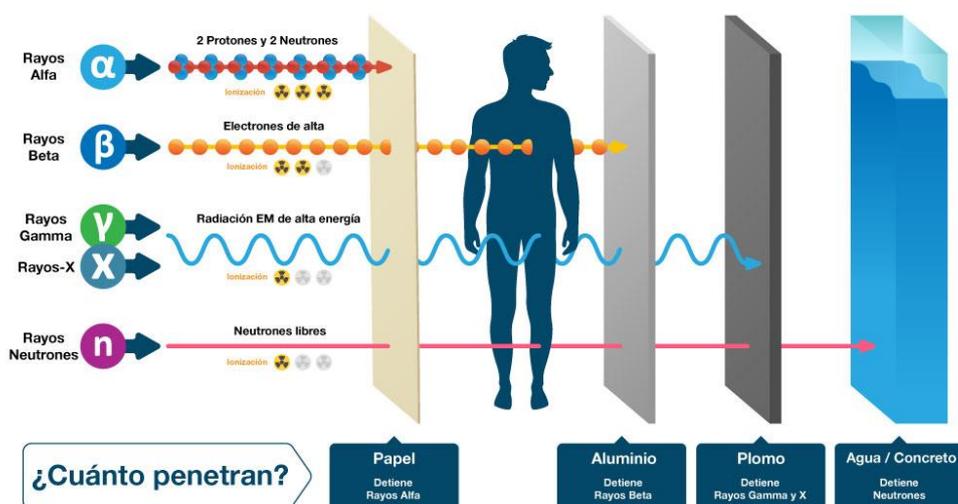


Figura 2. Tipos de radiación (Acerca de la Radiación | Novusmed, n.d.).

### 2.2. El radón

El radón es un gas noble que presenta tres isótopos naturales, radioactivos y de períodos cortos. Proviene de la desintegración radiactiva del uranio. Los isótopos que presenta son  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  y  $^{222}\text{Rn}$  con tiempos de desintegración de 3,96 segundos, 55,6 segundos y 3,82 días respectivamente. El isótopo  $^{222}\text{Rn}$  es el que se encuentra en la atmósfera de forma más abundante y del que se obtienen las medidas ambientales (Crespo, 1989).

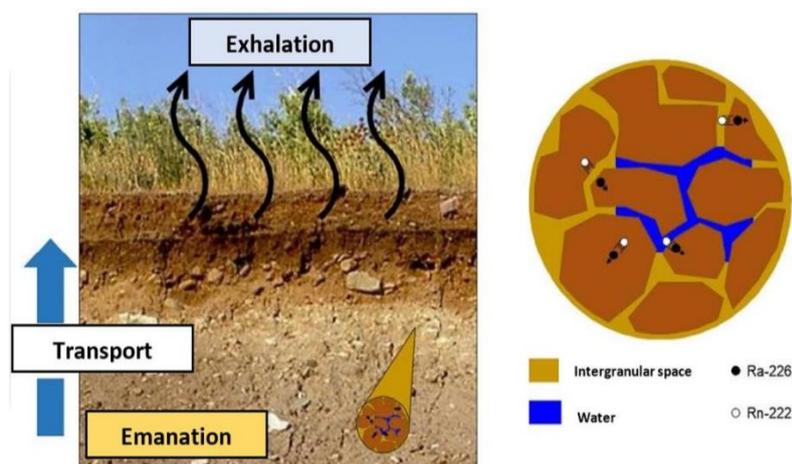
Cada isótopo del radón se encuentra en una cadena de desintegración diferente, el  $^{222}\text{Rn}$  proviene de la desintegración del  $^{238}\text{U}$ , el  $^{220}\text{Rn}$ , también llamado torón se obtiene de la cadena del  $^{232}\text{Th}$  y el  $^{219}\text{Rn}$  o actinon, del  $^{235}\text{U}$ . Las cadenas de desintegración que se han nombrado finalizan en la formación del isótopo estable de plomo. A continuación, en la **Figura 3** se muestra la cadena de desintegración del  $^{238}\text{U}$ , remarcada en ella la cadena de desintegración del  $^{222}\text{Rn}$  en color azul, objeto de estudio de este trabajo.



### 2.2.1. Exhalación de radón

La vida media del  $^{222}\text{Rn}$  es lo suficientemente larga para que el radón migre desde la roca hacia el aire a través del suelo. Algunos átomos de radón se generan por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  contenido en partículas de los minerales presentes en el medio, estos consiguen alcanzar el espacio entre partículas y, por la energía de retroceso con que salen despedidos, logran escapar de la matriz sólida del material dando lugar al fenómeno que se conoce como emanación.

Después de la emanación, los átomos de radón que están en el espacio intersticial son transportados a la superficie del suelo mayoritariamente por difusión hasta que se desintegran o finalmente se liberan al aire. Tras la emanación y el transporte a la superficie por difusión, el radón se puede liberar de la superficie a la atmosfera y este fenómeno es lo que se conoce como exhalación de radón (Aina Noverques et al., 2019). A continuación, en la **Figura 4**, se muestra el dibujo del perfil de un suelo donde se señalan los tres procesos que experimenta el gas radón.



**Figura 4.** Dibujo del perfil de un suelo donde se señalan los procesos que experimenta el gas radón (Aina Noverques et al., 2019).

### 2.2.2. Radón en edificios

Cuando el radón accede a un espacio cerrado e insuficiente ventilado, tiende a acumularse en el interior de dicho espacio como puede ser el caso de un edificio. El radón puede proceder directamente del propio terreno, de los materiales de construcción que a su vez contengan algún descendiente de radón o del agua de consumo.

En cuanto al radón que procede de los materiales de construcción, contribuye a la concentración media de radón en el interior de las viviendas entre  $10$  y  $20 \text{ Bq/m}^3$ , menos representativa que la correspondiente a la del terreno.

El radón que contiene el agua procede del uranio natural que liberan las rocas en el agua subterránea cuando están en contacto. Esto supondría un problema si se utilizaran las aguas subterráneas de manantiales o pozos para el consumo sin airearse, pero habitualmente el radón se dispersa con el aire. Si las aguas que se utilizan para el consumo son las superficiales no existe ningún riesgo.

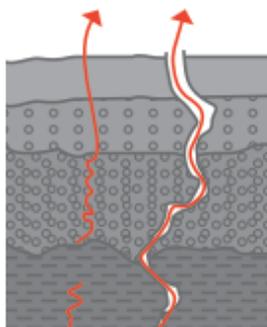
El radón se introduce en el interior de los edificios por convección generada por el gradiente de presión entre los gases que hay en el terreno y el aire del interior del edificio, mediante las grietas o zonas que presentan discontinuidad y que están en contacto con el terreno. También pasa al interior de los edificios por difusión generada por el gradiente de presión entre los gases que hay en el terreno y el aire del interior del edificio que se produce a través de la masa de los materiales porosos que forman la envolvente.

Normalmente, la principal fuente de radón es el terreno y por este motivo las concentraciones mayores se encuentran en las plantas que están en contacto con el propio terreno como pueden ser los sótanos o las plantas bajas de los edificios.

Debido a que la densidad del radón es mayor que la del aire, algunas veces se pueden obtener concentraciones altas en zonas elevadas, cuando el aire puede ascender por procesos convectivos y de tiro térmico (Linares Alemparte & Ortega, 2020).

El terreno también es un factor determinante en la exhalación de radón del terreno. Por una parte, por la composición geológica que tenga el propio terreno si contiene una gran cantidad de radón como es el caso de los que proceden de rocas de granito, pizarras o esquistos. Por otra parte, es un factor determinante por la capacidad de movimiento que tiene el radón en el terreno por la permeabilidad, o fractura de la roca y el grado de saturación de agua del terreno.

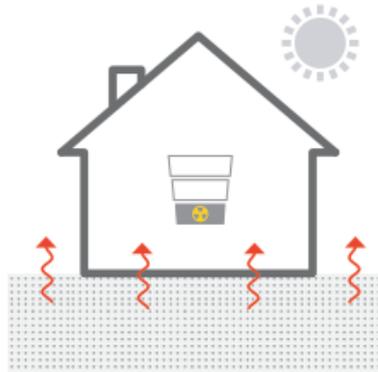
Cuando la permeabilidad es mayor, mayor es la facilidad de movimiento del radón. En el caso de terrenos sin fracturar, aunque la concentración sea elevada, será más complicado que el radón pase a la parte superior que cuando el terreno está fracturado. En la **Figura 5** se observa el fenómeno de permeabilidad del radón al aire dependiendo del tipo de terreno.



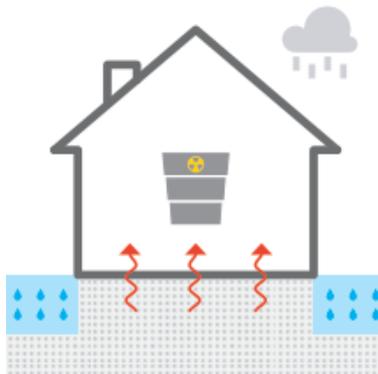
**Figura 5.** Permeabilidad del radón al aire dependiendo del tipo de terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020).

En cuanto al grado de saturación de agua, a mayor saturación, la facilidad de movimiento del radón es menor ya que el agua contenida en el terreno retiene los gases ya que presenta un coeficiente de difusión inferior al del aire.

Si el grado de saturación del agua es homogéneo en todo el terreno (**Figura 6**), el efecto es protector frente al radón, mientras que si el grado de saturación es heterogéneo (**Figura 7**) el efecto es perjudicial porque dificulta la salida de radón al exterior por lo que tiende a aumentar su entrada a la vivienda.



**Figura 6.** Influencia del grado homogéneo de saturación de agua del terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020).



**Figura 7.** Influencia del grado heterogéneo de saturación de agua del terreno (Linares Alemparte & Ortega, 2020).

### 2.2.3. Detección y medida de radón

La selección de los métodos de medición de radón y de sus descendientes y su posible aplicación, depende de factores como la accesibilidad, experiencia de uso o su fiabilidad. Las aplicaciones más comunes son:

- mediciones a corto plazo, que permiten identificar de forma más rápida los lugares donde la concentración de radón es elevada.
- mediciones de seguimiento, que confirman y caracterizan las concentraciones altas de radón.
- mediciones de diagnóstico, que determinan las posibles soluciones de corrección.
- mediciones pre y post-mitigación, que tienen como objetivo determinar la eficacia de las medidas correctivas que se hayan empleado para disminuir las concentraciones de radón.

De la alta variabilidad del gas radón nace la necesidad de que las mediciones sean a largo plazo para poder conseguir información útil mediante promedios anuales porque las mediciones a corto plazo suelen suponer una aproximación a las condiciones del terreno.

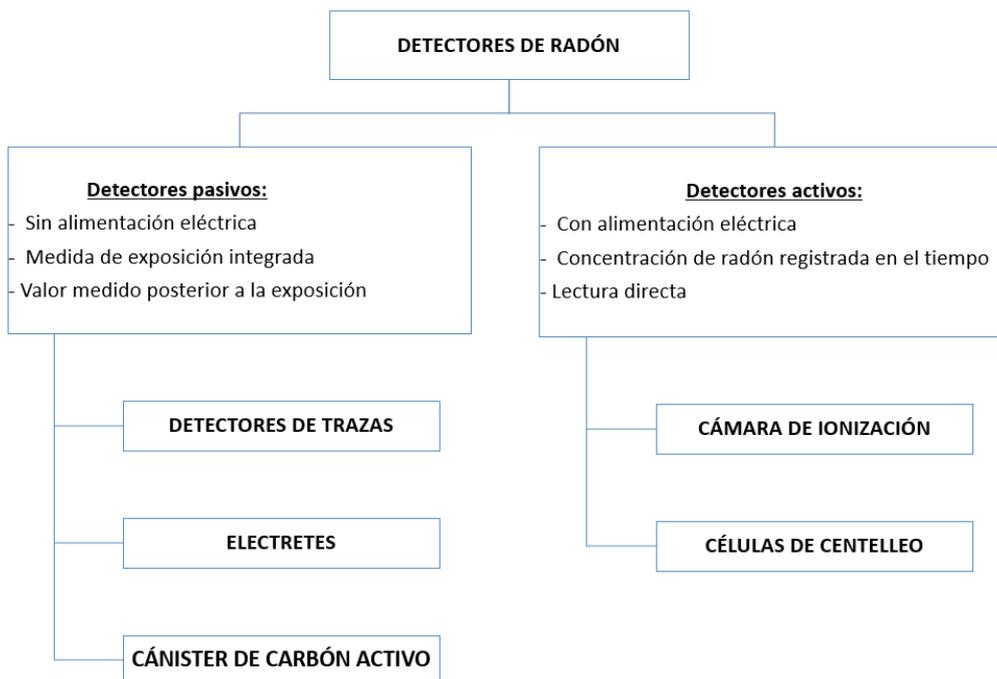
La elección del tipo de detector dependerá del objetivo de la medición. Para la obtención del promedio anual de concentración de radón, los detectores más apropiados son los que utilizan

un método de medición integrada como son las trazas, carbón activo y los electretes, que proporcionan el promedio de la medida o el método de medición en continuo. Se trata de aparatos electrónicos que además del promedio facilitan la evolución de la concentración de radón en función del tiempo, de esta forma se pueden percibir alteraciones producidas por cambios climatológicos u otras variables que influyen en la concentración de radón. Los detectores que se suelen emplear son los que utilizan el método de medición integrada porque son de bajo coste.

Los sistemas de detección de radón se pueden clasificar en activos o en pasivos, dependiendo de si requieren una fuente de alimentación para el registro de datos. La mayoría de los detectores con método de medición en continuo suelen ser de tipo activo.

Los detectores de tipo activo suelen ser precisos y de mayor tamaño. La mayoría de los detectores de tipo activo trabajan en continuo y se utilizan para un amplio rango de concentración de radón, sin embargo, el coste de estos detectores es elevado y funcionan con dependencia de red eléctrica.

Existe también la opción de la medida de concentración de radón en función de sus descendientes, se utiliza para ello la detección de las emisiones alfa provenientes de los descendientes del radón ( $^{214}\text{Po}$  y  $^{218}\text{Po}$ ) que se retienen en un filtro y de bombean hasta el detector. A continuación, en la **Figura 8**, se muestra un breve esquema resumen de algunos de los métodos de medición de radón.



**Figura 8.** Esquema resumen de los distintos métodos de medición de radón.

En cuanto al tiempo de medida, las mediciones cortas no son representativas para poder determinar la exposición de las personas, para ello se debe considerar la media anual. Como esto no suele ser viable, el mínimo tiempo que se suele considerar suficiente son medidas de dos meses de forma continuada.

Las condiciones de medida más adecuadas son las más parecidas posible del uso y ventilación que habitualmente tenga ese edificio para que los resultados obtenidos sean lo más representativos posibles.

## **2.3. Problemas ocasionados por el radón**

### *2.3.1. Efectos del radón sobre la salud*

El gas radón es incoloro, inoloro e insípido y soluble en agua. El gas radón tiene una importante capacidad de movimiento al ser gaseoso y esto le permite llegar a los edificios procedentes del subsuelo y acumularse en su interior. En el interior de los edificios, las personas pueden inhalarlo. Los descendientes del radón emiten partículas alfas y estas se depositan en el tejido pulmonar pudiendo ocasionar cáncer (Linares Alemparte & Ortega, 2020).

La Organización Mundial sobre la Salud clasifica al radón como la segunda causa del cáncer de pulmón y la primera causa de cáncer de pulmón entre los no fumadores, este hecho ha dado lugar a cambios legislativos. La OMS estima que entre un 3% y un 14% del total de los casos con cáncer de pulmón en España se puede atribuir al radón. En la mayoría de los casos, el cáncer de pulmón es inducido por el radón y por el consumo de tabaco (Zeeb et al., 2015).

Cuando una persona está expuesta al radón y a sus productos de desintegración, recibe una mayor dosis de radiación ionizante en el epitelio bronquial, aunque algunas zonas como las vías respiratorias extratorácicas y la piel también se puedan ver afectadas al igual que los riñones y la médula ósea.

Aunque hay estudios sobre mineros expuestos al carbón de los que no se han extraído conclusiones de que el radón pueda provocar un cáncer diferente al de pulmón, existen estudios posteriores que evalúan la incidencia de leucemia, linfoma y mieloma múltiple en mineros de uranio checos, donde se ve la relación entre la exposición al radón y la leucemia. También se asocia la esclerosis múltiple y la exposición a radón en interiores, mostrado por un estudio ecológico realizado en Noruega, aunque este último hecho no debe tomarse como prueba de que el radón actúe en dicha causa de la enfermedad porque los estudios ecológicos son propensos a una serie de sesgos (Zeeb et al., 2015).

### *2.3.2. Prevención y mitigación del radón*

El principal objetivo de protección frente al radón es disminuir la exposición de las personas en el interior de los edificios. Las soluciones se pueden obtener desde el aislamiento del edificio, la reducción de la concentración de radón antes de que entre en el edificio o la reducción de la concentración del radón que ya está dentro del edificio (Linares Alemparte & Ortega, 2020).

Para tener un control sobre el radón y de esta forma reducir el riesgo de exposición en la población, se deben establecer objetivos tanto de prevención como de mitigación.

Los sistemas de prevención del radón y los de mitigación deben seguir unos criterios de diseño como reducir la concentración de radón por debajo del nivel de referencia, no crear tiro inverso, ser duraderos y funcionales a lo largo de la vida útil de los edificios, permitir un control fácil, ser silenciosos, entre otros.

Las estrategias de prevención del radón tienen como objetivo limitar la infiltración del gas desde el suelo. Estas estrategias son: despresurización activa del suelo, despresurización pasiva del suelo, sellado de superficies, barreras y membranas, ventilación de los espacios no habitables, ventilación de los espacios habitables y tratamiento del agua.

Medir exhalación del suelo antes de la construcción de un edificio también es una medida de prevención, ya que nos dará una idea de si es necesario emplear alguna medida constructiva específica que evite la entrada de radón.

En cuanto a las estrategias de mitigación del radón, se realizan en edificios ya existentes y estas estrategias son: despresurización activa del suelo, ventilación de los espacios habitables, sellado de superficies y tratamiento del agua.

Después de la instalación de los sistemas de mitigación se deben iniciar mediciones a corto y largo plazo en la misma ubicación que las mediciones originales para garantizar la eficacia de los sistemas de mitigación (Zeeb et al., 2015).

#### **2.4. Legislación**

La peligrosidad del radón para la salud ha causado que actualmente se tenga un mayor control de las fuentes y de las emisiones radioactivas. Desde 2010 la Organización Mundial de la Salud considera al gas radón una de las principales causas del cáncer de pulmón. Los descendientes del gas son adheridos a las partículas del aire y de esta forma, al inhalarlo, dañan el tejido pulmonar. Por este motivo, la OMS recomienda como límite de concentración en espacios interiores  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

Con el fin de disponer de un mayor control del radón, el Diario Oficial de la Unión Europea publicó en 2013 la Directiva 2013/59/EURATOM, que establecía nuevos niveles límite de radón en aire y planes de acción frente a su exposición. En esta directiva se establecen las normas de seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes.

Aunque la OMS recomiende una concentración límite de  $100 \text{ Bq/m}^3$  para locales cerrados, la Directiva 2013/59/EURATOM fija como valor máximo  $150 \text{ Bq/m}^3$  de radón en el aire para edificios de obra nueva y  $300 \text{ Bq/m}^3$  para edificios ya construidos.

La normativa europea obliga a los estados miembros a que se tomen medidas y controles para reducir todas las concentraciones superiores a  $300 \text{ Bq/m}^3$ , en España esta directiva (2013/59/EURATOM) debería de haber entrado en vigor en 2018.

Además, en el apartado HS6 del Código Técnico de la Edificación se fija un nivel promedio anual a nivel nacional de concentración de radón de  $300 \text{ Bq/m}^3$  en concordancia con los límites fijados por la directiva europea.

### 3. OBJETIVOS

Entre las técnicas habitualmente empleadas para la medición de exhalación de radón, no están los detectores de trazas, los cuales presentan ventajas importantes frente a las técnicas habitualmente utilizadas como el coste y la fiabilidad de los resultados. Por estos motivos, el objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster es desarrollar una metodología para la medición de exhalación de radón mediante la utilización de detectores de trazas.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la influencia del tamaño de partícula en el proceso de exhalación del radón a través de un medio sólido poroso.
- Comprobar la influencia de la humedad del medio sólido poroso en la exhalación del radón.
- Comparar la técnica de trazas con las medidas mediante Radon Scout para la determinación de la concentración de radón en aire.
- Verificar la técnica de trazas para la medición de exhalación de radón.

#### 4. METODOLOGÍA

En este punto se exponen los materiales que se han utilizado para la realización de los diferentes ensayos, la preparación y procedimiento experimental de dichos ensayos, y las técnicas e instrumentos de medidas que se han empleado.

##### 4.1. Diseño del equipo experimental

En este estudio se ha utilizado como equipo experimental un bidón de 30 L de volumen, de polietileno de alta densidad, con cierre de ballesta y que no deja pasar a través de él el radón. El bidón presenta un diámetro de 26 cm, una altura de 52 cm y un ancho aproximadamente de 23 cm. El bidón que se ha utilizado en los ensayos se muestra en la **Figura 9**.



**Figura 9.** Bidón impermeable al radón utilizado como equipo experimental.

##### 4.2. Materiales empleados

###### 4.2.1. Arenas

En este estudio, las arenas se han elegido como el material de cobertura para la simulación de la tierra, por donde se difunde el radón hasta exhalar al aire. Para la validación de la técnica de detectores de trazas en la medida de exhalación de radón, se han utilizado arenas de diferente tamaño de partícula.

A continuación, en la **Tabla 1** se muestran las arenas de diferente granulometría utilizadas para el estudio y obtenidas directamente de la cantera.

**Tabla 1.** Arenas de diferente granulometría utilizadas para el estudio.

Arenas de estudio	
	
(0-0,7 mm)	(2,2-8 mm)

#### 4.2.2. Fuentes de Radón

##### a) Fuente natural

En el presente estudio, se ha utilizado una fuente natural de  $U^{238}$  (mineral pechblenda) mostrada en la **Figura 10**, para la realización de los ensayos de medición de radón en aire. La caracterización de la fuente se ha realizado con un detector de centelleo sólido que permite realizar espectrometría gamma, en concreto un detector de yoduro de sodio (NaI), siendo la actividad de la fuente de 1,83 kBq (alrededor de 50 microCi) aproximadamente.



**Figura 10.** Fuente natural del  $U^{238}$  utilizada en el estudio.

Según el Anexo I del Real Decreto 1836/1999 Publicado en el BOE nº 86 el 10 de abril de 2003, en las tablas A y B del mismo anexo, se definen los valores de exención para los nucleidos y según la instrucción del 26 de febrero de 2003, del Consejo de Seguridad Nuclear, número IS-0, el límite de exención del  $U^{238}$  es de  $10^4$  Bq, por tanto, la fuente utilizada en este estudio es una fuente exenta teniendo en cuenta la instrucción del Consejo de Seguridad Nuclear.

## b) Fosfoyesos

Los fosfoyesos son utilizados para la validación de la metodología de medición de exhalación de radón mediante los detectores de trazas.

La producción de ácido fosfórico por vía húmeda para su uso principalmente en la fabricación de fertilizantes fosfatados se realiza atacando los fosfatos naturales, que se obtienen a su vez de roca fosfórica, con ácido sulfúrico, y se genera un subproducto que se denomina fosfoyeso que mayoritariamente está compuesto de sulfato cálcico hidratado.

Las industrias de producción de ácido fosfórico son consideradas industrias de tipo NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*), siendo industrias no nucleares que utilizan en su proceso de producción materia prima con alto contenido de radionucleidos naturales.

La naturaleza y características del fosfoyeso están influenciadas por la composición y la calidad de la roca fosfórica, el proceso de fabricación, el método de vertido usado, edad, localización y profundidad del apilamiento. Los niveles de radiación del fosfoyeso varían de un apilamiento a otro por factores como el contenido en humedad, temperatura, entre otros.

Los fosfoyesos que se han utilizado en el presente trabajo son procedentes de diferentes ubicaciones de balsas y acopios de residuos en el Hondón, Cartagena, en concreto cinco ubicaciones distintas. En la **Figura 11** se muestran las balsas y acopios de residuos en el Hondón de donde se han obtenido los fosfoyesos de estudio.



**Figura 11.** Balsas y acopios de residuos en el Hondón, Cartagena.

Los fosfoyesos han sido caracterizados con el detector de Germanio. A continuación, en la **Figura 12** se muestran los fosfoyesos tal y como se han utilizado en los ensayos.



**Figura 12.** Fosfoyesos utilizados en el estudio.

### 4.3. Técnicas e instrumentos de medida

En este apartado se describen las técnicas que se han seleccionado y los instrumentos de medida utilizados para llevar a cabo el presente Trabajo Fin de Máster.

#### 4.3.1. Detector de yoduro de sodio

El sistema de espectrometría gamma de alta eficiencia es usado para numerosas aplicaciones como la monitorización de la radiación, aplicaciones de campo o en laboratorios entre otras. En este estudio se utiliza en concreto el detector de yoduro de sodio con analizador multicanal y blindaje, estabilizado en temperatura que se muestra en la **Figura 13**. Estos detectores se utilizan para la identificación rápida de radionucleidos en entornos interiores y en aplicaciones de campo, gracias a esto se puede trabajar en un gran rango de temperaturas (-20 °C hasta +50 °C).



**Figura 13.** Detector de yoduro con analizador multicanal y blindaje (NAIS-3x3™ NaI LED Temperature-Stabilized\* Scintillation Detector, n.d.).

El detector mostrado en la **Figura 13** es un detector de yoduro sódico con analizador multicanal y blindaje de la marca Canberra, modelo OSPREY, NAI 3"x3" y el blindaje mostrado es de Pb<sup>727</sup> y es el que se ha utilizado en este estudio.

En el presente TFM, se utilizó el detector de NaI para analizar las arenas inicialmente y después de cada ensayo, con el fin de determinar la posibilidad de que este material de cobertura adsorbiera alguna cantidad de radón. También se utilizó para la caracterización de la fuente natural de  $U^{238}$ .

En todos los casos, el detector de NaI se programa con el software Gamma Acquisition Analysis para obtener en cada tramo de energía los valores de cuentas por segundo durante 24 horas. Una vez ha terminado el tiempo de medida, en el programa Gamma Acquisition Analysis se obtiene un espectro continuo que se analiza en cada uno de los casos para los descendientes gamma del radón, el  $Pb^{214}$  y el  $Bi^{214}$ , tal y como se muestra en la **Figura 14**.



**Figura 14.** Modelo de espectro continuo que se obtiene en el software Gamma Acquisition Analysis.

#### 4.3.2 Detector de germanio

El equipo de detección por espectrometría gamma se utiliza para la detección de gases nobles (Xe, Kr principalmente) y otros radionucleidos. El detector de espectrometría gamma, en concreto el detector de germanio, optimiza la detección de partículas gamma en un determinado rango de energías y minimiza el fondo de radiación debido a la muestra y al entorno. La medida se realiza en el interior del blindaje, el cual se encuentra sellado garantizando la ausencia de fugas.

El sistema de detección se compone del detector, blindaje, amplificador, analizador multicanal, fuente de alimentación y software de adquisición. A través del software se puede gestionar el analizador multicanal, calibrar el detector, analizar los datos adquiridos y gestionar los archivos e informes.

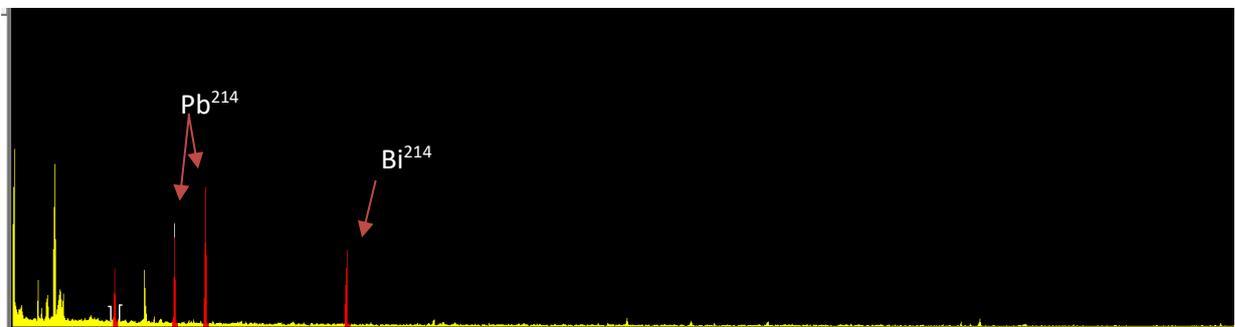
En este estudio se ha utilizado un detector de germanio con módulo analizador digital de espectros, blindaje y software, en concreto el detector de germanio marca Canberra, modelo BEGE3830 7500SL en configuración vertical, módulo analizador digital de espectros marca Canberra modelo DSA-LX, blindaje de hierro de baja actividad y Genie™ 2000 Software. El equipo se muestra en la **Figura 15**.



**Figura 15.** Detector de Germanio utilizado en el estudio.

En el presente TFM, se utilizó el detector de germanio para analizar los fosfoyesos utilizados para las mediciones de exhalación de radón. En todos los casos, el detector de germanio se programa con el software Gamma Acquisition Analysis para obtener en cada tramo de energía los valores de cuentas por segundo durante 10 minutos.

Una vez ha terminado el tiempo de medida, en el programa Gamma Acquisition Analysis se obtiene un espectro continuo que se analiza en cada uno de los casos para los descendientes gamma del radón, el  $Pb^{214}$  y el  $Bi^{214}$ , tal y como se muestra en la **Figura 16**.



**Figura 16.** Modelo de espectro continuo obtenido en el detector de germanio.

#### 4.3.3. Radon Scout

El Radon Scout, cuya imagen se muestra en la **Figura 17**, es un instrumento que está centrado en la detección de radón ( $Rn^{222}$ ) en el aire ambiental y desarrollado para mediciones de largo plazo en lugares afectados por el radón. No se requiere una fuente de alimentación externa ya que cuenta con baterías de larga duración y esto hace que el uso y la exposición sean posibles sin ningún tipo de perturbación.



**Figura 17.** Radon Scout.

Debido a la alta sensibilidad del Radon Scout, se detectan variaciones de la concentración de actividad con precisión, incluso cuando la concentración de radón es baja. El Radon Scout funciona en modo de difusión, de esta forma se excluye la posible influencia del Torón. La cámara de medición del Radon Scout está equipada con un detector de semiconductores, no muestra sensibilidad a la humedad ambiental y contiene sensores de temperatura, humedad y presión barométrica, complementos muy útiles para el registro de datos. (Manual, 2011)

El Radon Scout puede estar expuesto hasta cuatro meses con registro continuo de datos, los cuales son extraídos con el programa Radon Visión para su posterior análisis. Los resultados que ofrece son concentración de radón en aire en  $\text{Bq}/\text{m}^3$  durante el intervalo de tiempo en el que se haya hecho uso de él.

En el presente trabajo, el Radon Scout se ha utilizado para tener constancia y comprobar la concentración de radón en el aire dentro del bidón en un período de tiempo conocido. Estos resultados permiten comparar los valores que se obtienen de concentración al revelar las trazas tal y como se explicará en apartados posteriores.

#### *4.3.4. Cámara H conectada a un electrete*

La técnica de la cámara H conectada a un electrete es comúnmente utilizada para la medición de exhalación de suelos. Este sistema permite conocer el nivel de radón exhalado a partir de la acumulación del gas en su interior. El electrete se carga positivamente y los iones negativos producidos en la desintegración del radón lo descargan durante las 6 h de medida (A. Noverques et al., 2019).

La cámara H conectada a un electrete está compuesta por un electrete insertado en una cámara de material conductor de electricidad. La cámara presenta una ventana de difusión recubierta de carbono. Gracias al anillo de acero inoxidable se facilita el proceso de inserción de la cámara en la tierra y de este modo se evita que el gas se disperse. En la **Figura 18** se muestra la Cámara H, en este caso sin estar conectada a ningún electrete.



**Figura 18.** Cámara H (Rad Elec Inc., 1991)(Rad Elec Inc., 1991) .

Como detector de radón se utiliza el electrete que se conecta a la cámara H. El electrete está formado por un disco de teflón que es utilizado como recolector de iones y como sensor de ionización integrante. Para estas mediciones se han utilizado electretes Long-Term (L), aptos para mediciones de alta concentración de radón, cuya imagen se observa en la **Figura 19**.



**Figura 19.** Electretes Long-Term (Rad Elec Inc., 1991).

El gas radón se difunde a través del volumen de la cámara y se acumula en el interior de esta. El electrete, que inicialmente está cargado positivamente, se descarga como consecuencia de que los iones cargados emitidos por los descendientes del radón ionizan a las moléculas del aire, siendo estos iones los que provocan dicha descarga.

La diferencia de potencial del electrete se mide en el medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage Reader, que se muestra en la **Figura 20**.



**Figura 20.** Medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage (Rad Elec Inc., 1991).

La cámara H conectada a electrete se ha utilizado en este estudio para medir exhalación de radón en el bidón tal y como se explicará de forma más detallada en el apartado 4.5. Esta técnica también ha permitido comprobar la validez de los detectores de trazas.

#### 4.3.5. Detectores de trazas

Los detectores de trazas se utilizan para determinar el promedio de concentración de gas radón durante un periodo largo. Este método es recomendable cuando ya se ha determinado la presencia de altas concentraciones de gas radón mediante otro método más rápido.

El microscopio, la reveladora y la cámara dentro de la cual está el detector de trazas, son los equipos necesarios para poder hacer uso de dicha metodología, todos estos equipos se muestran en la **Figura 21**.



**Figura 21.** Microscopio, reveladora y detector de trazas.

Para poder utilizar los detectores de trazas para medir concentraciones de radón en aire, se deben colocar más de 2 cámaras para hacer promedio de las medidas y dejarlas entre 1 y 3 meses. Si la concentración es baja, se puede dejar la cámara hasta un año.

El detector de trazas es de carbonato de alilidiglicol (CR-39), polímero muy sensible a la radiación  $\alpha$ . El detector está situado dentro de la cámara y por el interior de esta es por donde circula el aire. Cuando alguna partícula  $\alpha$  incide sobre el detector, “imprime” una traza en el cristal. El

crystal es revelado después de un tiempo con la intención de que las trazas se hagan más grandes mediante el ataque químico y su posterior análisis en el microscopio.

El ataque químico está compuesto por baños químicos. El primer baño al que hay que someter la muestra una vez sacada de la cámara es el baño abrasivo con 1kg de NaOH con 4L de agua a 90°C durante 4,5 horas. Después de este baño, se realiza un segundo baño de neutralización con ácido acético y agua destilada durante 20 minutos. Finalmente, se procede a la limpieza con agua destilada.

En el proceso de revelado, en primer lugar, se quitan los detectores de las cámaras (**Figura 22**) y se colocan en los *slides* (**Figura 23**) y estos a su vez en el carrusel para poder introducirlos en la reveladora (**Figura 24**). Paralelamente, se realiza la mezcla de NaOH para el primer baño, tal y como se ha explicado anteriormente (**Figura 25**). Cuando este finaliza, se realiza el baño con ácido acético y la posterior limpieza, también explicado anteriormente. Finalmente, se leen las trazas en el microscopio (**Figura 26**).



**Figura 22.** Extracción del detector de la cámara.



**Figura 23.** *Slide* con los detectores.



**Figura 24.** *Slides* en el carrusel.



**Figura 25.** Mezcla NaOH-agua para el primer baño.



**Figura 26.** Microscopio para la lectura del *slide* una vez revelado.

Cuando se revela, se hace uso del software RadoMeter RSV10 del microscopio, el cual cuenta las trazas y, con la introducción de la duración de las mediciones, se obtienen los resultados de concentración de radón en  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , densidad de trazas, entre otros datos.

En el presente Trabajo Fin de Máster, se han utilizado los detectores de trazas para la validación de esta metodología en el proceso de exhalación de radón, para ello se han utilizado varias trazas en cada ensayo. Los detectores de trazas se han utilizado en todos los ensayos, tanto en los de radón en aire como en los de exhalación de radón.

### **4.3. Caracterización de las fuentes**

#### **4.3.1. Caracterización *pechblenda***

La caracterización de la fuente natural de  $\text{U}^{238}$  (mineral *pechblenda*) se realizó con el detector de yoduro sódico con analizador multicanal y blindaje de la marca Canberra, modelo OSPREY, NAI 3"x3" y el blindaje de  $\text{Pb}^{727}$ .

Para obtener el espectro continuo del que se obtienen los descendientes gamma del radón, el  $\text{Pb}^{214}$  y el  $\text{Bi}^{214}$ , se utilizó el software Gamma Acquisition Analysis. En este caso, la medida fue de 24 horas.

#### **4.3.2. Caracterización *fosfoyesos***

Los fosfoyesos que se han utilizado, tal y como se ha explicado anteriormente, provienen de zonas diferentes de Cartagena, por este motivo para la caracterización se realizaron 5 medidas diferentes en el detector de germanio. Para ello, de cada muestra de fosfoyesos se introdujo

una placa Petri en el interior del detector para su análisis. Las placas que fueron analizadas se muestran en la **Figura 27**.

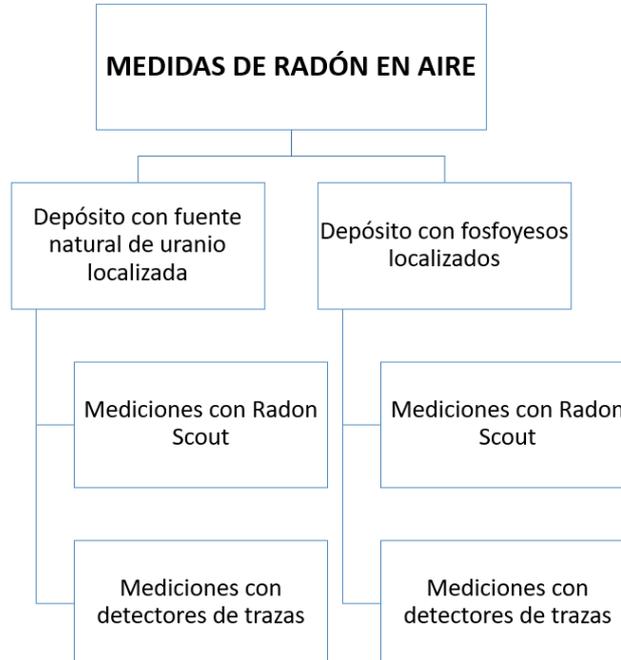


**Figura 27.** Placas petris de fosfoyesos para su caracterización.

La caracterización de los fosfoyesos se realizó en un detector de germanio con módulo analizador digital de espectros, blindaje y software, en concreto el detector de germanio marca Canberra, modelo BEGE3830 7500SL en configuración vertical, módulo analizador digital de espectros marca Canberra modelo DSA-LX, blindaje de hierro de baja actividad y Genie™ 2000 Software. Las medidas que se han llevado a cabo han sido de 10 minutos.

#### 4.4. Ensayos de Radón en aire

En el siguiente apartado se explican los ensayos que se han realizado en las mediciones de radón presente en aire. A continuación, se muestra en la **Figura 28** un esquema de los ensayos realizados.



**Figura 28.** Esquema de las mediciones de radón en aire.

#### 4.4.1. Descripción del sistema experimental

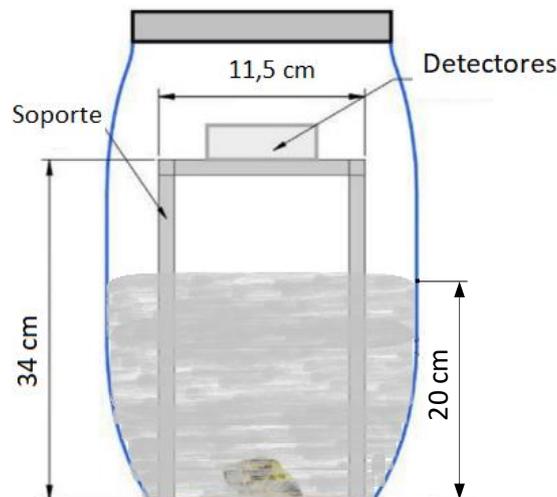
En los ensayos de medida de radón en aire se han elegido como equipos de medición los detectores de trazas y el Radon Scout. Para llevar a cabo esta serie de ensayos, se ha utilizado tanto la fuente natural de uranio como los fosfoyesos, ambos situados en la parte inferior del bidón.

Todos los ensayos que se han realizado se han llevado a cabo en el bidón detallado en el apartado 4.1., en el interior del cual se ha utilizado como equipo auxiliar un soporte metálico para poder mantener en el interior de este los equipos de medida, tal y como se muestra en la **Figura 29**.



**Figura 29.** Soporte metálico utilizado en los ensayos de medición de radón en el aire.

Las arenas que se han expuesto en el apartado anterior fueron depositadas en el bidón hasta una altura interior de 20cm en todos los ensayos. A continuación, en la **Figura 30** se muestra un esquema del montaje experimental adaptado de trabajos anteriores del grupo de investigación (A. Noverques et al., 2020).



**Figura 30.** Montaje experimental de los ensayos de medición de radón en aire

El Radon Scout se ha utilizado en todos los ensayos y se ha colocado en la parte superior del bidón apoyado en el soporte metálico para poder tener una cámara de aire entre la arena y la tapa del bidón y de esta forma obtener las mediciones de radón en el aire. El Radon Scout se ha purgado entre cada uno de los ensayos para obtener menos errores en las mediciones.

En cada ensayo, se han utilizado tres detectores de trazas posicionados en la parte superior del Radon Scout, todo ello dentro del bidón con cierre de ballesta, tal y como se observa en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Detectores de trazas dispuestos para medir.

Una vez pasado el tiempo de medida, se retiraban las cámaras de trazas y se guardaban de forma hermética hasta su posterior revelado. El revelado se lleva a cabo tal y como se ha indicado en el apartado 4.3.5.

En cuanto al tiempo de medida de los ensayos de radón en aire, se ha variado para poder ver la comparativa entre los métodos de medida utilizados. En primer lugar, los ensayos se realizaron de 5 días, pues el radón se acumulaba en el interior del bidón. Dado que se obtuvieron trazas saturadas una vez reveladas, se disminuyó posteriormente el tiempo de medida a 3 días. También se ha realizado un ensayo de 1 día para que el ajuste y la validación fueran más exactos.

#### *4.4.2. Estudio de la influencia del tamaño de partícula*

Las arenas que se han mostrado en el apartado 4.2.1 son las que se han utilizado como medio sólido en los ensayos de medición de radón en aire para comprobar la influencia del tamaño de partícula en dichos ensayos. Las dos arenas, tanto la de 0-0,7mm como la de 2,2-8 mm, se han utilizado de igual manera en cada uno de los ensayos.

Para estudiar la influencia del tamaño de partícula se compararon los resultados de los ensayos de medición de radón en aire obtenidos por los detectores de trazas y Radon Scout.

En cuanto a la caracterización de las arenas se realizó en el estado inicial y después de cada ensayo. Se utilizó el detector de yoduro sódico para la detección de descendientes de radón, y de este modo comprobar si las arenas contenían inicialmente algún radionucleido y si después de cada ensayo habían adsorbido algún descendiente del radón. Para ello se introducían en el detector con viales tapados de polietileno de un espesor de 10 micras, tal y como se muestra en la **Figura 32**, para reproducir siempre la misma geometría en los ensayos y evitar que el detector se contamine.



**Figura 32.** Viales con arena para su análisis en el detector de yoduro.

#### *4.4.3. Estudio de la influencia de la humedad*

Para poder estudiar la influencia de la humedad se hicieron dos estudios. En primer lugar, se secó la arena tal y como se recibió. Para ello, se utilizó una estufa a 110°C y la arena fue puesta en crisoles de vidrio, tal y como se muestra en la **Figura 33**, para su secado y su posterior análisis.



**Figura 33.** Estufa con arena para el secado de esta.

A continuación, se introdujeron las arenas secas dentro del bidón para los ensayos de radón en aire. Al finalizar dichos ensayos, una muestra de cada arena se caracterizó en el detector de yoduro sódico para comprobar si las arenas adsorbían radón, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

En segundo lugar, se realizó un segundo estudio para valorar la influencia de la humedad. En este caso se realizó un estudio a pequeña escala para determinar la cantidad de agua máxima a añadir a las arenas, con el criterio de que no se formaran fases diferentes en el medio.

Para llevar a cabo el estudio, se enrasó la arena a 100mL en un vaso de precipitados de 250mL, teniendo en cuenta también la masa. Posteriormente, se fueron añadiendo tandas de 25mL de agua en cada muestra, se removió la mezcla y se dejó en reposo 5 min para observar el estado de cada arena con el agua añadida.

De igual manera que se ha comentado antes, después de este estudio, también se caracterizó en el detector de yoduro sódico una muestra de cada tipo de arena.

A partir de este estudio, se determinó la cantidad de agua a añadir a las arenas en el bidón de plástico, para llevar a cabo los ensayos de influencia de la humedad. Estos ensayos se realizaron de acuerdo con el procedimiento descrito para los ensayos de radón en aire (apartado 4.4.), para los dos tipos de arena. Esta relación se hizo teniendo en cuenta la masa de arena y de agua.

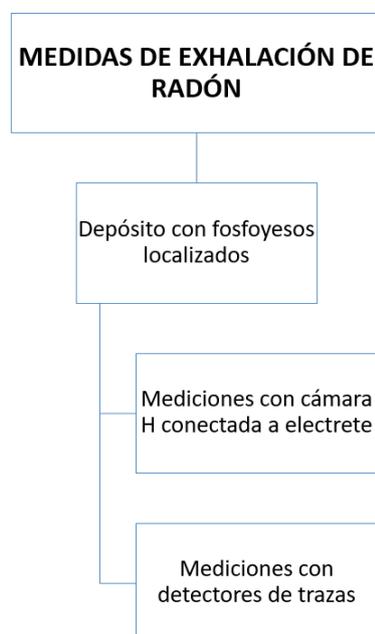
#### 4.4.4. Ensayos de verificación de los detectores de trazas

Para la validación de trazas, se han realizado todos los ensayos mencionados anteriormente poniendo tres detectores de trazas para poder validar que ambas técnicas de medida en cada uno de los ensayos son comparables. Los detectores de trazas se han colocado en todos los ensayos en la parte superior del Radon Scout, dentro del bidón.

Para comparar ambos resultados, tal y como se explicará en el apartado correspondiente a los resultados, se ha realizado el cálculo del área acumulada de los datos proporcionados por el Radon Scout y se han comparado con los obtenidos en los detectores de trazas después de su revelado. Este cálculo se debe a que los detectores pasivos, en este caso los detectores de trazas son técnicas que proporcionan el valor de la medida acumulado en el tiempo, sin embargo, el Radon Scout es un detector que proporciona un registro continuo de datos, por este motivo se realizará el cálculo del área acumulada para la comparación de ambas metodologías.

#### 4.5. Ensayos de exhalación de radón

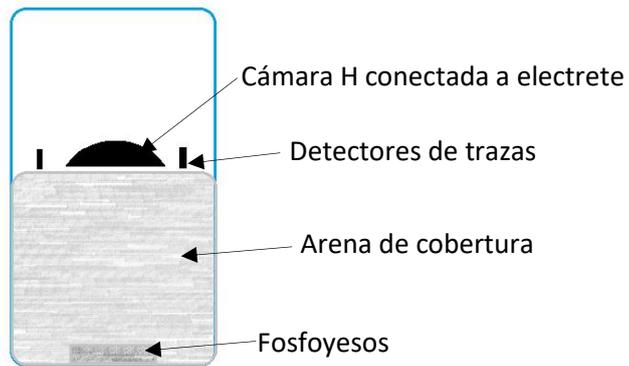
En este apartado se explican los ensayos que se han realizado en las mediciones de exhalación de radón. A continuación, se muestra en la **Figura 34** un esquema de los ensayos realizados.



**Figura 34.** Esquema de las mediciones de exhalación de radón.

#### 4.5.1. Descripción del sistema experimental

En el presente estudio, se ha utilizado la cámara H conectada a electrete y los detectores de trazas para la validación de la metodología. De la misma forma que anteriormente, se ha cubierto hasta la altura considera de estudio de los dos tipos de arena, posteriormente se ha introducido la cámara H conectada al electrete y tres detectores de trazas para poder comparar y verificar la metodología, tal y como se muestra en la **Figura 35** el esquema del montaje experimental.



**Figura 35.**Esquema del montaje experimental de los ensayos de exhalación de radón.

En este caso se ha utilizado como fuente fosfoyesos, posicionados en la parte inferior del bidón tal y como se muestra en la **Figura 36**. El bidón que se ha utilizado es el comentado en los apartados anteriores.



**Figura 36.**Fosfoyesos situados en la parte inferior del bidón.

A continuación, en la **Figura 37**, se muestra el montaje experimental realizado para cada tipo de arena.



**Figura 37.** Montaje experimental de los ensayos de radón exhalado para cada tipo de arena.

#### 4.5.2. Ensayos de verificación de los detectores de trazas

Se ha utilizado la cámara H conectada al electrete de tipo *long term* cuyo voltaje se midió en el medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage antes y después de cada exposición de 6 horas. Con la hoja de Excel que aporta el proveedor de los electretes se calcula la concentración de radón expresada en Bq/m<sup>3</sup> tal y como se observa en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la concentración de gas radón.

HLT E-PERM Template for Calculating Radon Concentration										
Electret#	Start Test	Finish Test	Days	Gamma nGy/Hr	IV	FV	CF	Radon Bq/m3	(+/-) Bq/m3	Error %
LX5212	23/06/21 10:05	23/06/21 16:05	0,25	87,0	733	726	0,8690	1163	240	21
LX5212	13/07/21 11:00	13/07/21 17:00	0,25	87,0	717	716	0,8643	142	199	140
							Avg. RnC	653	RPD	156%

Una vez se obtienen los resultados de la concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup>, se calcula la concentración de radón exhalado según la Ec. 1.

$$E = \frac{V \cdot \lambda \cdot (C_{Rn} - C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t})}{S \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})} \quad \text{Ec.1}$$

Siendo V el volumen de la cámara (m<sup>3</sup>), λ la constante de desintegración del radón (h<sup>-1</sup>), C<sub>Rn</sub> la concentración final de radón (Bq/m<sup>3</sup>), C<sub>0</sub> la concentración inicial de radón (Bq/m<sup>3</sup>), S la superficie de la cámara (m<sup>2</sup>) y t el tiempo de exposición (h).

El valor de la concentración C<sub>Rn</sub> se calcula como el doble de la concentración obtenida a partir de la de descarga del electrete, debido a que en la ecuación se utiliza como concentración el valor final, mientras que en la obtenida a través de la descarga del electrete es la concentración media para el tiempo de medición. Se calculará teniendo en cuenta la Ec. 2.

$$C_{Rn} = 2 \cdot C_{Rn} \text{ dada por fabricante}$$

Ec. 2

Las dimensiones correspondientes a la cámara H se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Dimensiones cámara H.

<b>Diámetro (m)</b>	0,153
<b>S cámara (m<sup>2</sup>)</b>	0,018
<b>V cámara (m<sup>3</sup>)</b>	9,38E-04
<b><math>\lambda</math> (h<sup>-1</sup>)</b>	7,56E-03

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos anteriormente explicados.

### 5.1. Caracterización de fuentes

En este punto se va a exponer la caracterización de las dos fuentes utilizadas en los ensayos, en primer lugar, la pechblenda caracterizada por espectrometría gamma con el detector de yoduro sódico y a continuación, los fosfoyesos caracterizados con el detector de germanio.

#### 5.1.1. Pechblenda

Tal y como se ha comentado a lo largo del trabajo, la fuente natural de uranio se caracterizó con el detector de yoduro sódico, de esta forma se obtuvo un espectro continuo que se muestra en la **Figura 38**.



**Figura 38.** Espectro de la fuente natural de  $^{238}\text{U}$  utilizada en los ensayos de medición de radón en aire.

En el espectro se obtienen como regiones de interés las áreas de los descendientes del  $\text{U}^{238}$ ,  $\text{Pb}^{214}$  y  $\text{Bi}^{214}$ , emisiones gamma. Los valores de dichas áreas (en cuentas por segundo, cps) y la incertidumbre de la misma en porcentaje, se muestran en la **Tabla 4**, junto con la masa de la fuente.

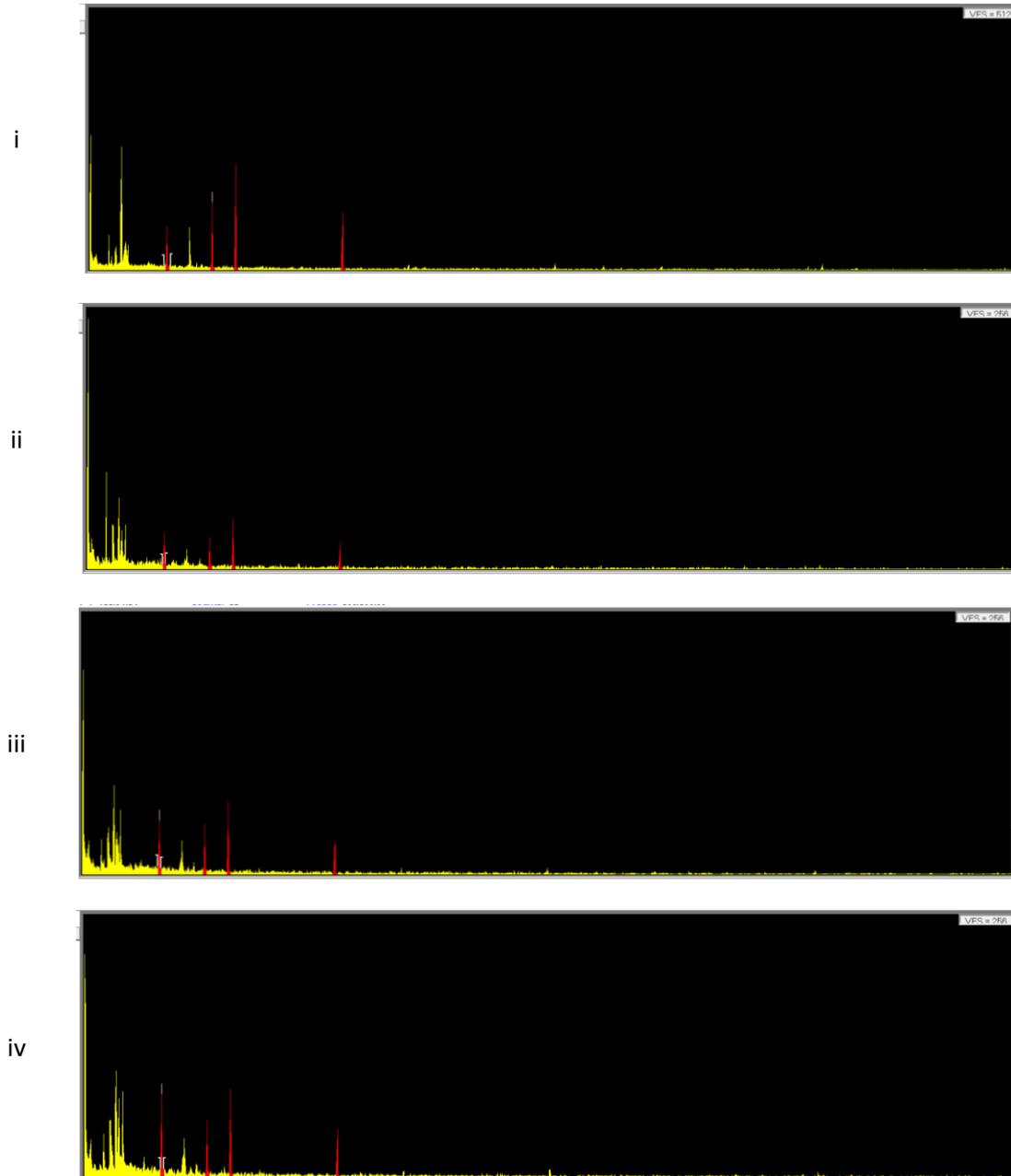
**Tabla 4.** Caracterización de la fuente natural de uranio.

Fuente natural de uranio			
Masa (g)	13,9		
Área $\text{Pb}^{214}$ (cps)	1,17E+08	±	0,02%
Área $\text{Bi}^{214}$ (cps)	4,32E+07	±	0,02%

Con este espectro y una calibración adecuada del equipo se ha podido conocer la actividad de esta fuente, que resulta ser de 1,83 kBq (alrededor de 50 microCi) aproximadamente.

### 5.1.2. Fosfoyesos

La caracterización de los fosfoyesos se llevó a cabo mediante el detector de germanio. Para este caso se introdujeron las 5 muestras de fosfoyesos, tal y como se ha explicado en el apartado 4.3.2, obteniéndose 5 espectros diferentes que se muestran en la **Figura 39**.





**Figura 39.** Espectros de los fosforesos utilizados como fuente en los diferentes ensayos.

A continuación, se muestra en la **Tabla 5** el valor de las regiones de interés de cada uno de los espectros anteriores.

**Tabla 5.** Áreas de las regiones de interés de los espectros de los fosforesos.

Espectro	Áreas (cps)					
	$Pb^{214}$		$Pb^{214}$		$Bi^{214}$	
	295,21 keV		351,92 keV		609,31 keV	
i	2,77E+02	± 6,83%	4,57E+02	± 4,91%	2,71E+02	± 6,47%
ii	5,60E+01	± 17,64%	1,09E+02	± 10,60%	5,80E+01	± 14,92%
iii	5,80E+01	± 19,74%	1,77E+02	± 8,02%	9,80E+01	± 10,24%
iv	1,02E+02	± 12,05%	2,21E+02	± 7,13%	1,33E+02	± 8,92%
v	1,24E+02	± 11,05%	2,22E+02	± 7,15%	9,30E+01	± 11,91%

De todas las muestras analizadas, se puede observar en la **Tabla 5**, como las correspondientes a la muestra 1, tomadas del residuo interior de una tubería por la que circulaban los fosforesos cuando la empresa estaba en activo, son las que más cantidad de radionucleidos presenta.

En la **Tabla 5** todos los valores que se observan presentan un orden de magnitud similar. Con estos datos de áreas y la calibración en eficiencia del detector para una fuente patrón con la misma geometría que las petris en las que se han colocado los fosforesos, se puede obtener la actividad por unidad de masa de cada muestra medida. Este procedimiento se realizó siguiendo la metodología propuesta en artículos de cálculos de eficiencia (*Gamma-Ray Efficiency Calibration*, n.d.) y se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 6** para los fosforesos.

**Tabla 6.** Composición isotópica de los residuos utilizados

	$Pb^{214}$ (Bq/kg)	$Bi^{214}$ (Bq/kg)
i)	3,73E+03	3,63E+03
ii)	8,90E+02	7,74E+02
iii)	1,44E+03	1,31E+03
iv)	1,80E+03	1,79E+03
v)	1,81E+03	1,25E+03

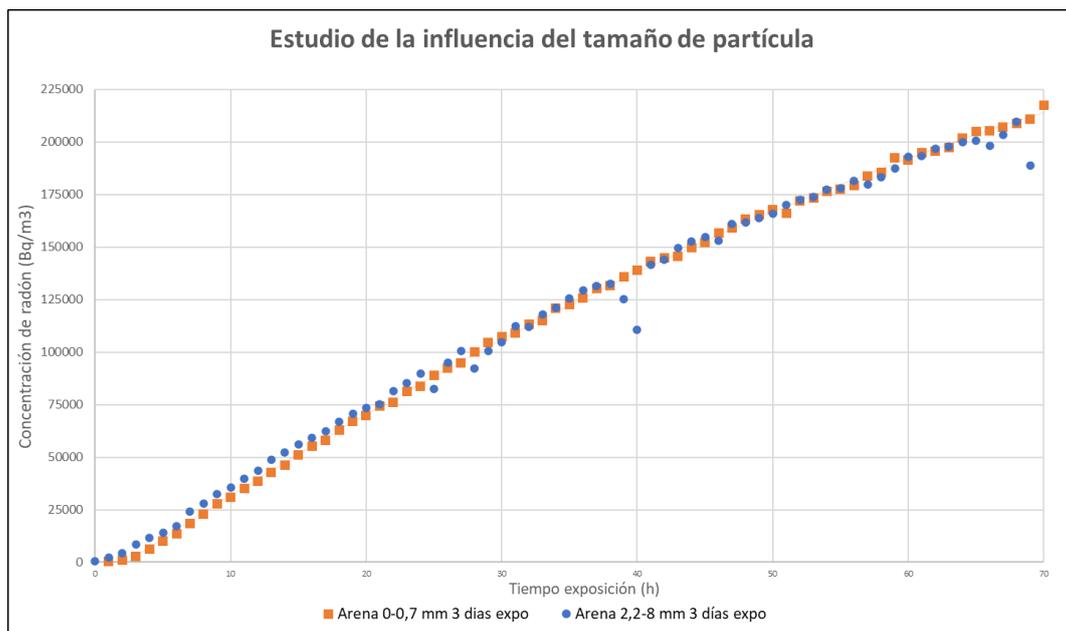
Estos residuos contienen radioisótopos naturales entre los que cabría destacar los propios de las cadenas de desintegración del  $U^{238}$  y  $Th^{232}$ . Los análisis radiológicos realizados mediante espectrometría gamma en detector de germanio sobre las diferentes muestras recogidas in-situ, evidencian una concentración de radioisótopos naturales descendientes del  $U^{238}$  tal y como se puede apreciar en la **Tabla 6**, aunque el contenido de radioisótopos en este caso es insignificante.

## 5.2. Resultados de los ensayos de radón en aire

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos por los detectores de trazas y los obtenidos por el Radon Scout en la medida de concentración de radón en aire, aplicados en el análisis de la influencia del tamaño de partícula y de la humedad, así como en la verificación de la metodología de trazas.

### 5.2.1. Influencia del tamaño de partícula

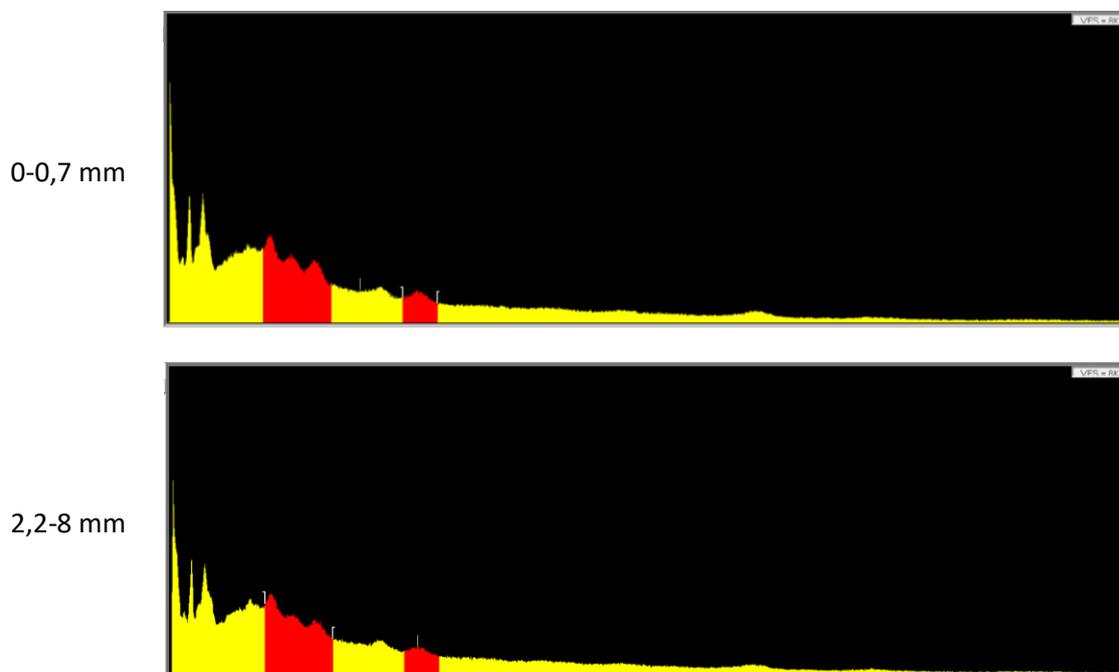
Para estudiar la influencia del tamaño de partícula de las arenas que actúan como sustrato cubriendo la fuente, se representan los datos obtenidos con el Radon Scout para los dos tipos de arena. En la **Figura 40** se muestra la representación gráfica de este estudio.



**Figura 40.** Representación de la influencia del tamaño de partícula.

Como se puede observar, en el ensayo de medición de radón en aire el tamaño de partícula no influye en la concentración de radón en el aire, tal y como se había concluido en experiencias similares (Hosoda et al., 2009), realizadas con otros tamaños de partícula diferentes a los ensayados en este TFM.

Para confirmar que las arenas no hacían papel de barrera se caracterizaron con el detector de yoduro y se comprobó que no adsorbían una cantidad de radón significativa después de su exposición. A continuación, se muestran en la **Figura 41** los dos espectros correspondientes obtenidos después del ensayo para cada tipo de arena.



**Figura 41.** Espectros de los dos tipos de arenas después del ensayo.

En el espectro se obtienen como regiones de interés las áreas de los descendientes del  $U^{238}$ ,  $Pb^{214}$  y  $Bi^{214}$ , emisiones gamma, las cuales se muestran en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Áreas de las regiones de interés de los espectros de estudio de la influencia del tamaño de partícula.

Muestra	Área $Pb^{214}$ (cps)	Área $Bi^{214}$ (cps)	Área total (cps)
Fondo	5,45E+03 ± 9,56%	1,82E+03 ± 10,45%	7,27E+03 ± 20,01%
0-0,7 mm (inicial)	7,12E+03 ± 8,12%	2,58E+03 ± 8,24%	9,70E+03 ± 16,36%
0-0,7 mm (después exposición)	8,44E+03 ± 6,95%	3,46E+03 ± 6,30%	1,19E+04 ± 13,25%
Diferencia 0-0,7 mm	1,32E+03 ± 1,17%	8,80E+02 ± 1,94%	2,20E+03 ± 3,11%
2,2-8 mm (inicial)	7,07E+03 ± 8,23%	3,36E+03 ± 6,35%	1,04E+04 ± 14,58%
2,2-8 mm (después exposición)	1,08E+04 ± 5,37%	3,43E+03 ± 6,26%	1,42E+04 ± 11,63%
Diferencia 2,2-8 mm	3,73E+03 ± 2,86%	7,00E+01 ± 0,09%	3,80E+03 ± 2,95%

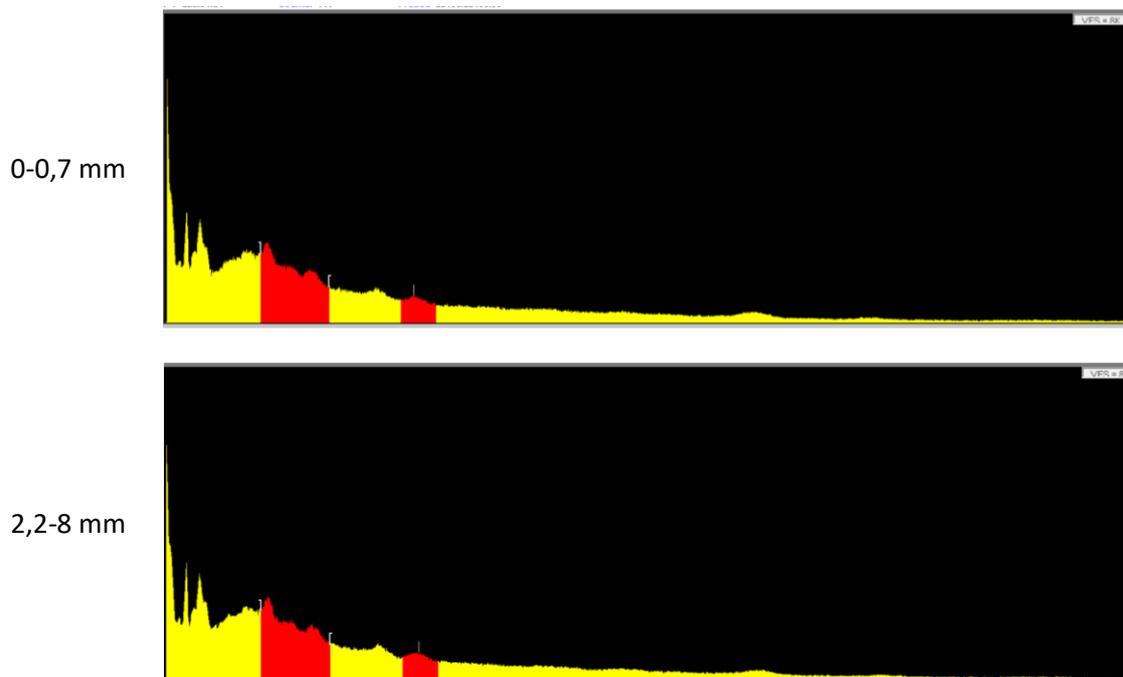
Tal y como se puede observar, los valores que se obtienen en referencia a los dos descendientes que se miden en ambas arenas son prácticamente iguales antes y después de la exposición. Por tanto, se comprueba que las arenas no absorben radón durante la exposición ya que se obtienen resultados muy similares y la diferencia entre ambas medidas es insignificante, teniendo en cuenta el valor que proporciona el fondo (medición del detector vacío con las mismas condiciones con las que se midieron las muestras de arena). Al mismo tiempo, también se

observa un àrea total para ambas arenas igual, de esta forma queda demostrado que el tamaño de partícula en este tipo de ensayos no influye.

### 5.2.2. Influencia de la humedad

En primer lugar, se van a mostrar los resultados que se han obtenido después de la caracterización inicial de las arenas, es decir tal y como se recibieron, y posteriormente, la comparación de estos con la caracterización de los obtenidos después del secado de la arena y su exposición a la fuente natural de uranio durante 3 días.

A continuación, se muestran en la **Figura 42**, los espectros de los dos tipos de arena obtenidos en la caracterización de estas tal y como se recibieron.



**Figura 42.** Espectros de los dos tipos de arenas tal y como se recibieron.

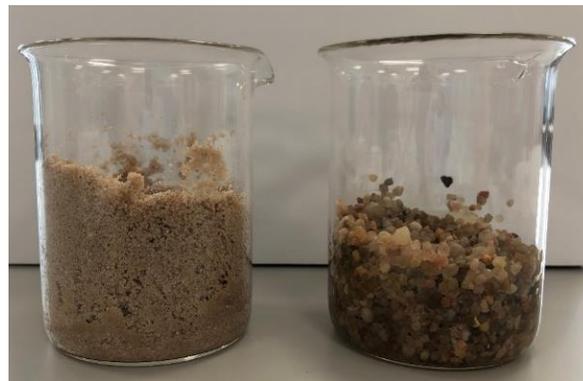
Los valores de las áreas de los espectros que se muestran en la **Figura 42**, se utilizarán para comparar los resultados de los distintos estados de la arena (después exposición, mojada y después del secado).

Las arenas inicialmente recibidas contenían una humedad del 4% aproximadamente, por este motivo se secaron y se expusieron a la fuente natural de  $U^{238}$ , el segundo ensayo que se hizo fue mojar las arenas tal y como se ha explicado en la metodología para ver como influía la humedad en la concentración de radón.

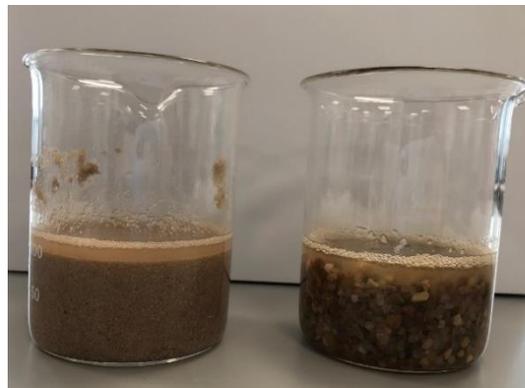
A continuación, se van a exponer los resultados obtenidos después de llevar a cabo el estudio de humedad a pequeña escala tal y como se ha explicado en el apartado 4.4.3. En la **Figura 43**, **Figura 44** y **Figura 45**, se muestra el cambio de las arenas después de la adición del agua correspondiente.



**Figura 43.** Estado inicial



**Figura 44.** Arenas con 25mL después de 5 min



**Figura 45.** Arenas con 50mL después de 5 min

Después de valorar estos resultados, como el cambio de aspecto visual de las arenas entre 25mL y 50mL era muy grande, se hizo el mismo procedimiento añadiendo tandas de 10mL en lugar de 25mL. En la **Figura 46**, **Figura 47** y **Figura 48** se muestran las imágenes de las arenas con estos nuevos volúmenes.



**Figura 46.** Arenas con 10mL después de 5 min



**Figura 47.** Arenas con 20mL después de 5 min



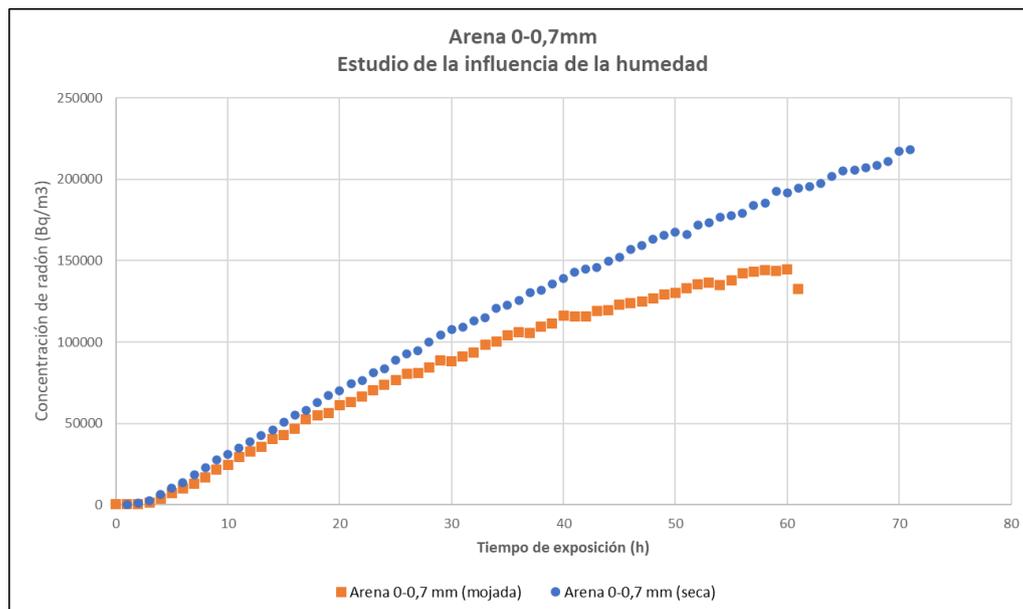
**Figura 48.** Arenas con 30mL después de 5 min

Después de realizar este estudio, se decide utilizar la proporción de 15mL de agua para trasladar proporcionalmente el porcentaje de humedad correspondiente, al volumen de arena introducido en el bidón de los ensayos. A continuación, se muestra en la **Figura 49** el estado de las arenas antes de ponerlas en el bidón para su estudio.

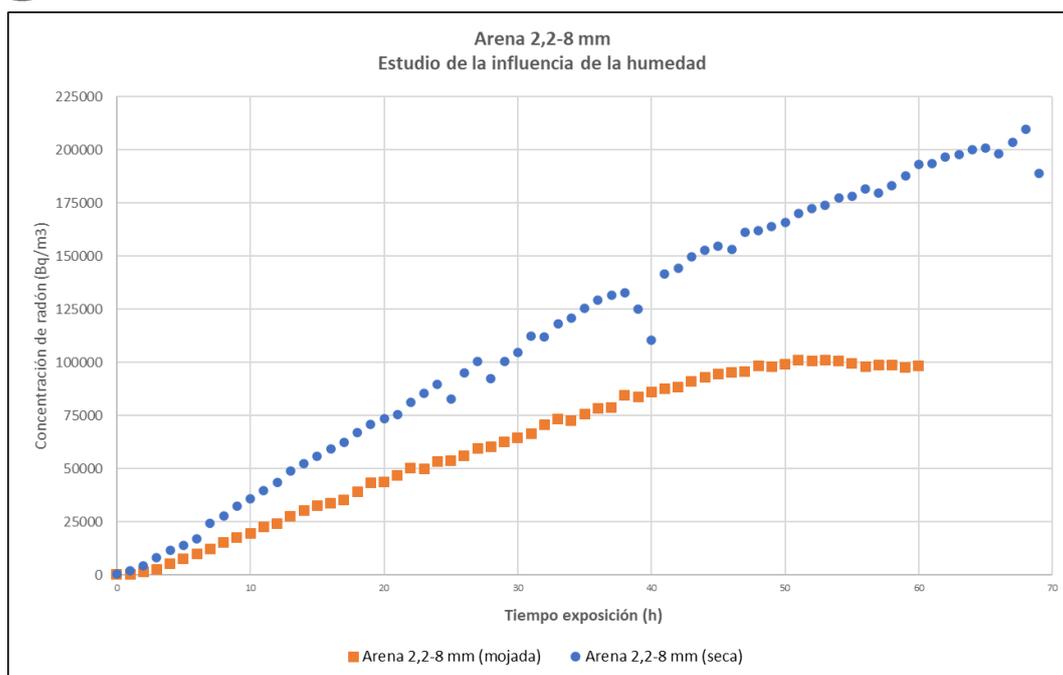


**Figura 49.** Arenas en el estado inicial en el estudio de la influencia de la humedad.

Para estudiar la influencia de la humedad, se representan los datos obtenidos con el Radon Scout para los dos tipos de arena. En la **Figura 50** y en la **Figura 51** se muestran las representaciones gráficas de este estudio para cada tipo de arena, comparando los datos obtenidos en el primer ensayo, donde la arena estaba previamente secada en la estufa antes de su exposición, con los del ensayo de humedad, en el que la arena se encuentra previamente mojada antes de su exposición. De esta manera se podrá comprobar la influencia de la humedad para cada tamaño de partícula.



**Figura 50.** Representación de la influencia de la humedad para la arena de 0-0,7 mm.



**Figura 51.** Representación de la influencia de la humedad para la arena de 2,2-8 mm.

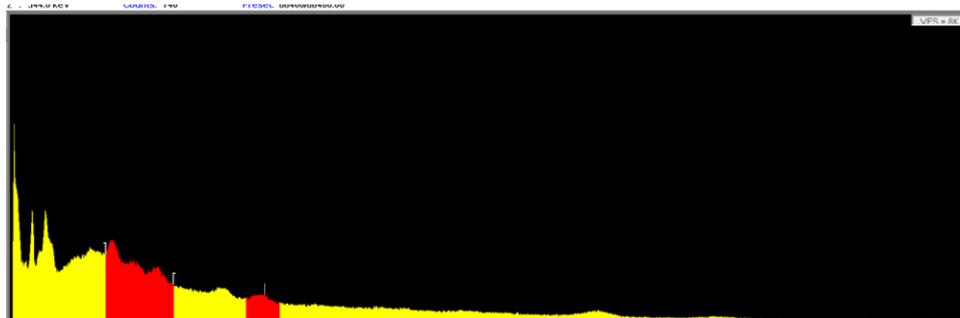
Como se puede comprobar, en el ensayo de medición de radón en aire la humedad sí que afecta. Tal y como se ha explicado en la introducción, el grado de saturación tiene influencia en el movimiento del gas radón.

Se observa en las dos representaciones la influencia de la humedad para los dos tamaños de partículas, en ambos casos la concentración de radón disminuye cuando la humedad aumenta, este hecho corrobora lo mencionado en la introducción sobre que el grado de saturación del agua puede tener un efecto protector al radón.

También se puede comprobar que la influencia de la humedad es más significativa en el caso de la arena con mayor tamaño de partícula porque el agua se adsorbe de manera menos homogénea y se producen zonas con alto contenido de agua, que retienen más el paso del radón. En el caso de la arena con menor tamaño de partícula, el agua se adsorbe de manera más homogénea.

De igual forma que anteriormente, para confirmar que las arenas no adsorbían radón después de su exposición, se caracterizaron después del ensayo de la influencia de la humedad en el detector de yoduro sódico, pero en este caso solo se hizo para la arena con tamaño de partícula de 0-0,7 mm. A continuación, se muestra en la **Figura 50** el espectro correspondiente obtenido después del ensayo.

0-0,7 mm



**Figura 52.** Espectro después del segundo ensayo de influencia de la humedad para la arena de 0-0,7 mm de tamaño de partícula.

En la **Tabla 8**, se muestran los valores de las regiones de interés de los descendientes del  $U^{238}$ ,  $Pb^{214}$  y  $Bi^{214}$ , emisiones gamma y estos se comparan con los obtenidos para el mismo tamaño de partícula del estado inicial de la arena.

**Tabla 8.** Áreas de las regiones de interés de los espectros del segundo estudio de la influencia de la humedad.

Muestra	Área $Pb^{214}$ (cps)	Área $Bi^{214}$ (cps)	Área total (cps)
Fondo	5,45E+03 ± 9,56%	1,82E+03 ± 10,45%	7,27E+03 ± 20,01%
<b>0-0,7 mm (ensayo humedad)</b>	<b>1,06E+04 ± 5,49%</b>	<b>2,73E+03 ± 7,83%</b>	<b>1,34E+04 ± 13,32%</b>
<b>0-0,7 mm (inicial)</b>	<b>7,12E+03 ± 8,12%</b>	<b>2,58E+03 ± 8,24%</b>	<b>9,70E+03 ± 16,36%</b>
<b>0-0,7 mm (seca)</b>	<b>9,78E+03 ± 5,91%</b>	<b>2,15E+03 ± 5,91%</b>	<b>1,19E+04 ± 11,82%</b>

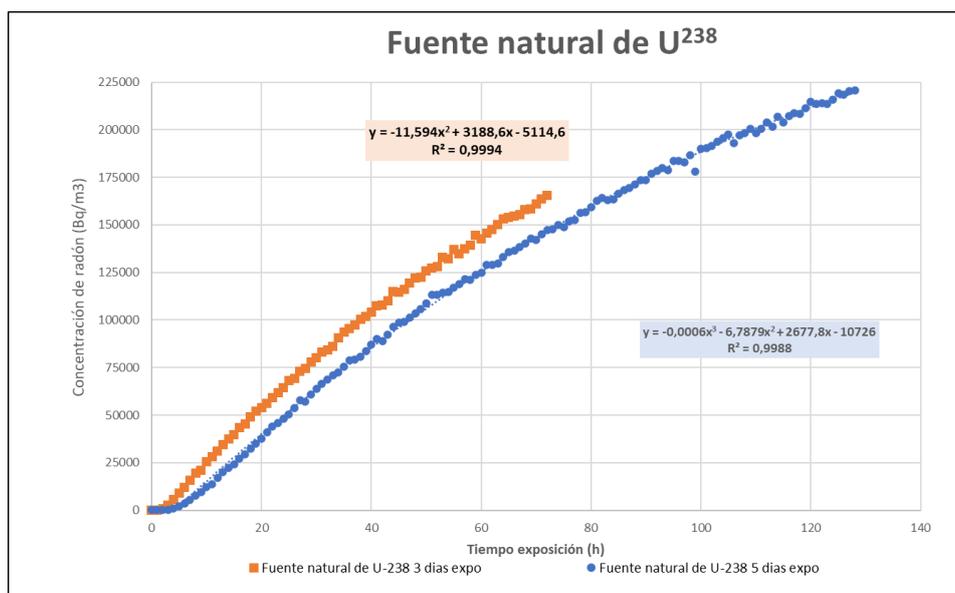
Tal y como se puede comprobar en la **Tabla 8**, los valores que se obtienen en cuanto a áreas totales son muy similares entre ellos y presentan un orden de magnitud similar, esto se debe a que las arenas no adsorben radón. Cabe destacar que el valor medido de la arena después del ensayo de humedad es más elevado, aunque muy poco significativo.

### 5.2.3. Verificación de los detectores de trazas

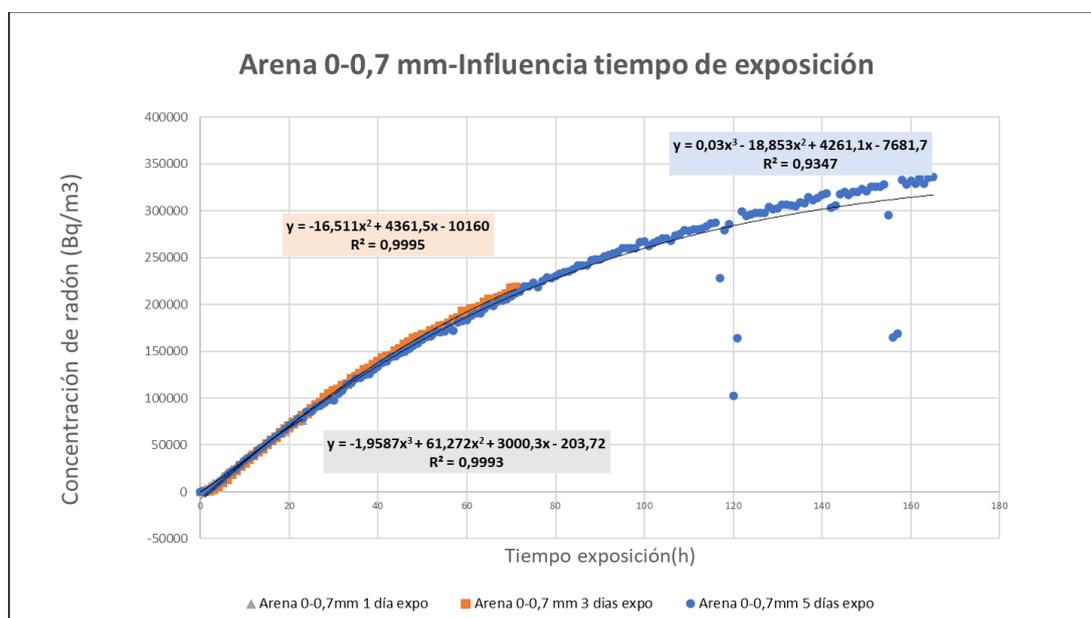
Para la verificación de trazas en los ensayos de radón en aire se ha llevado a cabo la comparación entre el cálculo del área acumulada de los datos proporcionados por el Radon Scout y los datos proporcionados de los detectores de trazas después de su revelado.

En este apartado se van a tener en cuenta todos los ensayos realizados tanto los ya comentados en los apartados anteriores como los ensayos con fosforesos y con diferente tiempo de medida para ver la influencia de estos parámetros en la verificación y la comparación de ambas técnicas.

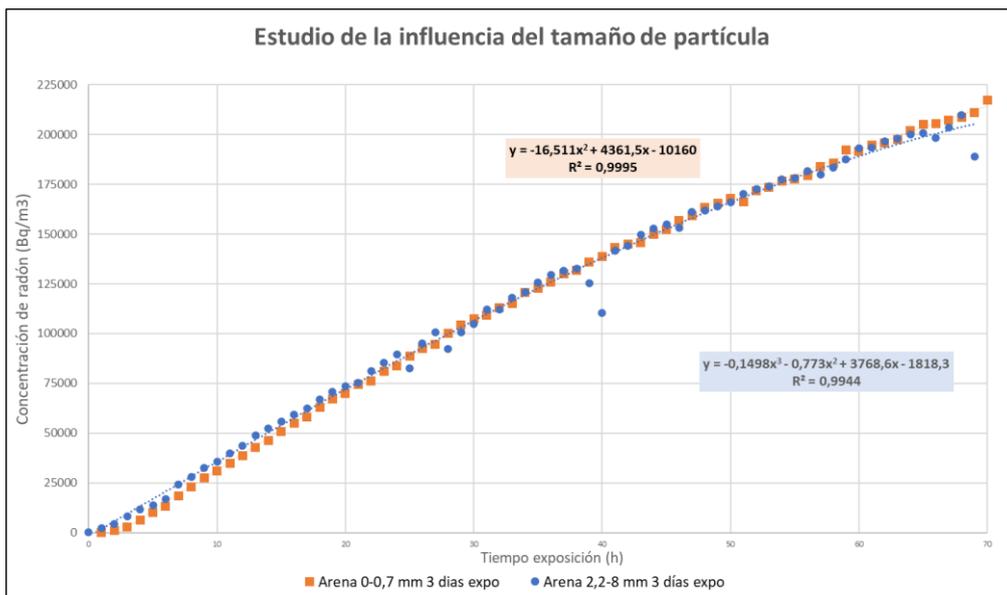
A continuación, se muestra en la **Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57 y Figura 58** todas las representaciones gráficas y el ajuste de estas curvas de las que se ha hecho uso para el cálculo del área acumulada, estos datos son los proporcionados por el Radon Scout.



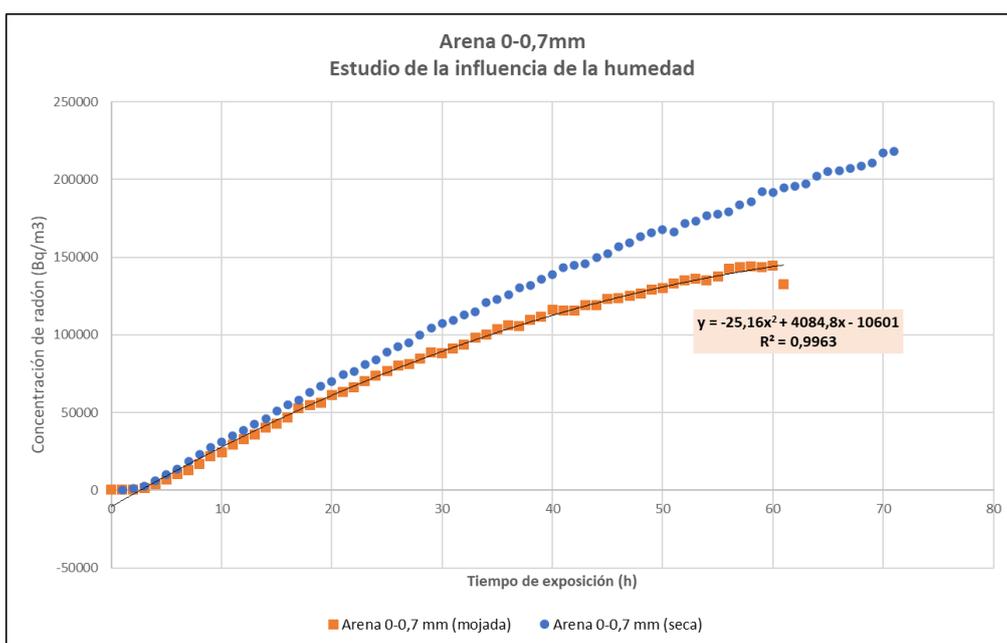
**Figura 53.** Representación gráfica del ensayo de la fuente natural de U<sup>238</sup> para los dos tiempos de exposición.



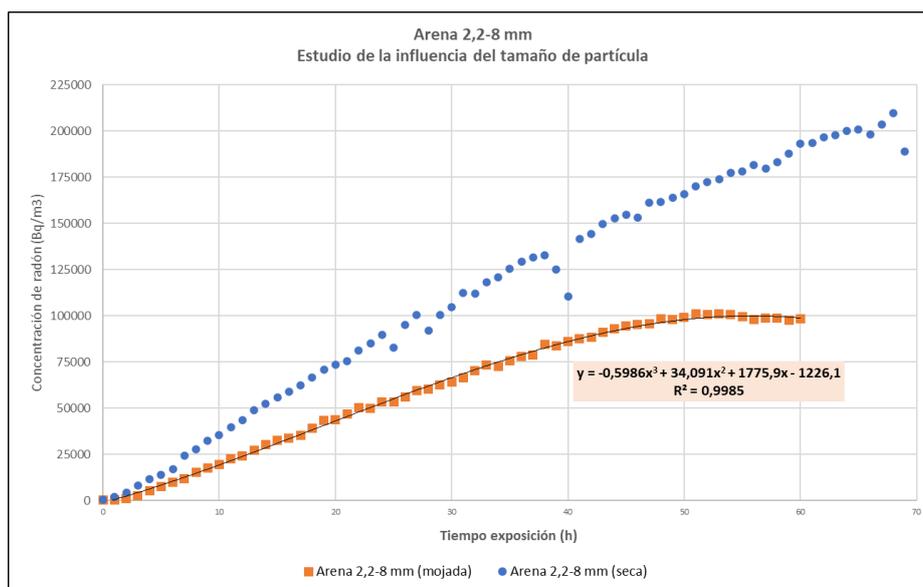
**Figura 54.** Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 0-0,7mm expuesta a la fuente natural de U<sup>238</sup> para los distintos tiempos de exposición.



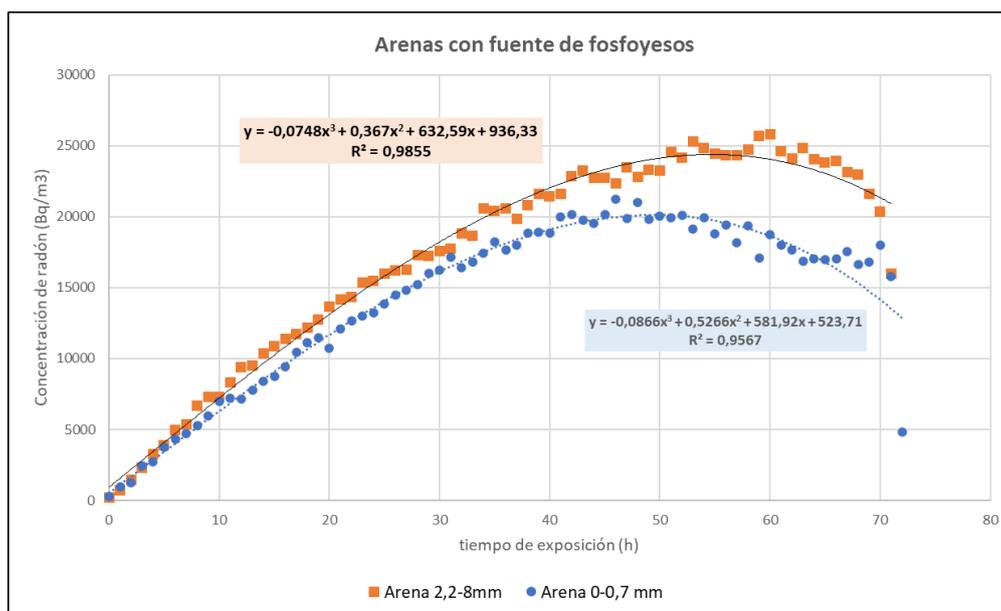
**Figura 55.** Representación gráfica del ensayo de influencia del tamaño de partícula donde las arenas han sido expuestas a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días.



**Figura 56.** Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 0-0,7 mm expuesta a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días en el estudio de la influencia de la humedad.



**Figura 57.** Representación gráfica del ensayo de arena de tamaño de partícula de 2,2-8 mm expuesta a la fuente natural de  $U^{238}$  para un tiempo de exposición de 3 días en el estudio de la influencia de la humedad.



**Figura 58.** Representación gráfica del ensayo de los dos tipos de arena expuesta a fosfoyesos durante 3 días.

En la **Figura 58** se observa un comportamiento diferente con respecto a las representaciones gráficas donde la fuente es  $U^{238}$ . Ya que las curvas de la **Figura 58** alcanzan un máximo y luego vuelven a disminuir la concentración, esto se debe a que la actividad de los fosfoyesos no es muy alta y llega a un momento en el que *decay* empieza a ser más importante que el aporte de radón de los propios fosfoyesos.

A continuación, se muestra en la **Tabla 9**, la concentración de radón que se ha obtenido directamente del promedio de la concentración proporcionada por los tres detectores de trazas colocados en cada ensayo y la desviación típica entre este promedio.

**Tabla 9.** Concentración promedio y desviación típica para los detectores de trazas.

Ensayo	Tiempo de exposición (días)	$C_{Rn\ PROM}$ (Bq/m <sup>3</sup> )		
Fuente natural de U <sup>238</sup>	5	4,54E+04	±	2,36E+02
Fuente natural de U <sup>238</sup>	3	7,13E+04	±	1,63E+03
Arena 0-0,7 mm	5	4,24E+04	±	4,90E+02
Arena 0-0,7 mm (seca)	3	8,77E+04	±	2,59E+03
Arena 0-0,7 mm	1	3,42E+04	±	3,86E+03
Arena 0-0,7 mm (mojada)	3	7,71E+04	±	2,68E+03
Arena 2,2-8 mm (seca)	3	8,62E+04	±	6,03E+02
Arena 2,2-8 mm (mojada)	3	5,71E+04	±	1,68E+03
Arena 0-0,7 mm con fosfoyesos	3	1,52E+04	±	4,92E+02
Arena 2,2-8 mm con fosfoyesos	3	1,71E+04	±	1,10E+03

Para poder obtener la concentración durante el tiempo de medida, y de esta manera comparar con los resultados obtenidos con los detectores de trazas, se realizó la integral de las curvas ajustadas mostradas en las figuras anteriores. En la **Tabla 10**, se exponen los resultados obtenidos a partir de dichas integrales junto con los resultados promedio de las trazas, y el error relativo entre ambas técnicas y el error relativo entre ambas técnicas.

**Tabla 10.** Resultados de los diferentes ensayos para ambas técnicas.

Ensayo	Tiempo de exposición (días)	Radon Scout		Detectores de trazas	
		Área (Bqh/m <sup>3</sup> )	Área/tiempo (Bq/m <sup>3</sup> )	C <sub>Rn PROM</sub> (Bq/m <sup>3</sup> )	Error relativo (%)
Fuente natural de U <sup>238</sup>	5	1,58E+07	1,23E+05	4,54E+04	63,09
Fuente natural de U <sup>238</sup>	3	6,45E+06	8,96E+04	7,13E+04	20,42
Arena 0-0,7 mm	5	3,41E+07	2,06E+05	4,24E+04	79,42
Arena 0-0,7 mm (seca)	3	8,31E+06	1,19E+05	8,77E+04	26,30
Arena 0-0,7 mm	1	9,00E+05	3,92E+04	3,42E+04	12,76
Arena 0-0,7 mm (mojada)	3	4,91E+06	8,18E+04	7,71E+04	5,75
Arena 2,2-8 mm (seca)	3	7,91E+06	1,15E+05	8,62E+04	25,04
Arena 2,2-8 mm (mojada)	3	3,64E+06	6,06E+04	5,71E+04	5,78
Arena 0-0,7 mm con fosfoyesos	3	1,03E+06	1,43E+04	1,52E+04	6,29
Arena 2,2-8 mm con fosfoyesos	3	1,23E+06	1,73E+04	1,71E+04	1,16

Generalmente, el criterio de aceptación de resultados en un laboratorio oscila alrededor del 25% en cuanto al error relativo, por tanto, después de calcular este parámetro para todos los ensayos, se aprecia que en la mayoría de los casos los errores son inferiores a dicho criterio y, por este motivo, las medidas podrían considerarse aceptables. Sin embargo, hay algunos ensayos en los que el error es superior al 25%, estos ensayos son en los que el tiempo de exposición ha sido mayor, en el caso del ensayo de la fuente natural de  $U^{238}$  y de la arena con tamaño de partícula de 0-0,7mm ambos con un tiempo de exposición de 5 días.

Se percibe que cuando el tiempo de medida es menor, mayor es la exactitud con la que ambas técnicas proporcionan datos comparables, por este motivo se quiso realizar el ensayo final con tiempo de exposición de un solo día y es en este último donde ambas técnicas muestran los valores más comparables para los ensayos con fuente natural de  $U^{238}$ .

En la **Figura 59** se muestra dos detectores en el proceso de revelado, en rojo aparecen las trazas que el microscopio contabiliza, en esta figura se muestra un detector sin saturar (**Figura 59(i)**) y uno saturado (**Figura 59 (ii)**). El hecho de que una traza se sature da lugar a que ya no se pueden contabilizar más trazas, por este motivo el tiempo de exposición se modificó ya que se comprobó, tal y como se ha visto en los resultados, que el tiempo de exposición tiene una gran influencia para poder comparar ambas técnicas. La saturación de las trazas provoca una infraestimación de la concentración de radón.



**Figura 59.** Detectores de trazas en el proceso de revelado.

Por otra parte, el hecho de que los fosfoyesos sean una fuente con una tasa de emisión menor que la fuente natural de uranio, como se ha visto en la caracterización de estas, influye en la exactitud de los datos calculados por el Radon Scout y los detectores de trazas. Los datos que se obtienen cuando la fuente son los fosfoyesos son más comparables entre ambas técnicas que cuando la fuente es la natural de  $U^{238}$ . Esto puede ser debido a que los fosfoyesos tienen una

A pesar de que hay parámetros que influyen en la exactitud para comparar ambas técnicas, se comprueba en todos los casos que los dos detectores proporcionan datos de concentración de radón en aire del mismo orden de magnitud en todos los ensayos realizados, por lo que puede concluirse que ambas técnicas son aceptables para realizar dichas medidas.

### 5.3. Resultados de los ensayos de exhalación de radón

En el siguiente apartado se van a exponer los resultados de los ensayos de exhalación de radón que se han obtenido de los ensayos realizados con la cámara H conectada a electrete y con los detectores de trazas para ambos tipos de arena.

#### 5.3.1. Verificación de los detectores de trazas

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos del cálculo de exhalación de radón tal y como se explicó en el apartado 4.5.2. para los dos tipos de arena, esto se observa en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Resultados obtenidos de exhalación de radón.

	Cámara H conectada a electrete		Detectores de trazas	
	t exposición (h)	Exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s)	t exposición (h)	Exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s)
<b>Arena 0-0,7 mm</b>	6	2,02E+01	6	1,37E+02
<b>Arena 2,2-8 mm</b>	6	5,33E+01	6	4,91E+01

En cuanto al cálculo de exhalación con los detectores de trazas, se ha seguido la misma metodología que para la técnica de la cámara H conectada a electrete, cambiando los parámetros propios de estos detectores como la superficie y el volumen correspondiente.

Tal y como se puede observar, los datos que se han obtenido en el caso de la arena con el tamaño de partícula mayor (2,2-8 mm) son muy similares entre ambas técnicas. Aunque con este único resultado no se pueda verificar de una forma contundente, se deja abierta una línea de investigación futura muy comprometedoras en la utilización de detectores de trazas para la medición de radón.

Teniendo en cuenta el criterio de aceptación del 25% explicado anteriormente, se ha calculado la tasa de exhalación para los ensayos descritos en la **Tabla 10**, para este cálculo se ha utilizado la **Ec.1**, y la **Ec.2** pero en este caso se ha calculado la exhalación de radón mediante la concentración promedio de los tres detectores de trazas que se expusieron en cada uno de los ensayos. A continuación, en la **Tabla 12** se muestran los parámetros que se han utilizado para el cálculo de dicha tasa.

**Tabla 12.** Parámetros utilizados en el cálculo de exhalación de radón mediante detectores de trazas.

<b>S cámara (m<sup>2</sup>)</b>	5,31E-02
<b>V cámara (m<sup>3</sup>)</b>	1,81E-02
<b>λ (h<sup>-1</sup>)</b>	7,56E-03

En la **Tabla 13** se muestran los resultados del cálculo de la tasa de exhalación de radón para los diferentes ensayos donde el error relativo era inferior del 25%.

**Tabla 13.** Valores de tasa de exhalación utilizando como técnica los detectores de trazas.

Ensayo	Tiempo de exposición (horas)	$C_{Rn\ PROM}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s)
Fuente natural de U <sup>238</sup>	72	7,13E+04	8,75E+02
Arena 0-0,7 mm	24	3,42E+04	1,06E+03
Arena 0-0,7 mm (mojada)	72	7,71E+04	9,46E+02
Arena 2,2-8 mm (seca)	72	8,62E+04	1,06E+03
Arena 2,2-8 mm (mojada)	72	5,71E+04	7,00E+02
Arena 0-0,7 mm con fosfoyesos	72	1,52E+04	1,86E+02
Arena 2,2-8 mm con fosfoyesos	72	1,71E+04	2,10E+02

Se observa en la **Tabla 13** que en la mayoría de los casos la tasa de exhalación sigue el mismo orden de magnitud. También se puede ver en el cálculo de la tasa la influencia de los parámetros ya comentados, en este caso se ve la clara influencia de la tasa de emisión de la fuente.

En los resultados se observa que la tasa de exhalación para cada estudio realizado (humedad, influencia del tamaño de partícula y tipo de fuente) los resultados no difieren significativamente entre los dos tipos de arena, es decir, en la tasa de exhalación tampoco tiene influencia el tamaño de partícula. Al mismo tiempo, tal y como se ha comprobado en los ensayos de radón en aire, se obtienen resultados más pequeños cuando las arenas están húmedas, pues se comprueba que con el aumento de humedad disminuye la tasa de exhalación de radón.

## 6. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados de medición de radón en aire y de exhalación de radón en medios de cobertura frente al radón con diferente tamaño de partícula y su caracterización mediante los detectores (yoduro sódico y germanio), así como el estudio de la influencia de diferentes grados de humedad de las arenas estudiadas, han dado lugar a las siguientes conclusiones.

Se ha comprobado que el tamaño de partícula de la arena no influye en la concentración de radón al aire que se alcanza sobre la fuente cubierta con el sustrato y que, en el caso de este estudio, las arenas utilizadas no hacen papel de barrera y no impiden el paso de este gas desde la parte inferior del bidón a la parte superior.

En el estudio de la humedad se ha podido comprobar que este es un parámetro que afecta en los ensayos de medición de radón en aire. Se ha corroborado el papel protector del grado de saturación del agua frente a concentraciones de radón.

En la verificación de los detectores de trazas en los ensayos de medición de radón en aire se ha podido comprobar como son de influyentes parámetros como el tiempo de medida o la tasa de emisión (actividad) de la fuente. Para ensayos de poco tiempo de exposición los detectores de trazas han dado resultados muy similares a los proporcionados por el cálculo del área acumulada de la representación del Radon Scout. Esto sería una ventaja importante ya que los detectores de trazas son comúnmente utilizados para mediciones de larga duración y en este estudio se ha comprobado que los ensayos son más comparables con otras metodologías cuanto menor es el tiempo de exposición.

En cuanto al estudio de la exhalación de radón con diferentes instrumentos de medida, que en este caso se han utilizado la cámara H conectada a un electrete y los detectores de trazas, hay que señalar que los detectores de trazas no es una metodología que se use habitualmente para mediciones de exhalación, pero en este caso, se han obtenido valores satisfactorios para la arena del tamaño de partícula de 2.2-8 mm, resultando las tasas de exhalación obtenidas con ambas técnicas perfectamente comparables. Se deberían realizar más mediciones de exhalación de radón con detectores de trazas para validar la técnica en diferentes condiciones de ensayo.

Este Trabajo Fin de Máster abre la puerta a una futura línea de investigación al uso de detectores de trazas como metodología, fiable y económica, en el análisis de la exhalación de suelos. Cabe destacar que si bien este trabajo ha realizado el estudio de exhalación a escala laboratorio en un bidón cerrado con capacidad de reproducibilidad de resultados sin depender tanto de factores atmosféricos, las medidas en campo, es decir, en suelos al aire libre, en los que la variabilidad de las fluctuaciones atmosféricas es más importante, podrían hacer uso de las ecuaciones verificadas en este trabajo aunque requiere de un estudio más ampliado, así como el diseño de una cámara expresa para la ubicación de las trazas.

## 7. REFERENCIAS

- Acerca de la Radiación* | Novusmed. (n.d.). Retrieved July 11, 2021, from <https://novusmed.cl/acerca-de-la-radiacion/>
- Berenguer, M. J. (1995). NTP 440: Radón en ambientes interiores. *Ministerio*, 1–7.
- Crespo, M. T. (1989). *635 medida de los descendientes del radon en aire por espectrometría alfa*.
- Gamma-Ray Efficiency Calibration*. (n.d.). Retrieved July 23, 2021, from <https://www.mirion.com/learning-center/lab-experiments/gamma-ray-efficiency-calibration-lab-experiment>
- Hosoda, M., Tokonami, S., Sorimachi, A., Janik, M., Ishikawa, T., Yatabe, Y., Yamada, J., & Uchida, S. (2009). Experimental system to evaluate the effective diffusion coefficient of radon. *Review of Scientific Instruments*, 80(1). <https://doi.org/10.1063/1.3049379>
- Linares Alemparte, P., & Ortega, S. G. (2020). *Guía de rehabilitación frente al radón* (P. Linares Alemparte & S. G. Ortega (Eds.)). [www.codigotecnico.org](http://www.codigotecnico.org)
- Manual, U. (2011). *Radon scout pmt*. 1–8.
- NAIS-3x3<sup>TM</sup> NaI LED Temperature-Stabilized\* Scintillation Detector*. (n.d.). Retrieved July 12, 2021, from [www.mirion.com](http://www.mirion.com)
- Noverques, A., Juste, B., Sancho, M., García-Fayos, B., & Verdú, G. (2020). Study of the influence of radon in water on radon levels in air in a closed location. *Radiation Physics and Chemistry*, 171(January), 108761. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108761>
- Noverques, A., Verdú, G., Juste, B., & Sancho, M. (2019). Experimental radon exhalation measurements: Comparison of different techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 155(July 2018), 319–322. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.08.002>
- Noverques, Aina, Juste, B., Sancho, M., & Verdú, G. (2019). Study of radon exhalation as a function of soil water content. *Nuclear España*, 404, 35–38.
- OECD-NEA. (n.d.). *JANIS - Renderer*. Retrieved July 13, 2021, from <https://www.oecd-nea.org/janisweb/renderer/182>
- Rad Elec Inc. (1991). *E-Perm<sup>®</sup> System User 'S Manual*. 5482, 1–45.
- Zeeb, Ha., Shannoun, F., & OMS. (2015). *Manual de la OMS sobre Radón en interiores*. 100. <http://www.who.int/iris/handle/10665/161913#sthash.2WvJkXnR.dpuf>

# PRESUPUESTO



### Índice del presupuesto

1. PRESUPUESTO DETALLADO .....	77
1.1. Mano de obra .....	77
1.2. Equipos y herramientas.....	77
1.3. Útiles de laboratorio .....	79
1.4. Gastos adicionales.....	79
2. PRESUPUESTO TOTAL.....	80



En este apartado se especifica el presupuesto aproximado de los costes asociados a la elaboración del Trabajo Fin de Máster. Para la ejecución del presupuesto, se tienen en cuenta los costes de mano de obra, los gastos de amortización de los equipos y herramientas, material del laboratorio (materia prima, reactivos y útiles de laboratorio) y los gastos adicionales para la realización del proyecto.

## 1. PRESUPUESTO DETALLADO

Se ha decidido dividir el presupuesto en cuatro apartados diferenciados. La mano de obra, el presupuesto asociado a los equipos y herramientas, material del laboratorio y gastos adicionales. Los precios aplicados corresponden con las tarifas vigentes y se presentan sin el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA), que es aplicado al final del presupuesto. Se utiliza el euro como unidad monetaria de cálculo del presupuesto.

### 1.1. Mano de obra

En este apartado se detallan los gastos asociados al personal que se dedica a la realización del proyecto. En el proyecto contribuye la doctora en Ingeniería Nuclear responsable de la tutorización de este, la doctora en Ingeniería Química colaborando en el desarrollo del proyecto y la alumna de ingeniería química. Los costes que se han aplicado se han valorado en fracción de tiempo aplicando el precio en €/h. En la **Tabla 1** se muestra el presupuesto de la mano de obra del proyecto.

**Tabla 1.** Presupuesto de la mano de obra.

Mano de obra					
Ref	Ud	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
<b>O1</b>	h	Graduada en Ingeniería Química	19,99	300	5997,00
<b>O2</b>	h	Doctora en Ingeniería Nuclear	51,40	25	1285,00
<b>O3</b>	h	Doctora en Ingeniería Química	51,40	25	1285,00
<b>TOTAL</b>					<b>8567,00</b>

### 1.2. Equipos y herramientas

En el siguiente capítulo, se presentan los costes de amortización de los equipos y herramientas que ya se disponía de ellos, utilizadas en la realización del estudio. Para los equipos y herramientas que se observan en la **Tabla 2** se estima un periodo de amortización de 10 años. El precio se calcula para la duración del proyecto, siendo esta de 4 meses aproximadamente.

**Tabla 2.** Presupuesto de la amortización de los equipos y herramientas.

Equipos y herramientas						
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Precio amortización(€·año <sup>-1</sup> )	Cantidad	Importe (€)
E1	año	Detector de yoduro sódico con analizador multicanal y blindaje.Marca Canberra, modelo OSPREY, NAI 3"x3".	24794,00	2479,40	0,25	619,85
E2	año	Detector de germanio marca Canberra. Modelo BEGE3830 7500SL en configuración vertical, módulo analizador digital de espectros marca Canberra modelo DSA-LX, blindaje de hierro de baja actividad.	64428,00	6442,80	0,25	1610,70
E3	año	Radon Scout marca Sarad	1984,00	198,40	0,25	49,60
E4	año	Cámara H conectada a electrete	300,00	30,00	0,25	7,50
E5	año	Medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage	2595,00	259,50	0,25	64,88
E6	año	Microscopio, reveladora de trazas y software RadoMeter RSV10	60000,00	6000,00	0,25	1500,00
E7	año	Ordenador personal	650,00	65,00	0,25	16,25
E8	año	Balanza	750,00	75,00	0,25	18,75
E9	año	Estufa	1600,00	160,00	0,25	40,00
<b>TOTAL</b>						<b>3927,53</b>

### 1.3. Útiles de laboratorio

Los útiles de laboratorio que se tienen en cuenta para la realización del presupuesto referente a estos son los materiales no amortizables, es decir, los materiales que se han utilizado en su totalidad, por este motivo se aplica el precio como el valor de adquisición. Se divide por una parte en reactivos y materias primas (**Tabla 3**) y por otra parte el material de laboratorio (**Tabla 4**).

**Tabla 3.** Presupuesto de los reactivos y materias primas.

Reactivos y materias primas					
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Cantidad	Importe (€)
R1	L	Agua destilada	0,20	10	2,00
R2	Bala	Nitrógeno	75,00	0,1	7,50
R3	L	Nitrógeno líquido	4,00	100	400,00
R4	L	Ácido Acético (64-19-7, PanReac)	51,6	0,02	1,032
R5	kg	Hidróxido Sódico 98%	42,00	2,00	84,00
<b>TOTAL</b>					<b>494,53</b>

**Tabla 4.** Presupuesto del material de laboratorio.

Material de laboratorio					
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Cantidad	Importe (€)
M1	Ud	Bidón de 30L con cierre de ballesta	45,00	1	45,00
M2	Ud	Detector de trazas	25,00	53	1325,00
M3	Ud	Vasos de precipitado 250 mL	10,00	4	40,00
M4	Ud	Pinzas de precisión	20,60	2	41,20
M5	Ud	Tijeras	3,00	1	3,00
M6	Ud	Vial 20mL	0,75	20	15,00
M7	Ud	Soporte metálico	40,00	1	40,00
M8	Ud	Matraz aforado	7,78	1	7,78
M9	Ud	Placas Petri	1,69	5	8,45
M10	Ud	Electrete de largo plazo	32,67	1	32,67
<b>TOTAL</b>					<b>1558,10</b>

### 1.4. Gastos adicionales

En este apartado, se muestran todos los gastos referentes al material de oficina y licencias de software que se ha necesitado para la elaboración del proyecto. Todo esto se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Presupuesto de los gastos adicionales.

Gastos adicionales	
Descripción	Importe (€)
Material de laboratorio y de oficina	200,00
Licencia Genie™ 2000 Software.	1500,00
<b>TOTAL</b>	<b>1700,00</b>

## 2. PRESUPUESTO TOTAL

El presupuesto total que se muestra en la **Tabla 6** es la suma de todos los presupuestos parciales que se han obtenido en el apartado anterior.

**Tabla 6.** Presupuesto total.

<b>Presupuesto total</b>	
<b>Capítulo</b>	<b>Importe (€)</b>
Mano de obra	8567,00
Equipos y herramientas	3927,53
Reactivos y materias primas	494,53
Material de laboratorio	1558,10
Gastos adicionales	1700,00
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)</b>	<b>16247,16</b>
Gastos Generales 13%	2112,13
IVA 21%	3411,90
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)</b>	<b>21771,19</b>

El presupuesto total para la realización del Trabajo Fin de Máster asciende a VEINTIÚN MIL SETECIENTOS SETENTA Y UN EURO CON DIECINUEVE CÉNTIMOS, 21771,19€.

En el presente trabajo, la mano de obra no se ha tenido que desembolsar, por este motivo, se calcula el presupuesto real mostrado en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Presupuesto real.

<b>Presupuesto real</b>	
<b>Capítulo</b>	<b>Importe (€)</b>
Equipos y herramientas	3927,53
Reactivos y materias primas	494,53
Material de laboratorio	1558,10
Gastos adicionales	1700,00
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)</b>	<b>7680,16</b>
Gastos Generales 13%	998,42
IVA 21%	1612,83
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)</b>	<b>10291,41</b>

El presupuesto real para la realización del Trabajo Fin de Máster asciende a DIEZ MIL DOSCIENTOS NOVENTA Y UN EURO CON CUARENTA Y UN CÉNTIMO, 10291,41€.