



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ESTUDIO DE LA EXPOSICIÓN AL RADÓN 222
EXHALADO A PARTIR DE LOS MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EMPLEADOS EN VIVIENDAS.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Química

AUTOR/A: Moreno Jorge, Paula

Tutor/a: Noverques Medina, Aina

Cotutor/a: Sancho Fernández, María Pino

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis tres tutoras. A María, por darme la gran oportunidad de poder realizar este TFM y adentrarme en el mundo nuclear. A Belén, por enseñarme muchísimo y ayudarme en cualquier duda que tuviera. Y por último a Aina, por ser mi gran apoyo y ayuda en este trabajo y hacerlo todo mucho más fácil. Las tres sois un gran ejemplo a seguir, tanto como profesoras como personas. También agradecer a Gumer por ofrecerme las prácticas en el grupo SENUBIO y poder realizar este proyecto.

Quiero agradecer también a mis compañeros de departamento por haberme acogido como una más haciendo las horas de prácticas mucho más amenas.

También agradecer a mis amigas de siempre el apoyo que me han dado cuando algo no iba bien y el tener que aguantar todas mis quejas. Por otro lado, quiero dar las gracias a todas las nuevas amistades que he hecho durante este máster, se han convertido en personas fundamentales en mi vida.

Y, por último, agradecer a mi madre, mi padre y mi hermano el aguantarme todos estos años durante la carrera y el máster, no ha sido nada fácil, pero vosotros siempre confiabais en mi ni cuando yo lo hacía.

Gràcies a tots de tot cor per ajudar-me a aconseguir ser per fi Enginyera Química.

RESUMEN

Estudios recientes muestran como algunos materiales de construcción exhalan ^{222}Rn en grandes cantidades debido a que las materias primas pueden contener trazas de uranio y radio de manera natural. La utilización de estos materiales en las viviendas y los edificios supone un aumento del riesgo asociado a la exposición al radón para la población, que tiende a acumularse en el aire en espacios con poca ventilación. La OMS lo ha clasificado como un elemento cancerígeno, primera causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras., es imprescindible la caracterización de diferentes materiales de construcción utilizados comúnmente como materiales cerámicos, azulejos, ladrillos o pladur, para poder predecir la presencia de ^{222}Rn y definir las medidas preventivas adecuadas.

El objetivo de este TFM es medir la tasa de exhalación de radón en varios materiales de construcción utilizando diferentes metodologías de medición: detectores activos y pasivos. Se comparan los resultados entre los distintos métodos y se utilizan modelos matemáticos para obtener la tasa exhalación, teniendo en cuenta las constantes de decaimiento del radón y las fugas del equipo experimental diseñado. Los valores de exhalación obtenidos con las tres metodologías de medida son coherentes, por lo que se elige la más ventajosa para medir una serie de materiales de construcción y estudiar cuál de ellos presenta más exhalación. Posteriormente, se calcula la dosis por inhalación que recibiría una persona en una estancia en la que estuvieran presentes dichos materiales.

Este trabajo supone una mejora del conocimiento acerca del riesgo de exposición al radón en las viviendas debido a exhalación de los materiales de construcción que la conforman. Esto permitirá una mejora en las medidas preventivas reduciendo la potencial incidencia del gas radón sobre el aumento de enfermedades como el cáncer de pulmón, cumpliendo con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 “Salud y Bienestar”.

PALABRAS CLAVES: Radón, Rn-222, exhalación, materiales de construcción.

RESUM

Estudis recents mostren com alguns materials de construcció exhalen ^{222}Rn en grans quantitats pel fet que les matèries primes poden contindre traces d'urani i ràdi de manera natural. La utilització d'aquests materials en els habitatges i els edificis suposa un augment del risc associat a l'exposició al radó per a la població, que tendeix a acumular-se en l'aire en espais amb poca ventilació. L'OMS ho ha classificat com un element cancerigen, primera causa de càncer de pulmó en persones no fumadores., és imprescindible la caracterització de diferents materials de construcció utilitzats comunament com a materials ceràmics, taulells, rajoles o pladur, per a poder predir la presència de ^{222}Rn i definir les mesures preventives adequades.

L'objectiu d'aquest TFM és mesurar la taxa d'exhalació de radó en diversos materials de construcció utilitzant diferents metodologies de mesurament: detectors actius i passius. Es comparen els resultats entre els diferents mètodes i s'utilitzen models matemàtics per a obtenir la taxa d'exhalació, tenint en compte les constants de decaïment del radó i les perdudes de l'equip experimental dissenyat. Els valors d'exhalació obtinguts amb les tres metodologies de mesura són coherents, per la qual cosa es tria la més avantatjosa per a mesurar una sèrie de materials de construcció i estudiar quin d'ells presenta més exhalació. Posteriorment, es calcula la dosi per inhalació que rebria una persona en una estada en la qual foren presents aquests materials.

Aquest treball suposa una millora del coneixement sobre el risc d'exposició al radó en els habitatges a causa d'exhalació dels materials de construcció que la conformen. Això permetrà una millora en les mesures preventives reduint la potencial incidència del gas radó sobre l'augment de malalties com el càncer de pulmó, complint amb l'Objectiu de Desenvolupament Sostenible 3 "Salut i Benestar".

PARAULES CLAU: Radó, radó 222, exhalació, materials de construcció.

ABSTRACT

Recent studies show how some building materials exhale ^{222}Rn in large quantities because the raw materials may naturally contain traces of uranium and radium. The use of these materials in homes and buildings increases the risk associated with radon exposure for the population, which tends to accumulate in the air in poorly ventilated spaces. The WHO has classified it as a carcinogenic element, the first cause of lung cancer in non-smokers. It is essential to characterize different commonly used building materials such as ceramic materials, tiles, bricks or plasterboard, in order to predict the presence of ^{222}Rn and define the appropriate preventive measures.

The objective of this TFM is to measure the radon exhalation rate in various building materials using different measurement methodologies: active and passive detectors. The results between the different methods are compared and mathematical models are used to obtain the exhalation rate, taking into account the radon decay constants and the leakage of the designed experimental equipment. The exhalation values obtained with the three measurement methodologies are consistent, so the most advantageous one is chosen to measure a series of building materials and study which of them presents more exhalation. Subsequently, the inhalation dose that a person would receive in a room where these materials were present is calculated.

This work represents an improvement in knowledge about the risk of exposure to radon in dwellings due to exhalation of the building materials that comprise it. This will allow an improvement in preventive measures reducing the potential incidence of radon gas on the increase of diseases such as lung cancer, complying with Sustainable Development Goal 3 "Health and Well-being".

KEYWORDS: Radon, radon-222, exhalation, building materials.

ÍNDICE GENERAL

- DOCUMENTO I: MEMORIA
- DOCUMENTO II: PRESUPUESTO
- DOCUMENTO III: PLANO

DOCUMENTO I:

MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	9
1.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	9
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN	11
2.1. RADIATIVIDAD Y RADIACIÓN.	11
2.2. LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA.....	12
2.3. EL RADÓN.....	13
2.4. TRANSPORTE DEL ²²² RN.....	14
2.5. RIESGOS PARA LA SALUD DEL RADÓN.	16
2.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS NIVELES DE RADÓN	17
2.7. DOSIS.....	18
2.8. RADÓN EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	19
2.9. NORMATIVA.....	22
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	25
CAPÍTULO 4. INSTRUMENTACIÓN.....	27
4.1. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DEL RN.	27
4.1.1. Pasivos.....	27
4.1.2. Activos.....	29
4.2. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS.	30
4.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	31
4.3.1. Electretes.....	31
4.3.2. Trazas	33
4.3.3. RAD-7	35
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	37
5.1. SELECCIÓN DE MATERIALES.	38
5.2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y MODELIZACIÓN.....	42

5.2.1. Electretes.....	43
5.2.2. Trazas.	47
5.2.3. Detector en continuo RAD-7.	50
5.2.4. Cálculo de Dosis	55
CAPÍTULO 6. RESULTADOS	57
6.1. CÁLCULOS PREVIOS	57
6.2. RESULTADOS ELECTRETES	59
6.3. RESULTADOS TRAZAS	61
6.4. RESULTADOS RAD-7.....	61
6.5. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LAS TRES METODOLOGÍAS.....	74
6.5.1. Comparación de las concentraciones.	74
6.5.2. Comparación de la tasa de exhalación.	77
6.5.3. Comparación de los métodos.....	80
6.6. BASE DE DATOS DE LA TASA DE EXHALACIÓN DE DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	82
6.7. DOSIS INHALADA	82
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	89
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Poder de penetración de los distintos tipos de radiaciones ionizantes. (Radiaciones ionizantes - INSST - Portal INSST - INSST, s. f.).....	12
Figura 2. Diferentes tipos de longitudes de onda según radiaciones ionizantes o no ionizantes. (Mirion Technologies,2018).....	12
Figura 3. Cadena de desintegración del Uranio 238. (JANIS 4.0, 2013).	14
Figura 4. Emanación, transporte y exhalación del gas radón. (Lastra, 2016).....	15
Figura 5. Mapa potencial de radón en España. (Mapa del Potencial de Radón de España CSN, 2017)	17
Figura 6. Gráfico de aportación de cada sector a la dosis media anual de una persona en España. (Piedecausa-García et al., 2011).....	19
Figura 7. Comparación de la tasa de exhalación E_A ($Bq/m^2 \cdot d$) de distintos materiales de construcción. (Yousef et al., 2015).....	22
Figura 8. Electrete short-term (T) a la izquierda y long-term (LT) a la derecha. (fuente: elaboración propia).	32
Figura 9. Disco de Teflón de un electrete. (fuente: elaboración propia).	32
Figura 10. En la imagen a) se muestra una cámara S cerrada y en la imagen b) se muestra en posición abierta. (fuente: elaboración propia).	33
Figura 11. Imagen de una traza. (fuente: elaboración propia).	33
Figura 12. En la imagen a) se muestra el equipo donde se produce el revelado de las trazas y en la imagen b) se muestra el microscopio electrónico. (fuente: elaboración propia).	34
Figura 13. Detector activo RAD-7. (fuente: elaboración propia).	35
Figura 14. Diagrama de bloques de la metodología a seguir.....	37
Figura 15. Índice de radiación en los mármoles. (Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).....	39
Figura 16. Índice de radiación en los granitos. (Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).....	40
Figura 17. Índice de radiación en otros tipos de materiales.(Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).....	40
Figura 18. Muestras del material de construcción “Granito Rosa Porriño” (fuente: elaboración propia).....	41

Figura 19. Muestras del material de construcción "Granito Azul Vizag" (fuente: elaboración propia).	42
Figura 20. Muestra del material de construcción "Granito Crema Julia" (fuente: elaboración propia).	42
Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir de los electretes.	43
Figura 22. Jarra con la muestra a medir y el electrete y su cámara (fuente: elaboración propia)	44
Figura 23. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir de trazas.	47
Figura 24. Jarra con el material de construcción y las trazas. (fuente: elaboración propia)	48
Figura 25. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir del RAD-7.....	50
Figura 26. Montaje del equipo para la medición a partir del RAD-7. (fuente: elaboración propia).....	51
Figura 27. Elementos del equipo RAD-7. (fuente: elaboración propia).....	52
Figura 28. Entradas, salidas y sentido del flujo de aire en el circuito cerrado del RAD-7. (fuente: elaboración propia).	53
Figura 29. Decaimiento experimental y teórico del radón en el bidón.	59
Figura 30. [Rn] frente al tiempo de la pieza Rosa Porriño medida a partir del RAD-7.	62
Figura 31. Representación de la [Rn] experimental y la curva teórica ajustada para la pieza Rosa Porriño.	63
Figura 32. [Rn] _{exp} frente al tiempo con el valor de la [Rn] _{EE} para la pieza Rosa Porriño.	64
Figura 33. Representación de los datos experimentales de la concentración a las 24 horas y su pendiente para la pieza Rosa Porriño.....	66
Figura 34. [Rn] _{exp} frente al tiempo para la pieza Azul Vizag.	68
Figura 35. [Rn] _{exp} frente al tiempo de la pieza Crema Julia medido a partir del RAD-7.	70
Figura 36. Representación de la [Rn] experimental y la curva teórica ajustada para la pieza Crema Julia.	71
Figura 37. [Rn] _{exp} frente al tiempo con el valor de la [Rn] _{EE} para la pieza Crema Julia.	72
Figura 38. Representación de los datos experimentales de la concentración a las 24 horas y su pendiente para la pieza Crema Julia.....	73
Figura 39. Representación de la curva teórica y la curva corregida sin pérdidas extendidas en el tiempo para la pieza Rosa Porriño.	75
Figura 40. Representación de la curva teórica considerando las pérdidas y la curva corregida sin pérdidas extendidas en el tiempo para la pieza Crema Julia.	76
Figura 41. Representación de la tasa de exhalación de la pieza Rosa Porriño con sus desviaciones para cada uno de los métodos.	78
Figura 42. Representación de la tasa de exhalación de la pieza Crema Julia con sus desviaciones para cada uno de los métodos.	79
Figura 43. Representación de las distintas tasas de exhalación dependiendo del método y la pieza. .	80

Figura 44. Representación de la Dosis (mSv/años) frente a la tasa de ventilación W (h^{-1}). 86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos bibliográficos de la concentración de ^{238}U en distintos terrenos. (Piedecausa et. al, 2011).	20
Tabla 2. Datos bibliográficos de la tasa de exhalación de distintos materiales (Yousef et al., 2015). ...	21
Tabla 3. Tabla resumen de los niveles de referencia de radón en el aire.	23
Tabla 4. Límites de dosis según el Real Decreto 1029/2022 del BOE.	23
Tabla 5. Métodos de medición pasivos.	28
Tabla 6. Métodos de medición activos.	29
Tabla 7. Análisis de los distintos métodos de medición.	30
Tabla 8. Listado de los materiales de construcción.	38
Tabla 9. Toma de datos necesarios para la medición a partir de electretes.....	45
Tabla 10. Constantes para un electrete ST y una cámara S para el cálculo de la concentración de radón.	45
Tabla 11. Toma de datos para el procedimiento de medición a partir de trazas.	48
Tabla 12. Medidas de las piezas.	57
Tabla 13. Valores de la constante de decaimiento del radón.	58
<i>Tabla 14. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Rosa Porriño.</i>	<i>60</i>
Tabla 15. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Crema Julia.	60
Tabla 16. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Azul Vizag.	60
Tabla 17. Resumen de los resultados de la tasa de exhalación a partir de los electretes.	60
Tabla 18. Resultados de la exhalación a partir de trazas en la pieza Rosa Porriño.....	61
Tabla 19. Resultados de la exhalación a partir de trazas en la pieza Crema Julia.....	61
Tabla 20. Volúmenes para el cálculo de la exhalación.....	63
Tabla 21. Resultados de la exhalación de la pieza Rosa Porriño a partir del RAD-7.	66
Tabla 22. Volúmenes para el cálculo de la exhalación en la pieza Crema Julia.	71
Tabla 23. Resultados de la exhalación de la pieza Crema Julia a partir del RAD-7.	73

Tabla 24. Relación de las concentraciones de electretes y trazas con la curva del RAD-7 para la pieza Rosa Porriño.	75
Tabla 25. Relación de las concentraciones de electretes y trazas con la curva del RAD-7 para la pieza Crema Julia.	76
Tabla 26. Comparación de la tasa de exhalación de la pieza Rosa Porriño a partir de las tres metodologías.	77
Tabla 27. Comparación de la tasa de exhalación de la pieza Crema Julia a partir de las tres metodologías.	78
Tabla 28. Comparación en diversos aspectos de los métodos utilizados.	81
Tabla 29. Tasa de exhalación para distintos materiales.	82
Tabla 30. Valores de la tasa de exhalación escogidos para el cálculo de la dosis.	83
Tabla 31. Áreas de exhalación de los materiales que forman el baño.	83
Tabla 32. Resultados de la $[Rn]_{\text{indoor}}$ y la Dosis según la tasa de ventilación.	85
Tabla 33. Tasas de exhalación calculadas para obtener una dosis de 1 mSv/año para el Caso 2.	87

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) surge de la realización de las prácticas curriculares en el Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) de la Universitat Politècnica de València, en concreto, en el grupo de Seguridad Nuclear y Radiaciones Ionizantes (SENUBIO). Este grupo participa en un proyecto de investigación nacional financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) sobre “Caracterización, exhalación y remediación de radón en materiales de construcción” que se centra en el estudio, control y remediación de los efectos de la exhalación del radón de los materiales de construcción.

El radón es un gas radiactivo que se produce de forma natural a partir de la desintegración del uranio presente en la tierra, que tiende a acumularse en espacios cerrados, como viviendas y edificios. La exposición prolongada a niveles altos de radón se ha asociado con un mayor riesgo de desarrollar cáncer de pulmón de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud ([OMS],2021). Por ello, la preocupación sobre la presencia de este gas en ciertos materiales de construcción como las piedras naturales, el granito o la pizarra (Piedecausa et. al, 2011) han crecido en los últimos años.

No obstante, y a pesar de los riesgos asociados a la inhalación del gas radón, existe una falta de conciencia sobre el tema y una falta de regulaciones sólidas en muchos países en relación con la medición y mitigación del radón en los materiales de construcción. La mayoría de las investigaciones realizadas hasta la fecha se han centrado principalmente en la medición del radón en el aire interior, como por ejemplo el *Estudio de la calidad del aire interior en los edificios de la Universidad de Málaga: concentraciones de radón* (Muñoz et al., 2022), dejando de lado la posible exhalación de radón de los materiales de construcción, lo que representa una brecha importante en el conocimiento.

El objetivo principal de este TFM es analizar la exhalación de radón en los materiales de construcción a partir de diversos métodos de medición, con el fin de proporcionar información actualizada sobre distintos materiales y validar diversas metodologías para medir la exhalación de radón. A través de un enfoque multidisciplinario que combina la investigación experimental y la modelización, se pretende identificar los materiales de construcción que presentan una mayor exhalación de radón. Con este trabajo se espera contribuir a abrir futuras líneas de investigación para la mitigación de los materiales e implementar políticas y regulaciones para proteger la salud de las personas.

1.1.JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

La realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM) se basa en plasmar en un tema específico parte de los conocimientos estudiados y aprendidos durante los dos años de máster, siendo necesario para obtener los 12 créditos para la finalización del Máster Universitario en Ingeniería Química.

También cabe destacar que para la realización de este proyecto han sido necesarias unas bases fundamentales sobre la física de la radiación y del sector nuclear que han sido vistos en la asignatura de “Reactores Nucleares” que se cursa en el primer año del máster. Por otro lado, ha sido necesario el uso de softwares como Excel o Matlab que se han implementado en muchas asignaturas del máster.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN

2.1. RADIATIVIDAD Y RADIACIÓN.

La radiactividad es un fenómeno que se produce por la desintegración de los núcleos de átomos inestables liberando radiación en forma de partículas subatómicas o energía electromagnética. Los átomos se componen de un núcleo central que contiene protones y neutrones, rodeado de electrones. La estabilidad de los átomos depende de la relación entre sus protones (número atómico, Z) y neutrones, la suma de estos dos hace referencia al número másico, A. Cada núcleo se identifica con la siguiente expresión, A_ZX .

La unidad de medida de la radiactividad es el Becquerel (Bq) que equivale a 1 desintegración atómica por segundo.

La radiación es energía que se desplaza de una forma que se puede describir como ondas o un conjunto de partículas según el Organismo Internacional de Energía Atómica ([IAEA,2022]). Existen dos tipos de radiación: la ionizante y la no ionizante.

La radiación ionizante tiene una energía capaz de arrancar los electrones de los átomos de las moléculas, por lo tanto, cuando hay una interacción con la materia se producen cambios a nivel atómico que generan iones. Las radiaciones ionizantes se clasifican de la siguiente manera (INSST, s.f):

- Radiaciones Alfa (α): tienen un alto poder de ionización y poco poder de penetración en la materia. Son emitidas por isótopos naturales y artificiales, como los núcleos de Helio.
- Radiaciones Beta (β): consisten en electrones de carga negativa o positiva. Tienen menor poder de ionización y mayor poder de penetración que las alfas.
- Rayos- γ : tienen un elevado poder de penetración y acompañan o suceden a desintegraciones α o β . No tienen ni carga ni masa.
- Radiación de neutrones: consisten en partículas sin carga con un alto poder de penetración.
- Rayos-X: tienen unas características parecidas a los rayos- γ , ya que no tienen ni carga ni masa, pero estos proceden de las capas externas del átomo.

En la Figura 1 se muestra el poder de penetración que tienen los distintos tipos de radiaciones ionizantes.

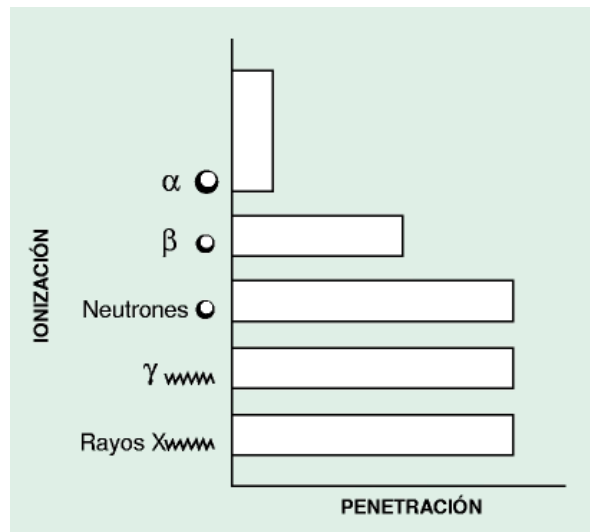


Figura 1. Poder de penetración de los distintos tipos de radiaciones ionizantes. (Radiaciones ionizantes - INSST - Portal INSST - INSST, s. f.)

En cambio, la radiación no ionizante no tiene la suficiente energía para arrancar los electrones de los átomos, pero produce vibraciones en las moléculas. Algunos tipos de radiación no ionizante son las ondas de radio y la luz visible.

A continuación, en la Figura 2 se muestran las diferentes longitudes de ondas que tienen relación directa con la energía, dependiendo si son ionizantes o no.

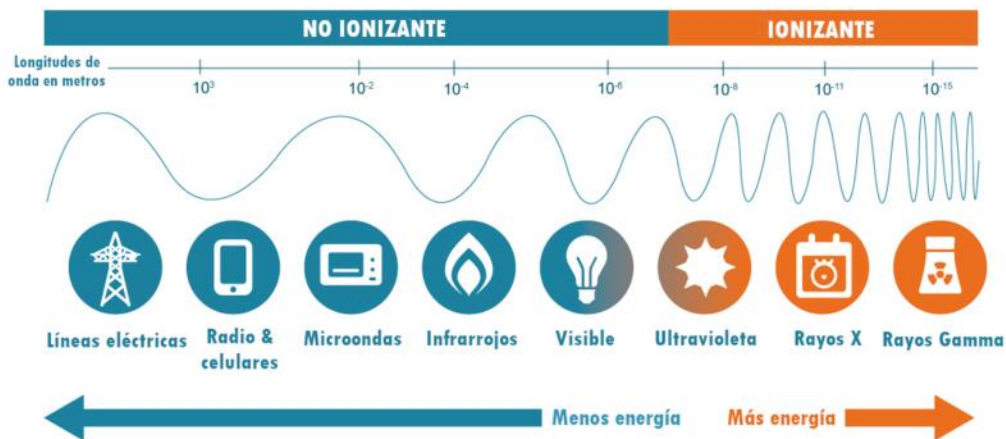


Figura 2. Diferentes tipos de longitudes de onda según radiaciones ionizantes o no ionizantes. (Mirion Technologies, 2018).

La radiación ionizante es mucho más peligrosa que la no ionizante, sin embargo, en ambos casos la dosis recibida es una variable que depende mucho de los efectos adversos que se puedan producir.

2.2. LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA.

En el proceso de desintegración cada elemento se caracteriza por una constante de desintegración (λ), que hace referencia a la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo se desintegre. Partiendo

de esta constante se puede conocer la actividad (A) de una muestra, el periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) y la vida media (τ), tal y como se muestra en la Ec. 2, la Ec. 3 y la Ec. 4.

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t) \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo A la actividad de la muestra (Bq); λ la constante de desintegración en (s^{-1}) y $N(t)$ el número de núcleos radiactivos por unidad de tiempo (Bq·s).

Integrando la ecuación anterior se obtiene la actividad de la muestra para un tiempo en concreto,

$$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo, $A(t)$ la actividad de la muestra en un instante determinado (Bq); N_0 el número de núcleos en el tiempo inicial y t el tiempo transcurrido (s).

El periodo de semidesintegración se define por la siguiente ecuación y equivale al tiempo en el cual la actividad del elemento se reduce a la mitad:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo $T_{\frac{1}{2}}$ el periodo de semidesintegración (s).

La vida media es el promedio de la vida de los núcleos de un radionucleido antes de desintegrarse.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo, τ la vida media (s).

2.3. EL RADÓN.

El Radón (Rn) es un elemento químico de la tabla periódica perteneciente a los gases nobles, con número atómico 86. Se produce a partir de la desintegración radiactiva del uranio y del torio. Existen tres isótopos naturales que son:

- El ^{222}Rn que proviene del ^{238}U y tiene un tiempo de vida medio de 3.8232 días.
- El ^{220}Rn que proviene del ^{235}U y tiene un tiempo de vida medio de 55.8 segundos.
- El ^{219}Rn que proviene del ^{232}Th y tiene un tiempo de vida medio de 3.98 segundos.

Como se ha descrito anteriormente el ^{222}Rn es el isotopo de radón con un mayor tiempo medio de vida, por lo tanto, es el más peligroso y el que hay que estudiar en gran profundidad. Además de radiactivo, es incoloro, inodoro e insípido por lo que dificulta su detección. Es el producto de desintegración inmediata del ^{226}Ra y tiene una vida media de 3.8 días, es decir, cuando pasa ese periodo de tiempo se desintegra en otros compuestos, como el ^{218}Po y el ^{214}Pb , tal y como se muestra en la Figura 3.

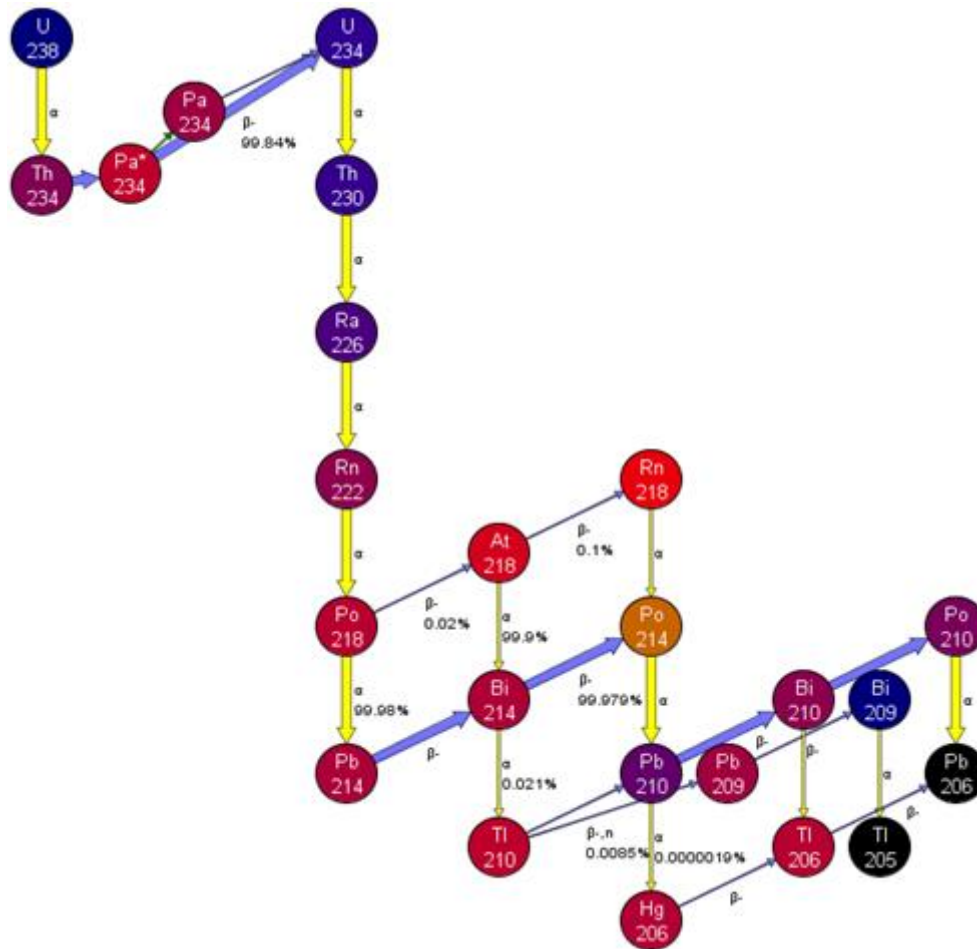


Figura 3. Cadena de desintegración del Uranio 238. (JANIS 4.0, 2013).

El ^{222}Rn está presente de manera natural en el suelo, en los materiales de construcción y en el agua. Este radón puede pasar al aire, al agua subterránea o al agua de superficie. Los productos resultantes del decaimiento del radón son sólidos y, por lo tanto, pueden adherirse a las partículas existentes en el aire pudiendo ser inhaladas por las personas causando una mayor probabilidad de problemas de salud.

2.4. TRANSPORTE DEL ^{222}Rn .

En el presente apartado se explica cómo se transfiere el ^{222}Rn de los suelos, rocas o materiales de construcción al aire. Su movilidad se basa en tres fenómenos: emanación, transporte y exhalación, en la Figura 4 se muestra un ejemplo del proceso completo.

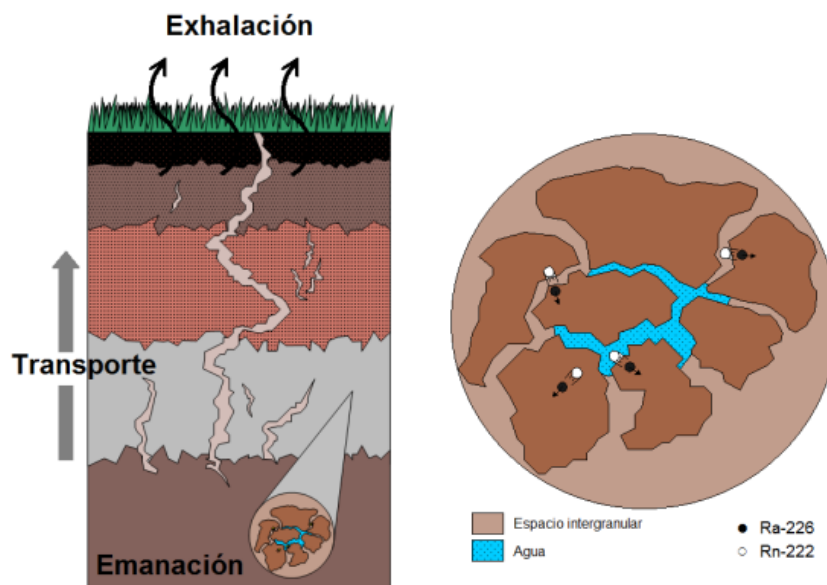


Figura 4. Emanación, transporte y exhalación del gas radón. (Lastra, 2016)

Emanación:

La emanación se produce cuando los átomos de radón son liberados de su fuente de origen (grano del material) hacia el espacio de aire que los rodea (espacio intergranular). Este fenómeno se produce como resultado del retroceso de la desintegración del radio. El parámetro que define este fenómeno es el coeficiente de emanación ϵ , que relaciona la fracción de átomos de radón que se liberan de la fase sólida de su fuente de origen. Se trata de una magnitud adimensional y oscila de 0 (el radón no escapa del material) a 1 (todo el radón escapa). La tasa de emanación tiene unidades de $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}$. Algunos de los principales parámetros que afectan a la emanación pueden ser: el tamaño de grano, la porosidad o la humedad (Noverques, 2022).

Transporte:

Una vez el radón ha emanado, pasa a la siguiente fase que es el transporte, que se produce principalmente mediante difusión, es decir, el movimiento de las partículas de una zona donde hay alta concentración a una zona donde hay una baja concentración, según explica la Ley de difusión de Fick (Ec. 5).

$$J = n \cdot D \frac{dC}{dz} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo, J la tasa de emanación del radón ($\text{Bq}/\text{m}^2\cdot\text{s}$); n la porosidad del medio; D el coeficiente de difusión del radón en el medio (m^2/s); C la concentración de radón en los poros del medio (Bq/m^3) y z la distancia en la dirección de la difusión (m).

Otra forma de transporte del radón es mediante convección. El flujo convectivo (advectivo) se produce por la diferencia de presión que pueda haber desde el espacio intergranular y la superficie del suelo. Aunque mayoritariamente, el transporte se produce por difusión.

Exhalación:

Por último, cuando el radón emana y se transporta a la superficie del suelo pasa a transferirse a la atmosfera mediante el proceso de exhalación. Para la descripción de este proceso se utiliza la tasa de exhalación E , la cual hace referencia a la concentración liberada por unidad de superficie y tiempo ($\text{Bq}/\text{m}^2\cdot\text{d}$). La exhalación del radón puede variar dependiendo de distintos parámetros que se muestran a continuación (Frutos & Olaya, 2010):

- **Humedad:** Los átomos de radón que salen de la red cristalina aumentan con una mayor humedad, sin embargo, la difusión en el agua es menor que en el aire, por lo tanto, la tasa de exhalación disminuirá.
- **Presión:** una disminución de la presión provoca que el gas sea atraído hacia la superficie, mientras que un aumento de presión provoca que el gas se repele de la superficie. Por lo tanto, al disminuir la presión se producirá una mayor tasa de exhalación ya que el gas se transportará más rápido a la superficie, mientras que con un aumento de la presión ocurrirá lo contrario.
- **Velocidad del viento:** No es seguro que este parámetro afecte a la exhalación del gas radón, pero se han realizado estudios en los cuales la exhalación aumenta cuando hay grandes velocidades de vientos.

2.5. RIESGOS PARA LA SALUD DEL RADÓN.

El radón empezó a investigarse cuando se dieron cuenta que los trabajadores de una minería desarrollaban cáncer de pulmón en mayor medida. Al ser un gas incoloro, inodoro e insípido se inhala inconscientemente y no se puede detectar directamente por una persona.

La peligrosidad del gas radón se debe a su inhalación y a la de sus descendientes. El radón, presente en el aire, decae y sus descendientes sólidos, se adhieren a las partículas de polvo y aerosoles. Durante el proceso de inhalación, se fijan en los pulmones donde siguen su desintegración emitiendo partículas *alpha*, que dañan el tejido pulmonar.

Exponerse al radón durante largos periodos y con altas concentraciones es la segunda causa de cáncer de pulmón tras en tabaco en la gente fumadora. Según la OMS el radón provoca entre el 3% y el 14% de todos los cánceres de pulmón. El riesgo de contraer un cáncer de pulmón a causa del radón aumenta un 16% por cada incremento de $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$, esto es debido, a que la relación de dosis-respuesta es lineal. Asimismo, la probabilidad de sufrir cáncer de pulmón en personas expuestas al radón y, además, fumadoras es mayor, suponiendo un riesgo asociado 25 veces mayor a las personas que no lo son.

La parte del organismo la cual recibe la mayor dosis de radiación es el epitelio bronquial, las vías respiratorias extratorácicas y la piel. Aunque no hay pruebas de que el radón cause otro tipo de cáncer, hay varios estudios que relacionan la exposición al radón con enfermedades como la leucemia, enfermedades cardiovasculares o cáncer de estómago. Estos estudios presentan grandes sesgos y se necesita una mayor investigación para poder relacionar el radón con otras enfermedades (Zeeb, H., & Shannoun, F., 2015).

Como se ha descrito anteriormente, el radón puede encontrarse en muchos lugares cotidianos como en los hogares, en los lugares de trabajo, en agua subterráneas o manantiales y hasta en los materiales de construcción. Por esta razón, son tan importantes todas las líneas de investigación acerca del radón

y su mitigación, para intentar que las dosis inhaladas por las personas sean las mínimas posibles y así, reducir los casos de cáncer de pulmón a causa de este gas nocivo.

2.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS NIVELES DE RADÓN

Las características geológicas de la zona donde se sitúan las viviendas o la procedencia de los materiales de construcción son muy importantes, ya que el tipo de suelo es una de las principales fuentes de radón. Por esta razón, se pueden encontrar viviendas con niveles más elevados debido a la zona geográfica.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) creó un mapa del potencial de radón en España para saber que zonas estaban más expuestas al radón y poder facilitar el plan de actuación contra el radón de acuerdo a la Directiva Europea 2013/59/Euratom.

Para la realización del mapa se realizaron unas 12.000 medidas de radón en viviendas. Las concentraciones de radón mostradas en el mapa son debidas a su exhalación desde el suelo. Se ha obtenido un mapa dividido en rangos de concentración de radón utilizando un percentil de 90. Con la ayuda de este mapa, se puede saber fácilmente que zonas tienen unas concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m³.

En la Figura 5 se muestra el mapa de potencial de radón que divide las zonas del territorio estatal en función de los niveles de radón.

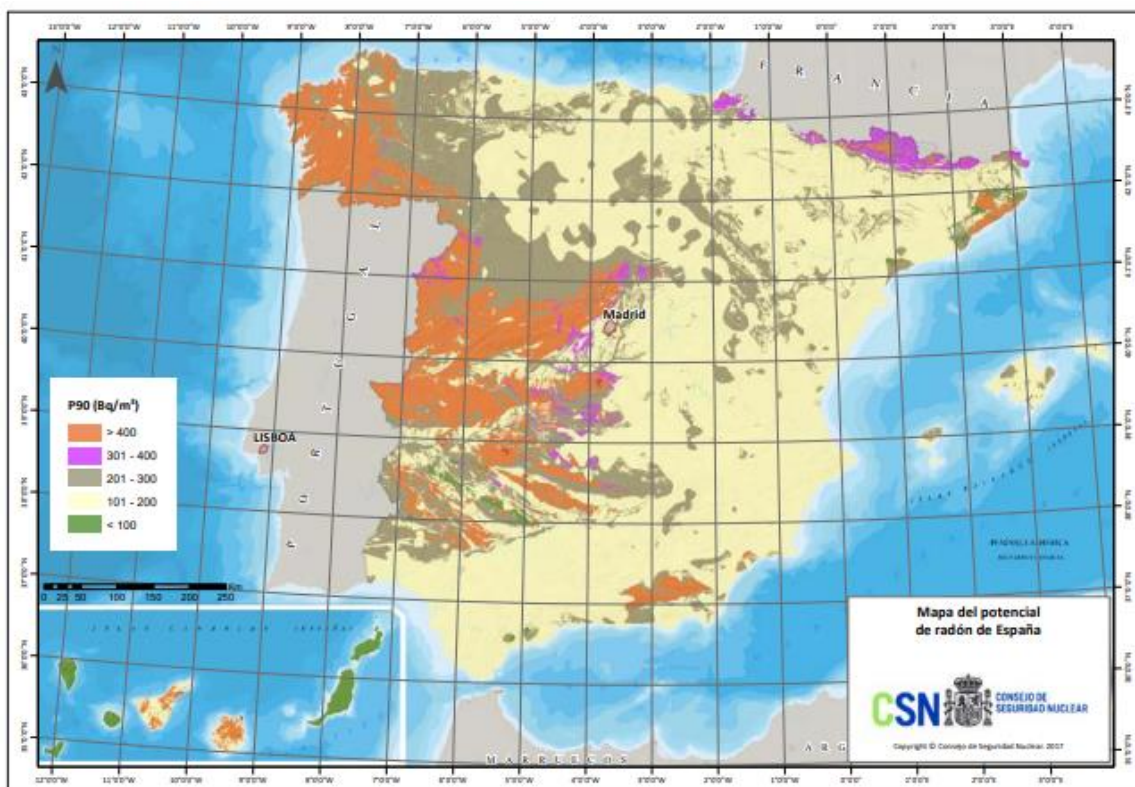


Figura 5. Mapa potencial de radón en España. (Mapa del Potencial de Radón de España CSN, 2017)

Como se puede observar en la Figura 5 las comunidades autónomas de España con una concentración de radón en el suelo más alta, con más de 400 Bq/m³, son Galicia, Castilla y León, Extremadura. En Tenerife, Gran Canaria, Barcelona y Almería también hay zonas con más de 400 Bq/m³ de radón.

Este mapa no es sustitutivo de las mediciones directas que se realicen, pero sí que ayuda a tener una estimación del rango de concentración que se va a obtener en la zona de medición. Además, se tiene que tener en cuenta que este mapa hace referencia al radón que exhala el suelo, por lo tanto, una casa que este situada en una zona de riesgo según el mapa, tendrá más concentraciones de radón, pero hay que tener en cuenta que los materiales de construcción, estudio de este trabajo, incrementarán la concentración de radón sumándose a la del suelo, en el caso que exhalen en grandes cantidades.

2.7. DOSIS.

La dosis de radiación es una medida utilizada para cuantificar la cantidad de radiación que absorbe una persona a lo largo de un determinado tiempo. Es un factor muy importante para evaluar y proteger la salud de las personas frente a la radiación.

Existen distintos tipos de dosis:

- **Dosis absorbida (D_R):** Es la energía transmitida por radiación ionizante y por unidad de masa de material irradiado. La unidad con la que se representa la dosis absorbida es de 1 J/kg, comúnmente llamado Gray (Gy).
- **Dosis equivalente (H_{TR}):** La dosis equivalente es la dosis media absorbida multiplicada por un factor de ponderación del tipo de radiación. Esta dosis, tiene en cuenta las consecuencias biológicas. Su unidad de medida es el Sievert (Sv).
- **Dosis efectiva (E):** Esta dosis corrige a la equivalente proporcionando un factor de peso a cada tejido. La dosis efectiva resulta de ser la suma ponderada de las dosis equivalentes a todos los tejidos y órganos del cuerpo.

La dosis media recibida de origen natural y artificial para la población española se ha estimado en 3.7 mSv/año (CSN, 2010). A continuación, en la Figura 6 se muestran los porcentajes que afectan a la dosis de cada sector.

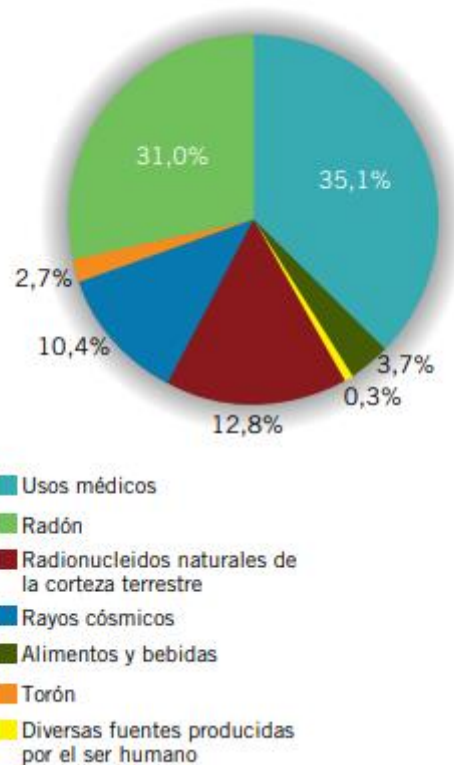


Figura 6. Gráfico de aportación de cada sector a la dosis media anual de una persona en España. (Piedecausa-García et al., 2011)

Como se puede observar en la Figura 6 el mayor porcentaje de dosis recibida por una persona en España se debe a las fuentes médicas como los rayos X, seguida de la exposición al gas radón, siendo esta la primera fuente de exposición natural. Por ello es imprescindible estudiar este gas para llegar a reducir la dosis anual que puede recibir una persona. Otras causas son los radionucleidos naturales de la corteza terrestre, los rayos cósmicos, los alimentos y las bebidas, el torón y, por último, fuentes producidas por el ser humano.

2.8. RADÓN EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Los materiales de construcción van a ser el estudio del presente trabajo. Recientes artículos muestran como algunos materiales exhalan altas concentraciones de radón y pueden llegar a ser perjudiciales si no se les aplican las medidas necesarias.

En España tradicionalmente se han utilizado materiales como la piedra, la arcilla y la madera para fachadas y cubiertas. Los distintos materiales de construcción se pueden clasificar en naturales y artificiales.

Algunos de los materiales naturales que se suelen utilizar para la construcción son maderas, mármoles, granitos y pizarras. También se utilizan materiales cerámicos como los ladrillos, el gres, la porcelana o el vidrio. Por otro lado, existen distintos tipos de materiales artificiales como la cal aérea y el cemento, que son aglomerantes. Además, están incluidos en esta clasificación los plásticos sintéticos y los composites, como, por ejemplo, el polietileno o el PVC (Site&field international, 2021).

La exhalación de radón de los materiales de construcción se debe a que estos contienen trazas de uranio, ^{238}U , que se van desintegrando hasta llegar al radón. La alta concentración de radón en algunos materiales se debe a que la mayoría están compuestos por radio (^{226}Ra), Torio (^{232}Th) y Potasio (^{40}K). A nivel general se estima que los materiales de construcción puedan aportar un 20% de la concentración total de radón en los domicilios (Piedecausa et. al, 2011).

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran datos bibliográficos de las concentraciones de ^{238}U en distintos tipos de terrenos de los cuales se extraen los materiales de construcción (Piedecausa et. al, 2011).

Tabla 1. Datos bibliográficos de la concentración de ^{238}U en distintos terrenos. (Piedecausa et. al, 2011).

Materia	^{238}U (ppm)
Rocas arsénicas	0.5
Rocas carbonatadas	0.5
Rocas basálticas	1
Suelo	1
Arcillas	3.5
Rocas graníticas	5

Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las rocas graníticas son las que presentan una mayor concentración en ^{238}U , por lo tanto, son las que van a tener una mayor concentración de ^{226}Ra y de ^{222}Rn .

Muchos factores son los que se deben tener en cuenta para saber si un material exhala en grandes cantidades o no. La caracterización del material es un factor muy importante, ya que se puede saber la concentración de radio, torio y potasio que hay en el material, y con ello tener una primera estimación de si el material puede llegar a exhalar altas cantidades. Además, la zona geográfica de donde se extraen los materiales de construcción es muy importante, ya que hay zonas donde el radón está más presente dependiendo de su geología, como se ha mostrado en el apartado de la distribución de los niveles de radón.

Sin embargo, únicamente con la caracterización del material no es suficiente para saber si el material va a exhalar radón o no, ya que depende también de si a este material se le ha aplicado algún tipo de barniz o pintura para un mejor acabado, pudiendo reducir la exhalación del material. Otro factor importante es la estructura de este material y si deja pasar el gas radón con mayor facilidad hasta llegar a la superficie.

Por lo tanto, es muy necesaria la medición de la exhalación de cada uno de los materiales, utilizando la caracterización como un primer paso para tener una estimación previa de lo que puede llegar a exhalar el material.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) investigó para proponer estándares de gestión basados en el contenido de radio y la tasa de exhalación de radón para el hormigón, como el principal material de construcción para las casas nuevas. El índice de concentración de actividad y el contenido de radio pueden utilizarse para gestionar la exposición a la radiación gamma originada por

radionucleidos en materiales de construcción. Sin embargo, como la exhalación de radón de los materiales de construcción se ve afectada por factores ambientales físicos, es difícil analizar directamente las concentraciones de radón en interiores. Sin embargo, la tasa de exhalación de radón por los materiales de construcción puede utilizarse para estimar la concentración de radón en interiores. En consecuencia, para determinar la contribución de los materiales de construcción a la concentración de radón en interiores y gestionar el radón en interiores, los materiales de construcción deben manejarse en función de la tasa de exhalación de radón.

En el presente trabajo se va a realizar el estudio de la tasa de exhalación de los distintos materiales de construcción y se va a observar si presentan un peligro real para la salud de las personas, pudiendo así desencadenar futuras líneas de investigación para reducir esta exhalación o la dosis recibida.

Para realizar estas mediciones es necesario tener referencias bibliográficas de bases de datos de otros estudios y saber en qué rango se mueve la tasa de exhalación de los materiales de construcción. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los datos bibliográficos de una investigación de Yousef, H. A., El-Farrash, A. H., El Ela, A., & Merza, Q. (2015).

Tabla 2. Datos bibliográficos de la tasa de exhalación de distintos materiales (Yousef et al., 2015).

Material	E_A (Bq/m²·d)
Cemento Negro	5.74608
Cemento Blanco	1.48416
Yeso	2.00976
Arena	7.94736
Cerámica	2.57856
Mármol	6.48552
Ladrillos	3.37032
Piedra	11.22672
Grava	2.72856
Granito	25.43808

En la Figura 7 se muestra representada la tasa de exhalación de los materiales que han mostrado en la Tabla 2.

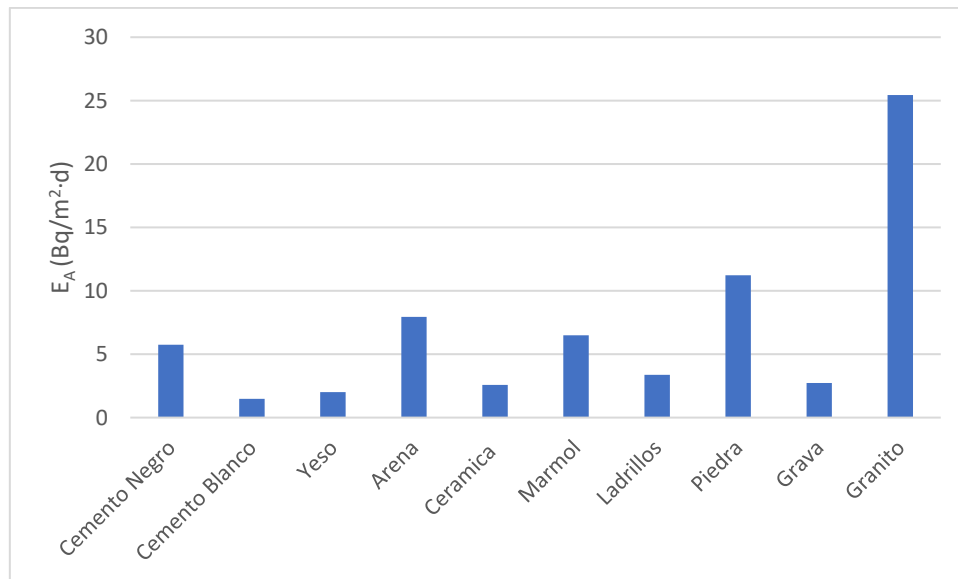


Figura 7. Comparación de la tasa de exhalación E_A (Bq/m²·d) de distintos materiales de construcción. (Yousef et al., 2015)

Como se puede observar en la Figura 7 el material estudiado que más radón exhala con diferencia es el granito, seguido de la piedra, la arena y el mármol. Estos datos bibliográficos se van a tener en cuenta para poder comparar los resultados del presente trabajo.

El departamento SENUBIO forma parte de un proyecto nacional para estudiar distintos tipos de materiales que se usan comúnmente en la construcción, como, por ejemplo, baldosas para los suelos de las casas o granitos para las cocinas o baños. El título del proyecto es “Caracterización, exhalación y remediación de radón en materiales de construcción” y se divide en tres partes:

- La caracterización radiológica de los materiales de construcción.
- La obtención de la tasa de exhalación para saber la dosis que podría recibir una persona.
- La aplicación de medidas preventivas a los materiales de construcción, como la aplicación de barnices o pinturas para reducir su exhalación.

A parte de estas tres partes, se realizan medidas de dosis que puede recibir una persona, antes y después de aplicar las medidas como las pinturas o los barnices, comprobando el poder de reducción de la tasa de exhalación.

El proyecto tiene un presupuesto de 90.000 €. Con la realización de este proyecto se pretende llegar a una solución para mejorar la calidad del aire en espacios cerrados y mejorar el conocimiento sobre la exhalación que procede de los materiales de construcción.

2.9. NORMATIVA.

La presencia de radón y su inhalación por parte de las personas presenta un gran riesgo para la salud, por lo tanto, hay una legislación que cumplir para que este riesgo afecte de la menor forma a la salud de las personas. Según el país y la organización las directivas pueden variar. A continuación, se muestran algunas de las principales organizaciones que regulan las medidas preventivas del radón y los niveles de referencia en el aire en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla resumen de los niveles de referencia de radón en el aire.

Año	Fuente	[Rn] en el aire (Bq/m ³)
2012	Instituto IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear	300-600
2013	Directiva 2013/59/EURATOM	300
2015	Manual de la OMS sobre el radón en interiores	100
2020	Código Técnico de la Edificación CTE, DB HS 6	300
2022	Real Decreto 1029/2022	300

También es importante conocer los límites de dosis. Se va a hacer referencia al Real Decreto 1029/2022 “Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes” el cual estima las limitaciones de dosis según la clasificación personal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites de dosis según el Real Decreto 1029/2022 del BOE.

Clasificación personal	Límite de dosis efectiva	Límite de dosis equivalente para el cristalino	Límite de dosis para la piel y extremidades
Trabajadores expuestos	20 mSv/año	100 mSv/5 años	500 mSv/año
Miembros del público	1mSv/año	15 mSv/año	50 Sv/año

Por último, en cuanto a los materiales de construcción, la Unión Europea (UE) estableció un índice de actividad radiactiva (I) el cual es calculado a partir de la actividad media en el material por parte del ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K.

Según la Directiva de 2013/59/Euratom del Consejo, en el Artículo 75, apartado 1 el índice de actividad radiactiva tiene que ser menor que 1.

$$I < 1$$

Si el índice supera el valor de 1, el material de construcción tiene una cantidad de radón que puede resultar perjudicial para la salud de las personas.

Actualmente, la legislación solo incluye los límites de concentración de radón en aire o en agua o los límites según la caracterización del material, pero no hay una normativa que aplique a la tasa de exhalación de los materiales de construcción.

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es estudiar la exposición debida a la exhalación del ^{222}Rn en los materiales de construcción empleando distintos métodos y analizar el efecto de la exposición al mismo.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Seleccionar los materiales de construcción con más probabilidad de exhalar radón.
- Poner a punto las metodologías de medida de exhalación de radón en materiales de construcción.
- Comparar los resultados de concentración y exhalación obtenidos a partir de distintos métodos de medición.
- Calcular la tasa de exhalación a partir de datos experimentales y a través de distintos modelos matemáticos.
- Crear una base de datos con la tasa de exhalación de distintos materiales de construcción.
- Estimar la dosis recibida por una persona a partir de la exhalación obtenida por los modelos matemáticos.

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTACIÓN

A continuación, se explican de manera general los métodos convencionales que se usan para medir el radón en aire y la selección de los que se van a utilizar en este estudio. Posteriormente, se detallan más a fondo los métodos usados que son los electretes, las trazas y el RAD-7.

4.1. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DEL RN.

Los sistemas de detección y medida de gas radón se clasifican en métodos activos y métodos pasivos. El método activo se basa en un dispositivo de medición en continuo, que requiere de corriente eléctrica para su funcionamiento. Registran la concentración de radón en los intervalos de tiempo seleccionados y la lectura de los datos es directa. Los detectores que operan en método pasivo no requieren de corriente eléctrica y realizan una medida de exposición integral. Su lectura es indirecta, por lo que se requiere de un análisis posterior a la exposición.

A continuación, se procede a nombrar y explicar brevemente algunos de los dispositivos más usados para la medición del radón.

4.1.1. Pasivos

En la Tabla 5 se muestran algunos de los distintos métodos de medición pasivos que se utilizan para el cálculo de la concentración del radón.

Tabla 5. Métodos de medición pasivos.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FOTO
Trazas	Detectores sensibles a las partículas alfa del radón. Se realiza un conteo de las trazas formadas después de un periodo de tiempo.	 <p data-bbox="1059 929 1327 958">Fuente: elaboración propia.</p>
Electretes	Las partículas alfa del radón descargan el electrete obteniendo una diferencia de potencial con la que se puede calcular la concentración de radón.	 <p data-bbox="1064 1429 1323 1458">Fuente: (ShiveHattery, s.f.)</p>
Carbón activado	El radón se adsorbe en el carbón y después se mide mediante espectroscopía gamma.	 <p data-bbox="1098 1881 1292 1910">Fuente: (CSN, 2018)</p>

4.1.2. Activos

En la Tabla 6 se explican brevemente algunos de los principales métodos de medición activos para el cálculo de la concentración del radón.

Tabla 6. Métodos de medición activos.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FOTO
Lucas Cell	Se toman muestras de aire con la cámara de centelleo donde las partículas alfa emitidas por el radón emiten pulsos de luz que se amplifican con un fotomultiplicador y posteriormente se cuentan.	 <p data-bbox="1070 819 1257 846">Fuente: (CSN,2018)</p>
Alphaguard	Es una cámara de ionización que utiliza la espectroscopia alfa para calcular la concentración de radón.	 <p data-bbox="1070 1267 1257 1294">Fuente: (CSN,2018)</p>
RAD-7	Detector de ionización en estado sólido que mide el radón y sus descendientes.	 <p data-bbox="1070 1872 1257 1899">Fuente: (CSN, 2018)</p>

4.2. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS.

Es necesario hacer una selección de los instrumentos de medición según distintos criterios como: si miden radón o sus descendientes, si se dispone de ellos en el laboratorio, si se pueden adaptar para medir la exhalación de los materiales de construcción y más parámetros que se muestran a continuación.

Los criterios de selección de los métodos de medida son los siguientes:

- Disponibilidad del ISIRYM: este criterio se refiere a si el instituto dispone del equipo o si está disponible para su uso.
- Tipo de detector: se refiere a si el detector es activo o pasivo.
- Artículos: si hay artículos de referencia que utilicen dichos equipos.
- Lectura: si la lectura de la medida de la concentración es directa o indirecta.

Por ello, se ha realizado un análisis, mostrado en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para seleccionar los instrumentos de medición que se van a utilizar.

Tabla 7. Análisis de los distintos métodos de medición.

EQUIPO	DISPONIBILIDAD	TIPO DE DETECTOR	ARTÍCULOS	LECTURA DIRECTA
Detector de trazas	SI	PASIVO	SI	NO
Electretes	SI	PASIVO	SI	NO
Carbón activado	SI	PASIVO	SI	NO
Lucas Cell	NO	ACTIVO	SI	SI
Alphaguard	NO	ACTIVO	SI	SI
RAD-7	SI	ACTIVO	SI	SI

Una vez realizado el análisis de los distintos métodos de medición, se han seleccionado aquellos detectores que sean más compatibles para los ensayos a realizar en el presente estudio.

El detector de trazas es un equipo con una alta fiabilidad y gran uso para la medición del radón según los artículos que se han encontrado. Además, se puede adaptar para la medición de los materiales de construcción y está disponible en el instituto de investigación.

El ISIRYM consta con la acreditación de medición de la concentración en aire a partir de los electretes, y, además, puede adaptarse la metodología para medir exhalación de materiales de construcción por lo que sería un método fiable.

El carbón activado tiene la desventaja que varía mucho según la humedad y es menos fiable que el resto de los equipos. Asimismo, no se dispone de procedimientos para la medida de materiales de construcción

La cámara de centelleo y el equipo alphaguard no se encuentran disponibles en el laboratorio.

Por último, el RAD-7 es un detector activo, con el que se pueden obtener una lectura directa de las concentraciones y también se puede realizar un montaje para que se adapte a la medición de los materiales de construcción.

Por lo tanto, los instrumentos de medición que se escogen son: el detector de trazas, los electretes y el RAD-7. Además, escogiendo estos tres métodos se pueden realizar una comparación de los métodos pasivos con los activos.

4.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Una vez seleccionados los métodos de medición que se van a utilizar, se procede a explicar más detalladamente el principio de funcionamiento de cada uno de ellos.

4.3.1. Electretes

El electrete está formado por un disco de Teflón (polímero) el cual está eléctricamente cargado. El voltaje inicial de uno nuevo es aproximadamente de 700 -780 V. Existen dos tipos de electretes: *short-term* (ST) y *long-term* (LT). Los ST son más sensibles y se suelen utilizar para un tiempo de exposición más corto, mientras que los LT son menos sensibles y se utilizan para tiempos de exposición más largos. Se diferencian por el código (empieza por S o por L) y por el color (azul o rojo), tal y como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Electrete short-term (T) a la izquierda y long-term (LT) a la derecha. (fuente: elaboración propia).



Figura 9. Disco de Teflón de un electrete. (fuente: elaboración propia).

El procedimiento de medida se basa en enroscar el electrete en una cámara que permite la difusión del gas radón hacia su interior. En dicha cámara, el radón y sus descendientes se desintegran produciendo liberación de partículas Alpha y beta, que chocan con las moléculas de aire provocando su ionización. Los iones resultantes con carga negativa son atraídos por la superficie del electrete, cargado positivamente, causando la reducción del voltaje. La diferencia de voltaje entre la medida inicial y la final determina la concentración de R_n .

Existen distintas configuraciones de cámara-electrete: cámaras S, L, L-OO o H y electretes ST (*short term*) o LT (*long term*). Para este proyecto se ha seleccionado la cámara S y el electrete ST, ya que se utilizan para cortos periodos de tiempo a rangos de concentraciones esperados, que son, relativamente bajos.

La cámara S consta de un volumen de 210 mL y tiene integrado un mecanismo de encendido/apagado (ON/OFF), el cual permite cerrar la cámara para que no entre aire y los iones lleguen a la superficie del electrete, tal y como se muestra en la Figura 10. Por el contrario, cuando la cámara está abierta permite la entrada de aire haciendo que los iones negativos producidos por el radón se sitúen en la superficie

del electrete produciendo una disminución del voltaje. El tiempo de exposición para electretes short es de 2 a 7 días.



Figura 10. En la imagen a) se muestra una cámara S cerrada y en la imagen b) se muestra en posición abierta. (fuente: elaboración propia).

4.3.2. Trazas

Las trazas son un método pasivo para medir la concentración de radón en el aire. Están formadas por una cámara cilíndrica la cual tiene en su interior un polímero de plástico antiestático (CR39). La cámara tiene unas oberturas por las cuales se difunde el aire y llega hasta el polímero, que es sensible a las partículas alfa emitidas por el radón. Estas producen unas trazas en el plástico, que posteriormente se recuentan para obtener de manera indirecta la concentración de radón. En la Figura 11 se muestra una imagen de una traza.



Figura 11. Imagen de una traza. (fuente: elaboración propia).

El detector de trazas se coloca donde se quiere medir la concentración de radón. El periodo de medición para este método es largo, pues para ofrecer un buen resultado se tienen que dejar un total de 3 meses, que puede ser extendido hasta 6 meses. Se puede acortar este tiempo dejándolas al menos 20 días (Radosys, 2013), siempre y cuando se tenga en cuenta la imprecisión.

Una vez ha transcurrido el periodo de medición las trazas se tienen que revelar. El procedimiento de revelado consiste en extraer el polímero que hay dentro de la cámara y añadirlo en un “slide”, que es un acople para insertar el polímero y poder tratarlo posteriormente. El “slide” se añade en un equipo con un carrusel al cual se le aplica un baño de sosa caustica (1 Kg de NaOH y 4 L de H₂O) a una temperatura de 90°C y se deja reaccionando unas 5 horas. Este baño se realiza para que las trazas que se han formado por las desintegraciones alfa del radón se agranden y sean más fácil de contabilizar. Seguidamente, se realiza un baño de neutralización con ácido acético (60 mL de ácido acético y 4.350 L de agua destilada) durante una 1 hora para que el proceso abrasivo de la sosa finalice. Finalmente, se lavan los detectores con H₂O destilada para eliminar cualquier resto de ácido. El equipo donde se produce el proceso de revelado se muestra en la Figura 12 a).



a)



b)

Figura 12. En la imagen a) se muestra el equipo donde se produce el revelado de las trazas y en la imagen b) se muestra el microscopio electrónico. (fuente: elaboración propia).

Una vez se han realizado los baños para agrandar las “huellas” que hay en el polímero se procede a realizar el conteo de estas. Para ello, se hace uso de un microscopio (Figura 12 b)) donde se inserta el “slide”. Finalmente, con ayuda de un software, se inserta la fecha de inicio y final de la medición y el programa devuelve parámetros como la densidad de trazas (trazas/cm²), la concentración de radón en el aire (Bq/m³) o la incertidumbre de la medida (Bq/m³).

4.3.3. RAD-7

El RAD-7 es un método continuo utilizado para medir la concentración de radón en el aire en función del tiempo. Consta de un detector alfa de estado sólido, un material semiconductor que convierte la radiación alfa emitida por el radón en señales eléctricas. A partir de las mediciones se pueden observar los datos de la concentración del radón respecto al tiempo y otros parámetros como la incertidumbre o la humedad. En la Figura 13 se muestra una imagen del detector RAD-7.



Figura 13. Detector activo RAD-7. (fuente: elaboración propia).

El RAD-7 tiene en su interior una cámara con un volumen de 0.7 litros y un detector alfa de estado sólido, un material semiconductor (silicio). Mediante corriente eléctrica se carga el conductor interno creando un campo eléctrico. Convierte la radiación alfa directamente en una señal eléctrica. Cuando un núcleo de ^{222}Rn se desintegra deja su núcleo transformado (Po-218) como un ion con carga positiva. El campo eléctrico existente en el interior impulsa el ion hacia el detector, donde se adhiere. La partícula alfa generada en la desintegración del Po-218 entra en el detector y produce señal eléctrica (con un 50% de probabilidad). Las desintegraciones beta posteriores no son detectadas.

El RAD-7 amplifica, filtra y ordena las señales que recibe para obtener el espectro y saber la concentración de radón que hay en un determinado instante (DURRIGE Company Inc., 2014)

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

La metodología que se ha seguido para el desarrollo del presente TFM se muestra en la Figura 14 mediante un diagrama de bloques con los distintos pasos.



Figura 14. Diagrama de bloques de la metodología a seguir.

5.1. SELECCIÓN DE MATERIALES.

En el departamento SENUBIO se disponía de un listado de piezas con geometría en forma de prisma de distintos materiales de construcción. Cada uno de los materiales tenían dos tamaños diferentes, un tamaño grande y uno pequeño de aproximadamente $(19 \times 19 \times 2) \text{ cm}^3$ y $(6 \times 6 \times 2) \text{ cm}^3$, respectivamente. A continuación, en la Tabla 8 se muestra un listado con todos los materiales de construcción que se disponían en el ISIRYM.

Tabla 8. Listado de los materiales de construcción.

Tipo de Material	Numeración	Nombre	Tipo de Material	Numeración	Nombre
Mármol	1	Rojo alicante	Porcelánico	23	Infinity / calacata
	2	Crema marfil		24	Laminan / grey
	3	Verde india		25	Artíc Wight
	4	Cenia	Neolith	26	Nero
	5	Caliza capri		27	Lauren
	6	Blanco macael	Dekton	28	Kelia
	7	Rojo Cehegin		29	Doomos
	8	Serpegiante		30	Aura
	9	Emperador	Baldosa cerámica	31	Gres porcelánico super blanco esmaltado
	10	Daino	Ladrillo	32	Rojo ancho
	11	Carrara		33	Rojo fino
Granito	12	Sudáfrica	34	Bloque hormigón	
	13	Blanco perla	Yeso	35	Lámina pladur
	14	Rosa porriño	Dekton	36	Micron
	15	Azul vizag		37	Daze kc
	16	Crema julia		38	Lunar 22
	17	Desconocido	39	Trilium	
	18	Negro absoluto	Silestone	40	Alpina White 08
19	Blanco zeus	41		Gris Expo	
20	Gris Expo	42		Etherea Dusk	
Silestone	21	Rougui	43	Stellar grey	
Porcelánico	22	Ascale/blanco absoluto	Dekton	44	Keyla

Inicialmente, se realizó una selección previa para saber cuál de estos materiales podría tener más contenido en radio y, por lo tanto, exhalar más cantidad de radón. Para ello, se han usado los datos de la caracterización radiológica de los materiales de construcción realizados por parte del Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LRA) para el Proyecto Nacional anteriormente descrito.

En la caracterización por parte de LRA se ha utilizado la espectroscopía gamma a través de un detector de Germanio. Para poder usar el detector de germanio y obtener unos buenos resultados se molidieron las muestras con un molino de bolas hasta conseguir partículas inferiores a $500 \mu\text{m}$. A partir

del detector de Germanio, se han obtenido las concentraciones de actividad de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en Bq/kg.

La Unión Europea (UE) estableció un índice de actividad radiactiva (I) que calcula la actividad de los radionucleidos a partir de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{A(^{226}\text{Ra})}{I(^{226}\text{Ra})} + \frac{A(^{232}\text{Th})}{I(^{232}\text{Th})} + \frac{A(^{40}\text{K})}{I(^{40}\text{K})} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo, A(x) la actividad media medida en el material (Bq/Kg) e I(x) los valores del índice de riesgo radiactivo (Bq/kg).

En el caso de España se utilizan los valores mostrados en la Ec.6 para los índices de riesgo radiactivos, que son 300, 200 y 3000 para el ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente. Además, según la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, en el Artículo 75, apartado 1, el índice de radiación gamma en los materiales de construcción, calculado según la Ec.6, debe ser menor a 1.

$$I = \frac{A(^{226}\text{Ra})}{300} + \frac{A(^{232}\text{Th})}{200} + \frac{A(^{40}\text{K})}{3000} \quad \text{Ec. 6}$$

A continuación, se muestran unas gráficas con los índices de actividad radiactiva (I) calculados para los mármoles (Figura 15), los granitos (Figura 16) y otros tipos de materiales (Figura 17), que se han obtenido en el Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021).

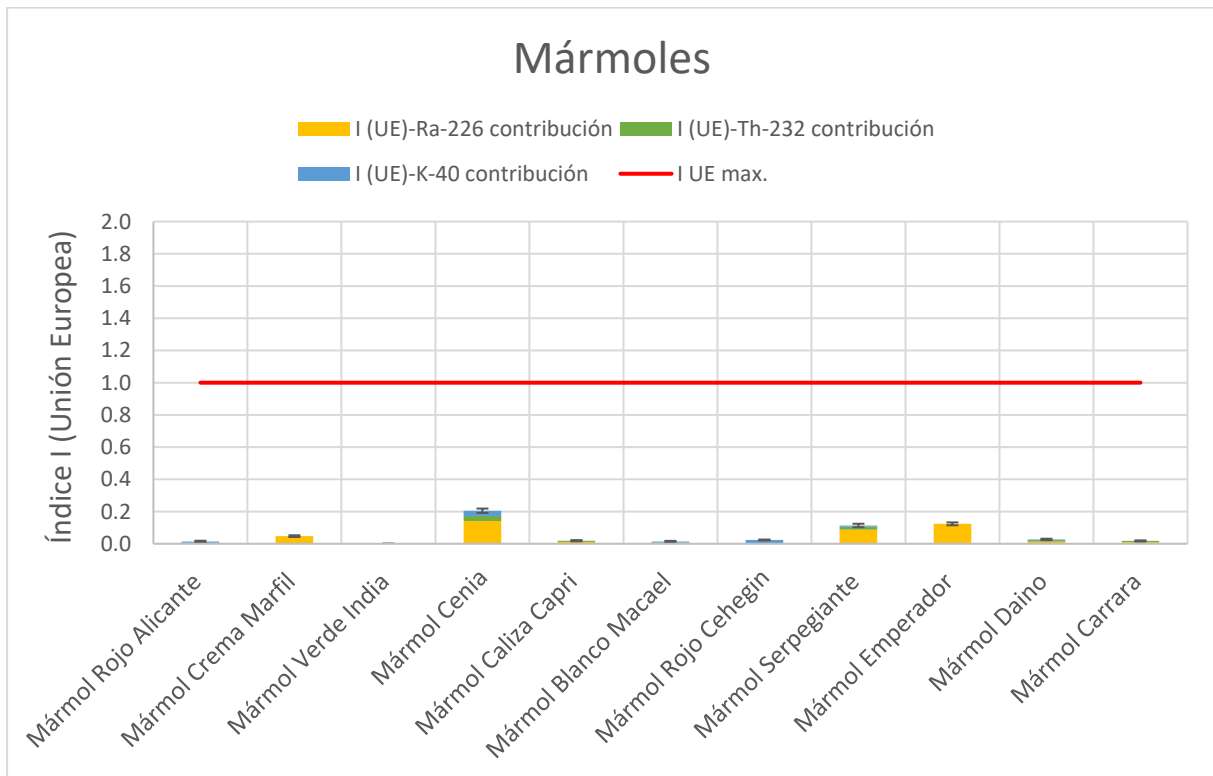


Figura 15. Índice de radiación en los mármoles. (Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).

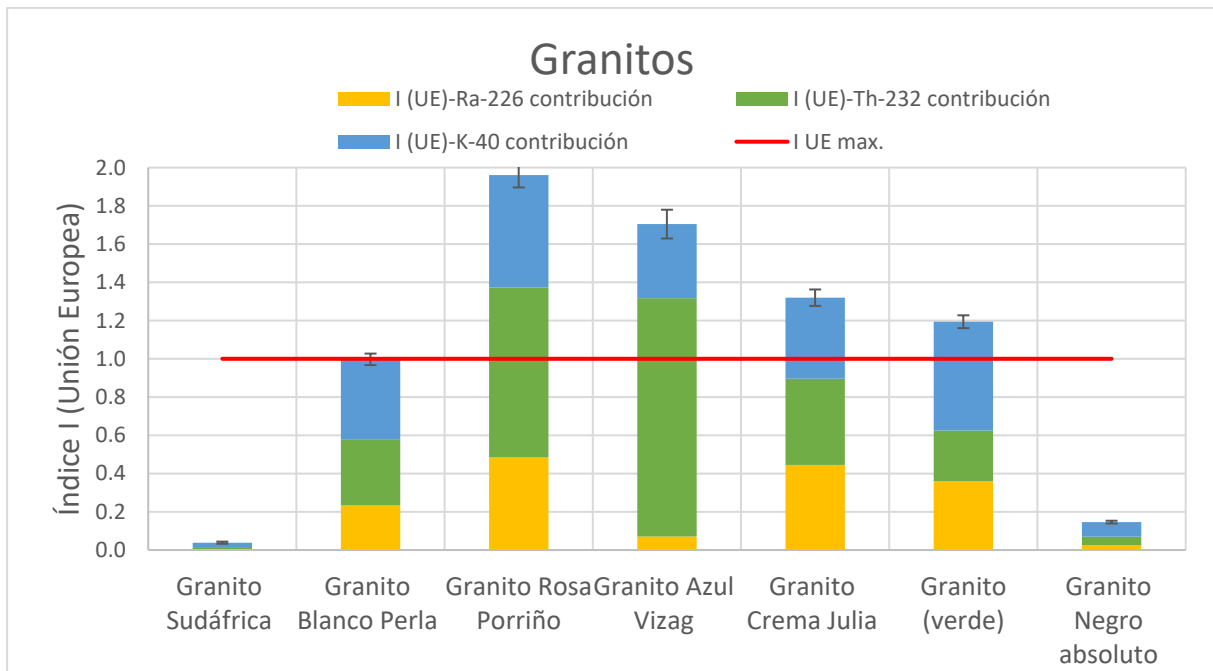


Figura 16. Índice de radiación en los granitos. (Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).

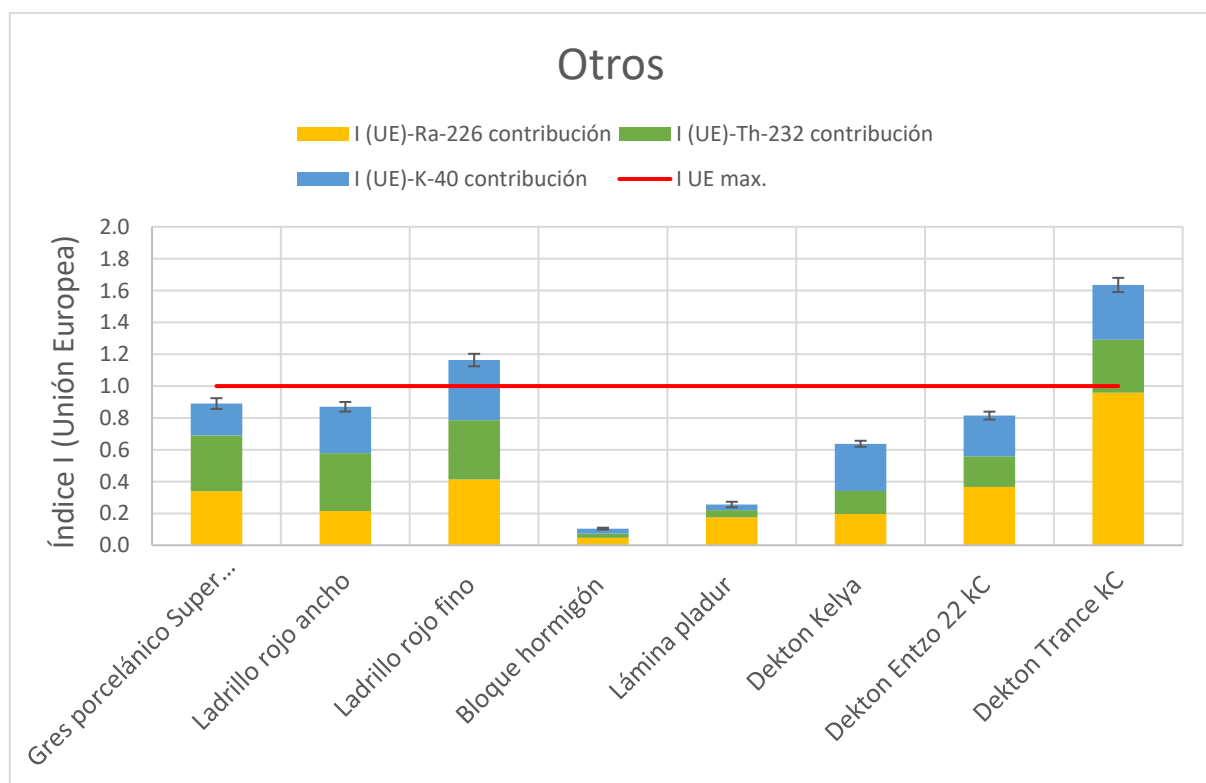


Figura 17. Índice de radiación en otros tipos de materiales. (Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021)).

En la Figura 15 se puede observar que el índice de las piezas mostradas es muy bajo y, por lo tanto, la cantidad de radón que exhalarán será muy baja.

En la Figura 16, los materiales de construcción que sobrepasan el índice de actividad radiactiva en 1 (línea horizontal roja) son los que más cantidad de radón deberían exhalar y pueden ser perjudiciales si no se les aplica unas buenas medidas de seguridad. En la Figura 17, el “Ladrillo Rojo fino” y el “Dekton Trance” también superan el índice de actividad radiactiva.

Es muy importante recalcar que la caracterización de los materiales de construcción es una primera referencia a la cantidad de radón que podrían exhalar. En este procedimiento, el material está pulverizado y no se tiene en cuenta los barnices o pinturas que puede tener la baldosa inicialmente. Por ello, es necesario realizar las medidas de la tasa de exhalación, porque se puede dar la situación de que la caracterización proporcione resultados de grandes cantidades de radón, mientras que el cálculo de la tasa de exhalación sea muy bajito a causa de los recubrimientos que se le han aplicado a la pieza que no dejan escapar el radón de esta.

Finalmente, se han escogido para realizar los principales ensayos los materiales con un índice alto que supera el 1 y que, además, son muy utilizados en las viviendas españolas, que son: el “Granito Rosa Porriño”, el “Granito Azul Vizag” y el “Granito Crema Julia”. A continuación, se muestran fotos de las tres piezas en la Figura 18, la Figura 19 y la Figura 20.



Figura 18. Muestras del material de construcción “Granito Rosa Porriño” (fuente: elaboración propia)



Figura 19. Muestras del material de construcción "Granito Azul Vizag" (fuente: elaboración propia).



Figura 20. Muestra del material de construcción "Granito Crema Julia" (fuente: elaboración propia).

5.2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y MODELIZACIÓN.

El propósito de este estudio es presentar un modelo corregido a corto plazo que pueda acortar la duración de las pruebas y mejorar la precisión del modelo existente para estimar la tasa de exhalación de radón de los materiales de construcción utilizando el método de cámara cerrada.

El método de cámara cerrada consiste en colocar una muestra de prueba en una cámara cerrada y medir la concentración de radón acumulada en la cámara. Se ha utilizado en numerosos estudios debido a su dificultad técnica relativamente baja. Las pruebas a largo plazo basadas en el método de cámara cerrada estiman la tasa de exhalación de radón utilizando la concentración de radón en equilibrio acumulada en la cámara cerrada, lo que resulta en resultados de prueba altamente precisos. Sin embargo, como las pruebas a largo plazo tardan >20 días, la estimación inmediata de la tasa de

exhalación de radón de los materiales de construcción que se aplicarán en el campo es un desafío, y las pruebas son costosas. Para abordar estas limitaciones de las pruebas a largo plazo utilizando el método de cámara cerrada, estudios previos han introducido y aplicado la prueba a corto plazo.

A continuación, se van a desarrollar los procedimientos de medición para cada uno de los distintos métodos utilizados y se describirá cómo se ha realizado la modelización para el cálculo de la tasa de exhalación.

5.2.1. Electretes

Procedimiento de medición

Los electretes son un método de medición pasivo, tal y como se ha explicado anteriormente. Se han utilizado los de tipo "ST" con cámaras tipo "S". Se ha realizado el procedimiento tal y como se indica en los manuales del comerciante ε-PERM.

El procedimiento de medición utilizando los electretes se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 21.

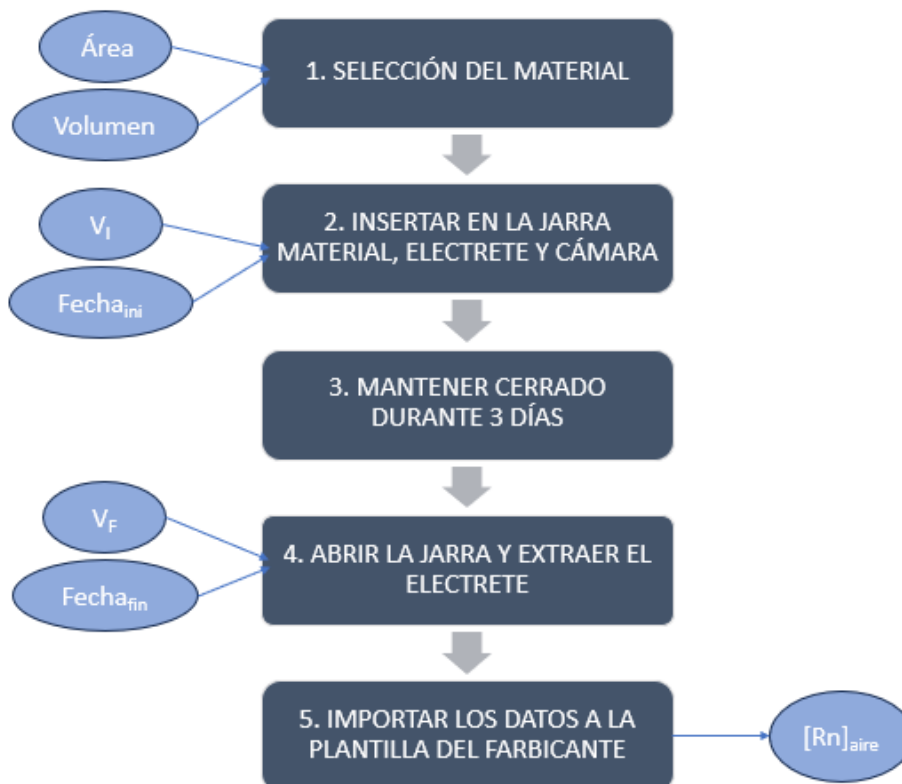


Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir de los electretes.

Los materiales necesarios para realizar la medición son los que se detallan a continuación:

- Una jarra de vidrio de 4 L de capacidad con un collar de goma sellable para que no se produzcan pérdidas de radón.
- Una muestra del material de construcción con unas medidas de (6x6x2) cm, aproximadamente, para que se pueda insertar dentro de la jarra de vidrio.

- Una cámara ϵ -PERM de tipo "S".
- Un electrete short-term (ST).
- Un lector de voltaje.

Una vez se dispone de todos los materiales, se añade la muestra seleccionada en el interior de la jarra de vidrio justo en el medio y se coloca en vertical, como se puede observar en la Figura 22, para que así el material pueda exhalar por todas las caras. Seguidamente, se escoge un electrete "ST", se anota el código y se lee el voltaje inicial antes de meterlo dentro de la jarra. Se inserta el electrete dentro de una cámara "S" con la posición en "OFF" para que no pueda entrar el Radón en ella y no se descargue antes de la medición. Posteriormente, se cuelga la cámara en la tapa de la jarra y se abre la cámara en posición "ON". Seguidamente, se cierra la tapa herméticamente con ayuda del collar y se anota la fecha y hora de inicio de medición.

El radón que exhala el material de construcción se almacena en el recipiente durante 3 días y va descargando el voltaje del electrete. A partir de la concentración de radón medida en el aire del recipiente se infiere la exhalación procedente de la baldosa mediante una ecuación que posteriormente se explica en el modelizado.



Figura 22. Jarra con la muestra a medir y el electrete y su cámara (fuente: elaboración propia)

El tiempo de medición para este procedimiento es de 72 horas (3 días). Una vez transcurrido este tiempo se procede a abrir la tapa hermética, se pone la cámara en posición "OFF" y se extrae el electrete para proceder a su lectura de voltaje final. Se anota la fecha y la hora final de medición.

En la Tabla 9 se muestra un ejemplo de la toma de datos necesaria para el procedimiento de medición.

Tabla 9. Toma de datos necesarios para la medición a partir de electretes.

MUESTRA	CÓDIGO ELECTRETE	FECHA Y HORA INICIAL	FECHA Y HORA FINAL	VOLTAJE INICIAL	VOLTAJE FINAL

Finalmente, una vez se tienen todos los datos necesarios se calcula la concentración de Rn que hay en el aire a partir de una plantilla ofrecida por el fabricante, donde es necesario añadir todos estos datos.

La concentración de radón en el aire se calcula a partir de la Ec. 7.

$$[Rn] = \left(\left(\frac{(V_I - V_F) - (0.066667 \cdot T)}{CF_{EIC} \cdot T} \right) - (BG \cdot C) \right) \cdot CF_{elev} \quad \text{Ec. 7}$$

Siendo, $[Rn]$ la concentración de Radón en el aire en (Bq/m³); V_I el voltaje inicial del electrete en (V); V_F el voltaje final del electrete en (V); T el tiempo de exposición en (días); CF_{EIC} un factor de calibración; BG el valor de fondo gamma en (nGy/h); CF_{elev} el factor de corrección por la elevación y C una constante que depende del tipo de cámara y electrete.

El tiempo de exposición (T) se calcula según Ec. 8.

$$T = Fecha_{fin} - Fecha_{ini} \quad \text{Ec. 8}$$

Siendo, $Fecha_{ini}$ la fecha cuando se empieza la medición y $Fecha_{fin}$ la fecha cuando termina la medición.

El factor de calibración viene dado por la ecuación Ec.7.

$$CF_{EIC} = A + \left(B \cdot \ln \left(\frac{V_I - V_F}{2} \right) \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Siendo A y B los coeficientes dados por el fabricante para cada tipo de configuración electrete-cámara. En la Tabla 10 se muestran los valores utilizados para el sistema de medida SST:

Tabla 10. Constantes para un electrete ST y una cámara S para el cálculo de la concentración de radón.

A	0.314473
B	0.260619
C	0.087

El valor del fondo gamma del laboratorio (BG) se fija en 80 nGy/h.

Por último, el valor del factor de corrección para la elevación (CF_{elev}) se calcula de la siguiente manera:

$$CF_{elev} = 0.79 + \left(\frac{6 \cdot Elevación(pies)}{100000} \right)$$

Pero si la elevación donde se realiza la medida es menor de 4000 pies el factor de corrección es igual a 1 (Rad Eelc Inc, 2022).

Cálculo matemático de la exhalación

En la modelización para la obtención de exhalación a partir de los electretes se va a seguir el artículo de Kotrappa, P., & Stieff, F. (2008), el cual utiliza las siguientes ecuaciones.

El cálculo de la concentración para cualquier instante de tiempo viene representado de la siguiente manera:

$$[Rn] = \frac{(E \cdot A)}{V \cdot 0.1814} \cdot (1 - e^{-0.1814 \cdot T}) \quad \text{Ec. 10}$$

Siendo, $[Rn]$ la concentración de radón en el aire en (Bq/m³); E la tasa de exhalación de la muestra en (Bq/m²·d); A la suma de todas las áreas de la muestra del material (m²); V el volumen libre de aire que hay dentro del recipiente (m³); 0.1814 es el valor de la constante de desintegración del radón (días⁻¹) y T el periodo de medición (días).

Para el cálculo del volumen del aire libre se tiene que restar al volumen de la jarra el volumen que ocupa la cámara S y el volumen del material de construcción.

$$V_E = V_{frasco} - V_{cámara} - V_{material} \quad \text{Ec. 11}$$

Siendo V_E el volumen del aire libre dentro de la jarra (m³); V_{frasco} el volumen de la jarra (m³); $V_{cámara}$ el volumen de la cámara (m³) y $V_{material}$ el volumen del material de construcción (m³).

La concentración que se obtiene a partir de los voltajes (inicial y final) y el tiempo de medición con ayuda del software del fabricante es la concentración media integrada en el tiempo. Por lo tanto, la Ec. 10 no sirve, ya que es para un determinado periodo de tiempo. Si se quisiera utilizar esa ecuación la concentración media integrada se debería multiplicar por dos para así obtener la concentración real de radón que hay en el periodo de 3 días.

Sin embargo, según Kotrappa, P., & Stieff, F. (2008) se puede adecuar la Ec. 10 integrando y dividiendo por el tiempo total, lo que permite calcular una concentración media después de una acumulación de un cierto periodo de tiempo. Realizando dichos cálculos, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$[Rn]_{media} = \frac{(E \cdot A)}{V_E \cdot 0.1814} \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - e^{-0.1814 \cdot T}}{0.1814 \cdot T} \right) \right] \quad \text{Ec. 12}$$

Se nombra por comodidad al término dentro de los corchetes K , como se muestra en la Ec. 13.

$$K = 1 - \left(\frac{1 - e^{-0.1814 \cdot T}}{0.1814 \cdot T} \right) \quad \text{Ec. 13}$$

Y, despejando la tasa de exhalación, se obtiene la siguiente ecuación:

$$E \cdot A = \frac{V_E \cdot 0,1814}{K} \cdot [Rn]_{media} \quad \text{Ec. 14}$$

Dividiendo por el área, se obtiene la tasa de exhalación en Bq/m²·día.

$$E = \frac{V_E \cdot 0,1814}{K \cdot A} \cdot [Rn]_{media} \quad \text{Ec. 15}$$

5.2.2. Trazas.

Procedimiento de medición

A continuación, en la Figura 23 se muestra un diagrama de bloques con los principales pasos a seguir para el procedimiento de medición a partir de trazas y posteriormente, se detalla el proceso.



Figura 23. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir de trazas.

En el procedimiento de medición de las trazas se utiliza una jarra de vidrio en la cual se inserta el material de construcción igual que en el procedimiento de los electretes.

A continuación, se detallan los materiales y equipos necesarios para el procedimiento de medición de las trazas:

- Una jarra de vidrio con 4 litros de capacidad con un collar de goma sellable para que no se produzcan pérdidas de radón.
- Una pieza de material pequeña (6x6x2) cm³ aproximadamente, la cual se pueda insertar dentro de la jarra vacía.
- Soportes para las cámaras de las trazas. Estos soportes están formados por un hilo de metal que se ha enrollado y se le ha dado forma para sujetar las cámaras dentro de la jarra y con la finalidad de que estén todas a la misma altura. Los hilos se enganchan a la tapa de la jarra de vidrio.

Estudio de la exposición al Radón 222 exhalado a partir de los materiales de construcción empleados en viviendas.

- 3 cámaras con trazas, de esta forma la medida será más precisa.
- 1 kg de NaOH, 8 Litros de agua destilada y 60 mL de ácido acético para realizar el revelado de las trazas.
- Un microscopio electrónico y un equipo para realizar el revelado.

En la Figura 24 se muestra una imagen de una medición del material de construcción a partir del procedimiento por trazas.



Figura 24. Jarra con el material de construcción y las trazas. (fuente: elaboración propia)

El procedimiento experimental se basa en la identificación de cada traza, que tiene un código específico que sirve para lectura mediante el microscopio, después de su revelado.

Inicialmente, se cogen tres trazas y se anotan sus códigos junto con la pieza de material de construcción que se va a medir. Se inserta la pieza dentro de la jarra de vidrio con una posición vertical para que pueda exhalar por todas las caras. Las trazas se colocan en los soportes de metal, y estos se enganchan a la tapa de la jarra. Se cierra la tapa y se sella. Seguidamente, se anota la fecha y la hora de inicio de la medición.

Finalizado el periodo de exposición, se extraen los tres detectores de trazas y se anota la fecha y hora final. En la Tabla 11 se muestra un ejemplo de toma de datos para realizar el procedimiento de medición por trazas.

Tabla 11. Toma de datos para el procedimiento de medición a partir de trazas.

MUESTRA	CÓDIGO TRAZA	FECHA Y HORA INICIAL	FECHA Y HORA FINAL

Seguidamente, se procede a hacer el revelado tal y como se ha explicado en el punto de instrumentación y se lee la concentración de radón en el aire a partir del software del fabricante.

Para el cálculo de la concentración de radón a partir de las trazas, el software lo que realiza es un conteo de todas las huellas que se han producido a partir de radón, y con ello obtiene una densidad de trazas, a partir de esta, calcula la concentración siguiendo la siguiente ecuación (Ec. 16).

$$[Rn] = \frac{\rho}{k \cdot T} \quad \text{Ec. 16}$$

Siendo, ρ la densidad de trazas en (traza/cm²); k el factor de calibración de la cámara en ((trazas/cm²) / (Bq·d/cm³)) y T el período de exposición en (días).

Cálculo matemático de la exhalación.

Para modelizar la exhalación a partir de los datos que se obtienen en las trazas se utiliza el software del comerciante y unas ecuaciones que se explicarán a continuación.

Una vez se realiza todo el procedimiento de medición, se revelan las trazas y el software del comerciante ofrece la concentración de radón en el aire, con la cual se procede a calcular la tasa de exhalación.

Para el cálculo de la exhalación se hace uso de la siguiente ecuación (Ec. 17):

$$E_m = \frac{\rho \cdot V \cdot \lambda + [Rn]_0 \cdot k \cdot V \cdot (e^{-\lambda \cdot T} - 1)}{\frac{m \cdot k}{\lambda} \cdot (e^{-\lambda \cdot T} + T \cdot \lambda - 1)} \quad \text{Ec. 17}$$

Siendo, E_m la exhalación de radón másica (Bq/kg·d); ρ la densidad de trazas (trazas/cm²); V el volumen de aire libre que hay dentro de la jarra (cm³); λ la constante de desintegración del radón (d⁻¹); $[Rn]_0$ la concentración inicial de radón que hay en la jarra; k es el coeficiente de calibración de la cámara ((trazas/cm²) / (Bq·d/cm³)), T el periodo de tiempo que han estado midiendo las trazas (días) y m la masa de la muestra (kg).

Para obtener el valor del volumen de aire libre que hay dentro de la jarra de vidrio se tiene que restar el volumen de la pieza del material.

$$V_T = V_{frasco} - V_{material} \quad \text{Ec. 18}$$

Siendo V_T el volumen del aire libre dentro de la jarra en (m³); V_{frasco} el volumen de la jarra en (m³) y $V_{material}$ el volumen del material de construcción en (m³).

A partir de los resultados que ofrece el software se puede calcular el coeficiente de calibración de la cámara como se muestra en la Ec. 20:

$$\rho = k \int_0^T [Rn](t) \cdot dt \quad \text{Ec. 19}$$

$$k = \frac{\rho}{[Rn] \cdot t} \quad \text{Ec. 20}$$

Por lo tanto, a partir de la Ec. 17 se puede obtener la exhalación en (Bq/kg·d). El último paso es cambiar las unidades a Bq/m²·d para poder compararla con las exhalaciones que se han obtenido por el resto de los métodos.

5.2.3. Detector en continuo RAD-7.

Procedimiento de medición

En este apartado se va a desarrollar el procedimiento de medición para el RAD-7. Primero se van a detallar los materiales o equipos necesarios para su puesta en marcha y seguidamente el procedimiento que se sigue para la medición de la concentración del radón.

A continuación, se muestra en la Figura 25 un diagrama de bloques que muestra los pasos a seguir en el procedimiento de medición de radón a partir del RAD-7.



Figura 25. Diagrama de bloques del procedimiento de medición a partir del RAD-7.

Para la medición mediante el detector RAD-7 se necesitan los siguientes materiales:

- Un bidón de polietileno con una capacidad de 30 litros, el cual tiene una tapa con un cierre de ballesta para que sea lo más hermético posible y se produzcan el menor número de fugas de radón. Además, se han realizado dos orificios para conectar los tubos por donde pasa el flujo

de aire que va al RAD-7. En los orificios se han incorporado dos tubos de mayor diámetro para acoplar el tubo largo que va al equipo RAD-7 y se han sellado con un termofusible.

- La muestra del material de construcción elegido tiene unas medidas de (19x19x2) cm aproximadamente. Se utiliza una pieza más grande ya que el recipiente donde está contenida es mayor en este procedimiento.
- En el interior del bidón se dispone de un soporte de metal de 35 cm de altura y con una base cuadrada para apoyar la pieza.
- El equipo de detección del radón 222, el RAD-7.
- Dos filtros que ayudan a mejorar las condiciones para medir, uno que elimina la humedad y otro elimina el polvo o resto de sólidos que pueda contener el flujo de aire.
- Dos tubos que son los encargados de transportar el flujo de aire con radón desde el bidón al RAD-7 y, después de realizar las medidas, retornar el aire al bidón.

A continuación, en la Figura 26 y la Figura 27 se muestran los elementos del montaje.

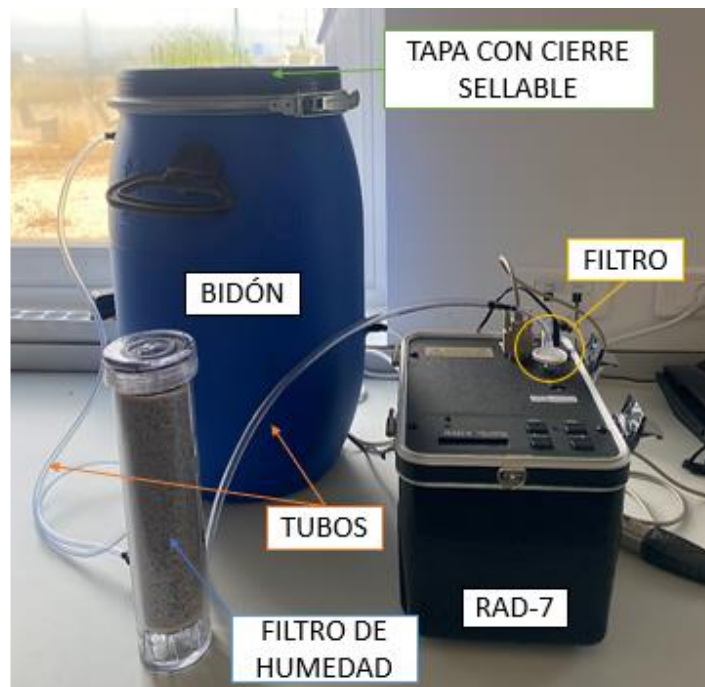


Figura 26. Montaje del equipo para la medición a partir del RAD-7. (fuente: elaboración propia).



Figura 27. Elementos del equipo RAD-7. (fuente: elaboración propia).

El procedimiento de medida se basa en colocar la muestra del material de construcción a analizar sobre el soporte metálico a una altura de 35 cm. Se conectan todos los tubos por los cuales circula el aire, los entrantes y salientes al bidón, al filtro de humedad y al RAD-7. Se cierra el bidón con ayuda de la tapa con ballesta, se conecta el detector a la corriente y se programa la configuración.

Para realizar las mediciones con el RAD-7 es necesario configurarlo inicialmente. Se selecciona un protocolo para que el equipo mida con intervalos de una hora durante unos 14 días aproximadamente, el ciclo de medición es de una hora para poder conocer la concentración en muchos intervalos y el reciclo se elige "0" para parar el RAD-7 cuando se desee y que no se detenga la medición. Una vez se tiene programada la configuración se pulsa "START" para empezar la medición.

Mediante este procedimiento se crea un circuito cerrado entre el bidón y el detector RAD-7. El aire con radón que ha sido exhalado por la pieza del material de construcción circula por los tubos los cuales introducen el aire en el detector. El detector realiza las mediciones y devuelve el aire al interior del bidón, generando un circuito cerrado para que no varíe la concentración. En la Figura 28 se observa el circuito que sigue el aire.

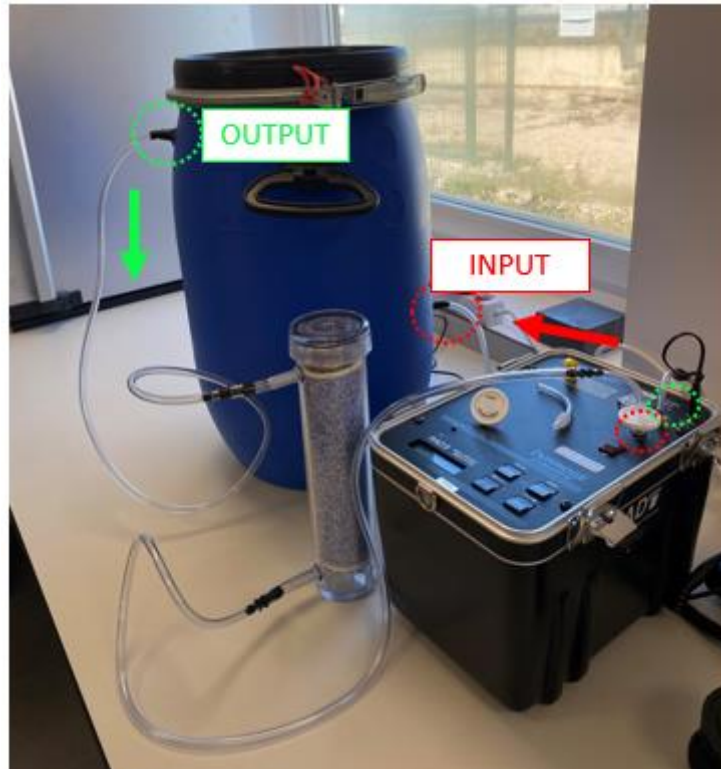


Figura 28. Entradas, salidas y sentido del flujo de aire en el circuito cerrado del RAD-7. (fuente: elaboración propia).

En esta metodología el detector RAD-7 mide un total de 14 días, para así poder observar la curva de crecimiento del Radón-222.

Cálculo matemático de la exhalación

Para procesar los datos obtenidos a partir del RAD-7 se han estudiado 3 modelos del cálculo de la tasa de exhalación.

- Modelo 1: Ajuste integrado.
- Modelo 2: Ajuste simplificado.
- Modelo 3: Ajuste a partir de la pendiente.

Cada uno de estos métodos utiliza distintos parámetros para el cálculo siendo uno muy importante el tiempo de medición de la pieza. En el caso del Modelo 1 y del Modelo 2 se necesita un periodo de medición de unos 14 días, ya que es necesario estudiar la curva de crecimiento del radón y saber cuándo estabiliza. Sin embargo, en el Modelo 3 solo son necesarias las primeras 24 horas de medición. Al utilizar un equipo que necesita estar conectado a la corriente es importante el tiempo, ya que, a un mayor tiempo, un mayor coste de electricidad. Además, si se reduce el tiempo de medición el procedimiento es más eficiente. Por ello, es interesante saber si los tres métodos coinciden en los resultados finales o se desvían entre sí para seleccionar así el método adecuado.

A continuación, se van a explicar detalladamente cada uno de los modelos estudiados.

MODELO 1: Ajuste integrado

El Modelo 1 consiste en ajustar en una curva los valores de la concentración experimental frente al tiempo que se recogen del ensayo con el RAD-7 para 14 días de medición. La ecuación que se utiliza se ha obtenido del artículo de Park et al. (2023).

$$[Rn](t) = [Rn]_0 \cdot e^{-(\lambda_d + \lambda_l) \cdot t} + \frac{E}{V_{RAD-7}} + \lambda_l \cdot [Rn]_{background} \cdot \frac{1}{(\lambda_d + \lambda_l)} \cdot (1 - e^{-(\lambda_d + \lambda_l) \cdot t}) \quad \text{Ec. 21}$$

Siendo, $[Rn](t)$ la concentración de radón para un determinado tiempo (Bq/m^3); λ_d la constante de desintegración del radón (h^{-1}); λ_l la constante de pérdidas del bidón (h^{-1}); E la tasa de exhalación (Bq/h); V_{RAD-7} el volumen del aire libre dentro del bidón (m^3); $[Rn]_{background}$ la concentración exterior de radón (Bq/m^3) y t el tiempo para cada medición de la concentración (h).

En el volumen se precisa la medida de aire libre dentro del bidón, por lo tanto, hay que restar el volumen del soporte de metal y el volumen de la pieza del material de construcción.

$$V_{RAD-7} = V_{bidón} - V_{soporte} - V_{material} \quad \text{Ec. 22}$$

Siendo, V_{RAD-7} el volumen de aire libre en (m^3); $V_{bidón}$ el volumen del bidón (m^3); $V_{soporte}$ el volumen del soporte (m^3) y $V_{material}$ el volumen del material (m^3).

En Matlab se han cargado todos los datos de concentración experimental y el tiempo, así como los parámetros que permanecen constantes. Seguidamente, se ha utilizado la función “*lsqcurvefit*” que realiza un ajuste a los valores experimentales ajustándolos a una curva y se ha obtenido el valor de la exhalación.

Con la realización de este ajuste se consigue obtener la exhalación del material de construcción a partir de los datos obtenidos durante 14 días.

MODELO 2: Ajuste simplificado

El Modelo 2 se realiza a partir de la simplificación de la Ec. 21 según el artículo Park et al. (2023). Esta simplificación es posible porque se utilizan los datos una vez se alcanza el equilibrio de la concentración de radón. Esto significa que cuando se llegue a una concentración constante con el tiempo (las pérdidas, el decaimiento del radón y lo que exhala el material ha llegado al estado estacionario) se puede aplicar esta simplificación.

$$E = V \cdot \lambda_d \cdot [Rn]_{EE} + V_{RAD-7} \cdot \lambda_l \cdot ([Rn]_{EE} - [Rn]_{background}) \quad \text{Ec. 23}$$

Siendo, E la tasa de exhalación de radón (Bq/h) y $[Rn]_{EE}$ la concentración de radón en estado estacionario (Bq/m^3).

A partir de este modelo se consigue un cálculo de exhalación mucho más rápido y fácil, pero con la necesidad de realizar una medición durante 14 días para poder observar cual es la concentración en el equilibrio.

MODELO 3: Ajuste a partir de la pendiente

El tercer modelo que permite realizar el cálculo de la exhalación se ha obtenido del artículo “Estimation of radon emanation power: a comparison of different methods” (Stajic, J. M, 2023). El modelo parte de la Ec. 24.

$$[Rn](t) = [Rn]_0 \cdot e^{-(\lambda_d + \lambda_l) \cdot t} + \frac{E_m \cdot m + \lambda_l \cdot [Rn]_{background}}{V_{RAD-7}(\lambda_d + \lambda_l)} \cdot (1 - e^{-(\lambda_d + \lambda_l) \cdot t}) \quad \text{Ec. 24}$$

Siendo, $[Rn](t)$ la concentración de radón a un determinado tiempo (Bq/m^3); $[Rn]_0$ la concentración de radón inicial (Bq/m^3); λ_d la constante de desintegración del radón (h^{-1}); λ_l la constante de pérdida del bidón (h^{-1}); E_m la tasa de exhalación másica ($Bq/kg \cdot h$); m la masa del material (kg); $[Rn]_{background}$ la concentración de radón en el exterior (Bq/m^3); V_{RAD-7} el volumen de aire libre dentro del bidón (m^3) y t cada valor de tiempo para cada concentración calculada (h).

El volumen de aire libre (V_{RAD-7}) se calcula a partir de la Ec. 22. La diferencia respecto al Modelo 1 (Ec. 21) es que en esta se tiene en cuenta la masa del material de construcción.

Se realiza un ajuste para calcular la E_m a partir de la pendiente de la curva (S) de crecimiento del radón durante las primeras 24 horas. Usando la Ec. 26 se obtiene el resultado de la tasa de exhalación de la pieza medida.

$$S = \left(\frac{d[Rn]}{dt} \right)_{t \rightarrow 0} = \left(\frac{E_m \cdot m + \lambda_l \cdot V \cdot [Rn]_{background}}{V(\lambda_d + \lambda_l)} - [Rn]_0 \right) \cdot (\lambda_d + \lambda_l) \quad \text{Ec. 25}$$

$$E_m = \frac{V}{m} \cdot (S + [Rn]_0 \cdot (\lambda_d + \lambda_l) - \lambda_l \cdot [Rn]_{background}) \quad \text{Ec. 26}$$

A partir de este modelo, se obtiene la tasa de exhalación sin la necesidad de tener en funcionamiento el RAD-7 14 días y solo siendo necesario 1 día para conocer la cantidad que exhala la pieza.

Con estos 3 modelos se obtendrán los resultados de los ensayos con los distintos materiales de construcción, comprobando si los 3 llegan a un mismo valor de exhalación o por lo contrario presentan desviaciones.

5.2.4. Cálculo de Dosis

Modelización

En este apartado se describe cómo se ha obtenido el cálculo de la dosis inhalada de radón por una persona a partir del radón exhalado de los materiales de construcción en una habitación.

Para ello, es necesario calcular la concentración de radón que habrá en una habitación utilizando la siguiente ecuación.

$$[Rn]_{indoor} = \frac{1}{V_{habitación} \cdot W} \cdot \sum_{i=1}^k E_{Ai} \cdot A_{ei} \quad \text{Ec. 27}$$

Siendo, $[Rn]_{indoor}$ la concentración de radón que hay dentro de una habitación en (Bq/m^3); $V_{habitación}$ el volumen de la habitación (m^3); W el intercambio de aire que hay en la habitación (h^{-1}); E_{Ai} la tasa de exhalación para cada uno de los distintos tipos de materiales ($Bq/m^2 \cdot h$) y A_{ei} el sumatorio del área de cada una de las caras que exhalan para cada uno de los materiales (m^2).

Una vez se tiene la concentración de radón se procede a calcular la dosis inhalada a partir de la siguiente ecuación.

$$D = [Rn]_{indoor} \cdot t_{exposición} \cdot F \cdot C_D \quad \text{Ec. 28}$$

Siendo, D la dosis inhalada ($mSv/año$); $[Rn]_{indoor}$ la concentración de radón en una habitación (Bq/m^3); $t_{exposición}$ el tiempo de exposición al radón ($h/año$); F el factor de equilibrio y C_D el coeficiente de dosis ($mSv/Bq \cdot h \cdot m^{-3}$).

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar los resultados de la concentración de radón medida en distintos materiales de construcción y su exhalación calculada según las metodologías detalladas en el capítulo anterior. Primero, se mostrarán los resultados de los electretes, seguido de los del RAD-7 y por último los de las trazas. Para cada uno de estos métodos se estudian en concreto dos tipos de materiales: “Rosa Porriño” y “Crema Julia”. Se realizan las comparaciones de las concentraciones, las cuales son un paso intermedio para medir posteriormente la tasa de exhalación de cada uno de los métodos, ya que se acumula radón exhalado de la pieza y conociendo su área y su volumen se determina la exhalación. Finalmente, se calcula la dosis por inhalación en una vivienda construida con los materiales estudiados.

6.1. CÁLCULOS PREVIOS

Para el cálculo de la tasa de exhalación es necesario tener en cuenta las siguientes variables: dimensiones de las piezas, la constante de decaimiento del gas radón y la constante de pérdidas del equipo experimental utilizado para los ensayos, así como las concentraciones iniciales dentro del recipiente y la concentración de fondo de radón. Estos datos se van a especificar a continuación y son los que se van a utilizar para los distintos cálculos.

- Dimensionado de los materiales de construcción.

En la Tabla 12 se muestra el listado de los materiales a ensayar, incluyendo su codificación, el área, el volumen y la masa de las piezas analizadas.

Tabla 12. Medidas de las piezas.

Material	Código	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Masa (g)
Rosa Porriño	14-a	1.22E-02	7.32E-05	196.3
	14-b	1.22E-02	7.32E-05	195.2
	14-A	8.82E-02	7.58E-04	1932.2
Crema Julia	16-a	1.24E-02	7.69E-05	201.5
	16-b	1.24E-02	7.69E-05	203.4
	16-c	1.20E-02	7.20E-05	201.1
	16-B	8.77E-02	7.54E-04	1956.6
Azul Vizag	15-b	1.22E-02	7.32E-05	190.9
	15-B	8.82E-02	7.58E-04	1932.8

Hay distintos trozos del mismo material ya que se cortaron para poder realizar distintas pruebas. Por ello, se ha empleado una codificación que incluye:

- El número hace referencia al tipo de material.
- Las letras minúsculas hacen referencia a que la pieza es la pequeña, es decir, tiene unas medidas de aproximadamente 6x6x2 cm³.
- Las letras mayúsculas hacen referencia a que la pieza es la grande, es decir, tiene unas medidas de aproximadamente 19x19x2 cm³.
- **Constante de decaimiento del radón (λ_d):**

Se ha utilizado la constante de decaimiento en h⁻¹ para calcular la exhalación del RAD-7 y la constante en d⁻¹ para calcular la exhalación de los electretes y de las trazas. En la Tabla 13 se muestran ambos valores.

Tabla 13. Valores de la constante de decaimiento del radón.

λ_d (h ⁻¹)	0.007554
λ_d (d ⁻¹)	0.181296

- **Constante de pérdidas en el bidón (λ_L):**

Para realizar los ensayos de medida de exhalación de radón mediante el detector RAD-7 es necesario determinar la hermeticidad del equipo experimental (bidón) y calcular las posibles fugas del sistema.

Según la ISO 11665-13 (2017), para garantizar la estanqueidad del recipiente, las pérdidas del sistema deben ser inferiores a 0.00378 h⁻¹, la mitad de la constante de desintegración del radón.

El procedimiento experimental se basa en añadir una fuente en el interior del bidón hasta alcanzar concentraciones elevadas, por encima de los niveles de fondo del laboratorio. Se extrae la fuente y se monitoriza la disminución de la concentración de radón en aire en el interior del bidón mediante el detector en continuo Radon Scout Plus. Los resultados obtenidos en condiciones de decaimiento se ajustan a la Ec. 29.

$$[Rn](t) = [Rn]_0 \cdot e^{-(\lambda_d + \lambda_L)t} \quad \text{Ec. 29}$$

Siendo, $[Rn](t)$ la concentración de radón respecto al tiempo en (Bq/m³); $[Rn]_0$ la concentración inicial de radón en (Bq/m³); λ_d la constante de decaimiento del radón en (h⁻¹) y λ_L la constante de pérdidas en el bidón en (h⁻¹).

Este ajuste experimental permite calcular la constante de pérdidas del sistema, λ_L . En la Figura 29, se presentan los resultados experimentales obtenidos en el interior del bidón y el decaimiento teórico, calculado a partir de la Ec. 3029 teniendo en cuenta la concentración inicial, la constante de decaimiento del radón, el tiempo de medición y suponiendo que no hay pérdidas en el sistema.

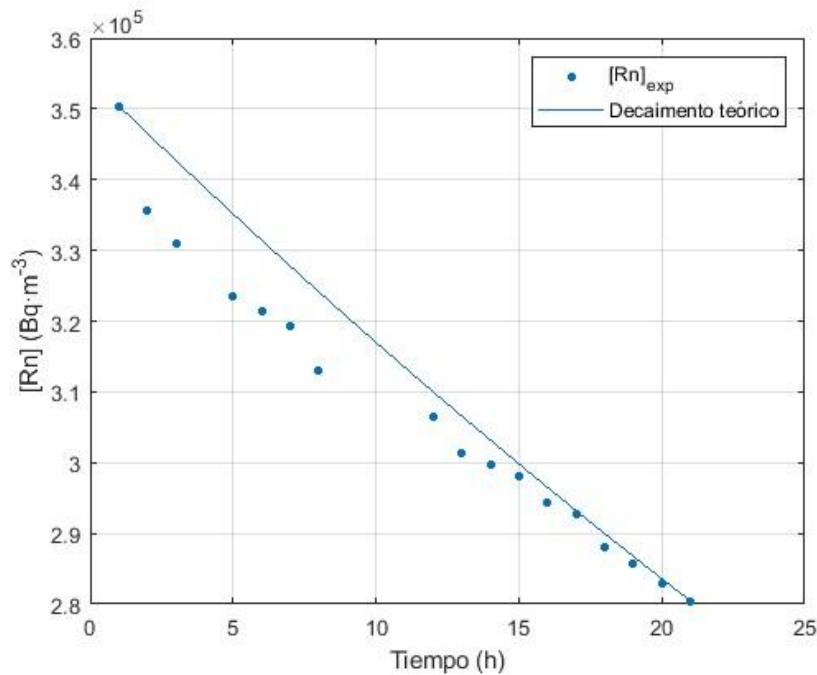


Figura 29. Decaimiento experimental y teórico del radón en el bidón.

En la Figura 29 se puede observar como la concentración de radón en el aire dentro del bidón disminuye desde los $(3.50 \pm 0.035) \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ hasta $(2.8 \pm 0.028) \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. El decaimiento experimental se sitúa por debajo del teórico, debido a las pérdidas que hay en el bidón. Con estos datos y a partir de la Ec. 30 se obtiene el valor de la constante de pérdidas que es de 0.00358 h^{-1} . Por lo tanto, se cumple con la ISO 11665-13.

- **Concentración inicial (C_0) y concentración en el exterior ($C_{\text{background}}$):**

Para el caso de la concentración inicial y la concentración exterior se ha seleccionado el mismo valor, ya que los recipientes donde se producen los ensayos no han sido tratados con un flujo de nitrógeno para eliminar el radón que pueda haber contenido en ellos. Por otro lado, los bidones y las jarras estaban en el laboratorio, y por ello se ha supuesto que la concentración inicial es la misma que la que hay de fondo en el laboratorio, las dos concentraciones tienen un valor de 25.6 Bq/m^3 .

6.2. RESULTADOS ELECTRETES

En este apartado se van a mostrar los resultados de las concentraciones de radón en aire y la tasa de exhalación que se ha obtenido a partir del procedimiento de medición por electretes.

En la Tabla 14, la Tabla 15 y la Tabla 16, se muestra el código, el voltaje inicial (V_i) y final (V_f) del electrete utilizado para la medición, el periodo de medición (tiempo) y las concentraciones de radón en aire obtenidas en cada una de las piezas.

Tabla 14. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Rosa Porriño.

Rosa Porriño					
Código	V_I (V)	V_F (V)	Tiempo (días)	[Rn] (Bq/m³)	Media (Bq/m³)
14a	514	480	3.00	180 ± 12	175.5 ± 12
14a	380	349	2.97	171 ± 12	

Tabla 15. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Crema Julia.

Crema Julia					
Código	V_I (V)	V_F (V)	Tiempo (días)	[Rn] (Bq/m³)	Media (Bq/m³)
16c	431	391	3.02	222 ± 14	242 ± 14.5
16c	432	386	3.01	262 ± 15	

Tabla 16. Resultados de las concentraciones de radón en aire en la pieza Azul Vizag.

Azul Vizag					
Código	V_I (V)	V_F (V)	Tiempo (días)	[Rn] (Bq/m³)	Media (Bq/m³)
15b	618	609	3.02	23 ± 4	15 ± 3
15b	442	436	3.02	7 ± 2	

A continuación, en la Tabla 17, se muestra la tasa de exhalación calculada a partir de las concentraciones que se han obtenido, mediante la ecuación Ec. 15.

Tabla 17. Resumen de los resultados de la tasa de exhalación a partir de los electretes.

Muestra	Código	[Rn] (Bq/m³)	Exhalación (Bq/m²·d)	Media Exhalación (Bq/m²·d)
Rosa Porriño	14a	180 ± 12	43.77 ± 2.6	42.81 ± 2.76
	14a	171 ± 12	41.86 ± 2.93	
Crema Julia	16c	222 ± 14	54.80 ± 3.46	59.85 ± 3.59
	16c	262 ± 15	64.90 ± 3.72	
Azul Vizag	15b	23 ± 4	5.88 ± 1.02	3.83 ± 0.76
	15b	7 ± 2	1.79 ± 0.51	

Como se puede observar en la Tabla 17 la tasa de exhalación más alta es la de la pieza Crema Julia, seguida de la Rosa Porriño y, por último, la pieza Azul Vizag.

6.3. RESULTADOS TRAZAS

En este apartado se van a mostrar los resultados de concentración que han ofrecido los materiales mediante el método de las trazas y el cálculo de la tasa de exhalación.

Como se ha observado en los apartados anteriores (electretes y trazas) el material Azul Vizag reflejaba una muy baja concentración de radón, siendo muy similar a la concentración ambiente. Por lo tanto, se ha decidido que no se realizaría la medición por este método.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos mediante detectores de trazas para la pieza Rosa Porriño (14-a) durante un tiempo de medida de 46 días.

Tabla 18. Resultados de la exhalación a partir de trazas en la pieza Rosa Porriño.

Trazas	Densidad (traza/cm ²)	[Rn] (Bq/m ³)	Exhalación (Bq/m ² ·d)
EA3470	15.72	568.2 ± 45	37.80 ± 3.00
EA3496	15.82	568.2 ± 45	37.80 ± 3.00
EA3527	15.35	551.2 ± 44	36.67 ± 2.94
MEDIA:		562.53 ± 44.66	37.42 ± 2.98

El periodo de medición para la pieza Crema Julia (16-c) a partir del método de las trazas ha sido de un total de 35 días y se han obtenido los siguientes resultados mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de la exhalación a partir de trazas en la pieza Crema Julia.

Trazas	Densidad (traza/cm ²)	[Rn] (Bq/m ³)	Exhalación (Bq/m ² ·d)
EA3085	19.24	951.1 ± 74	67.37 ± 5.26
EA3487	18.45	911.3 ± 71	64.54 ± 5.05
EA3011	19.18	948.2 ± 74	67.17 ± 5.26
MEDIA:		936.86 ± 73	66.35 ± 5.19

6.4. RESULTADOS RAD-7

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de concentración de radón basados en la metodología correspondiente al RAD-7. En este caso, se han comparado tres modelos distintos para obtener la exhalación. A continuación, se van a mostrar los resultados de concentraciones que ha obtenido el RAD-7 y los resultados de la tasa de exhalación que se han obtenido a partir de los distintos modelos.

Rosa Porriño

En primer lugar, se va a mostrar la curva de concentración de radón frente al tiempo que se obtiene a partir de la medición con el RAD-7 con su respectiva incertidumbre para cada concentración de la pieza Rosa Porriño (14-A).

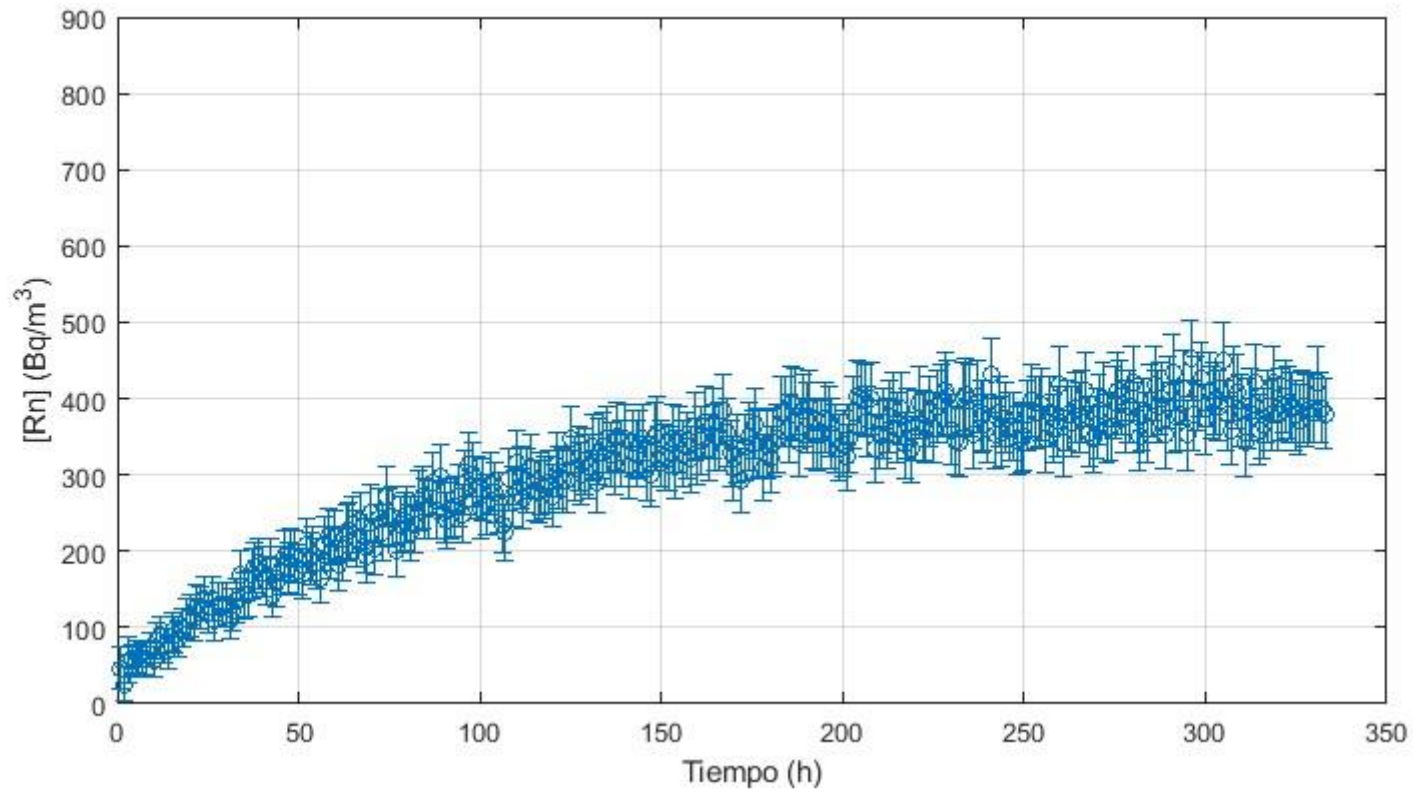


Figura 30. $[Rn]$ frente al tiempo de la pieza Rosa Porriño medida a partir del RAD-7.

Para el cálculo de la exhalación es necesario saber el volumen de aire libre que hay dentro del bidón. A continuación, en la Tabla 20 se muestran todos los volúmenes calculados y el volumen neto de aire libre ($V_{\text{RAD-7}}$).

Tabla 20. Volúmenes para el cálculo de la exhalación.

Volumen (m^3)	
V_{PIEZA}	$7.58 \cdot 10^{-4}$
$V_{\text{BIDÓN}}$	$3.00 \cdot 10^{-2}$
V_{SOPORTE}	$6.48 \cdot 10^{-4}$
$V_{\text{RAD-7}}$	$2.86 \cdot 10^{-2}$

Modelo 1: Ajuste integrado

En la Figura 31 se muestran los resultados de la concentración de radón experimental en forma de puntos azules obtenidos a partir del RAD-7 ($[\text{Rn}]_{\text{exp}}$), la curva teórica representada por una línea azul ($[\text{Rn}]_{\text{t}}$) y el límite superior (L.S.) e inferior (L.I.) de la curva teórica representados por líneas discontinuas de color verde y rojo, respectivamente.

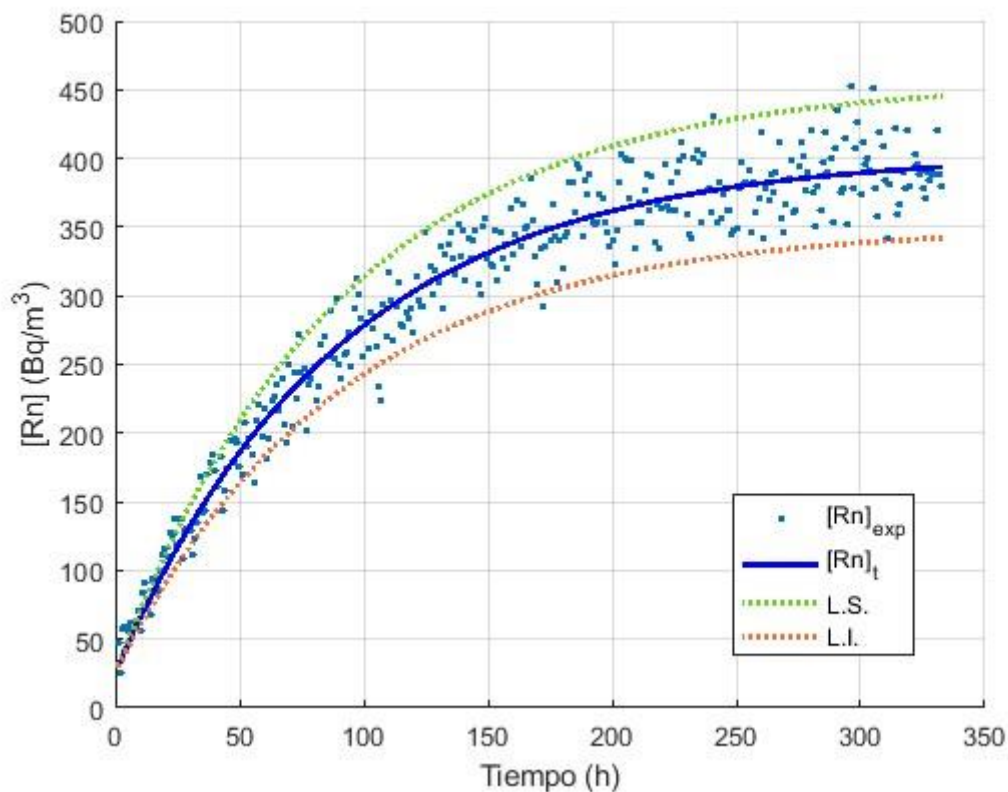


Figura 31. Representación de la $[\text{Rn}]$ experimental y la curva teórica ajustada para la pieza Rosa Porriño.

Como se puede observar en la Figura 31 se muestran los datos de concentración de radón experimentales y su curva ajustada en color azul. A partir del ajuste de esta curva se obtiene la tasa de exhalación, obteniendo el valor óptimo para que el ajuste teórico se parezca lo más posible a los datos experimentales.

Se han calculado el límite superior (LS) y el límite inferior (LI) a partir de la incertidumbre asociada a cada medida. Para el cálculo de estos límites se utiliza el mismo procedimiento anteriormente descrito, solo que utilizando la incertidumbre de las propias concentraciones experimentales.

Por lo tanto, la exhalación a partir del modelo 1 es de: 33.99 ± 4.55 (Bq/m²·d).

Modelo 2: Ajuste simplificado

Para el caso del Modelo 2, el ajuste simplificado, se utiliza la concentración en el estado estacionario ($[Rn]_{EE}$). La concentración de radón forma una curva de crecimiento hasta que llega a una concentración estacionaria, en la que se mantiene aproximadamente estable. En la Figura 32, se representan los datos experimentales de la concentración de radón mediante puntos azules y tres líneas discontinuas que representan la concentración media de radón para el estado estacionario, siendo la azul para los datos reales ($[Rn]_{EE}$), y el verde y rojo para el límite superior ($[Rn]_{EELS}$) e inferior ($[Rn]_{EELI}$), respectivamente. Además, se muestra mediante un recuadro amarillo la zona en la cual se estabiliza la concentración y se realiza la media para calcular la concentración estacionaria.

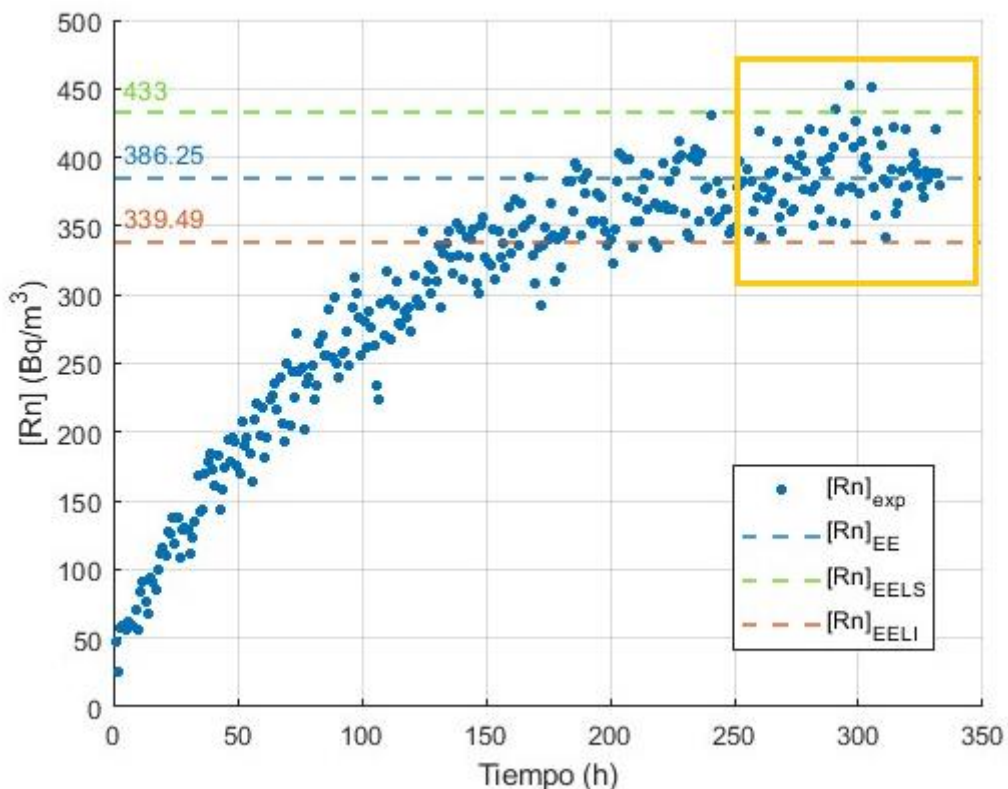


Figura 32. $[Rn]_{exp}$ frente al tiempo con el valor de la $[Rn]_{EE}$ para la pieza Rosa Porriño.

La concentración de radón en aire se estabiliza a partir de las 250 horas hasta finalizar el ensayo tal y como se observa en la Figura 32. Los resultados obtenidos en este periodo de 83 horas han sido utilizados para el cálculo de la tasa de exhalación, según la Ec. 30.

$$[Rn]_{EE} = \frac{\sum_{i=250}^n h[Rn]_i}{n} \quad \text{Ec. 30}$$

Se ha realizado el mismo procedimiento para las incertidumbres de la concentración experimental, donde se ha obtenido un límite superior e inferior para la concentración de radón en estado estacionario, para así, posteriormente, obtener la desviación de la tasa de exhalación.

Aplicando la Ec. 23 del Modelo 2 se obtiene una exhalación de: **32.53 ± 4.02 (Bq/m²·d)**.

Modelo 3: Pendiente

En el Modelo 3 se utiliza la pendiente que forman las concentraciones de radón en las primeras 24 horas. En la Figura 33 se muestra la gráfica de la concentración experimental de radón ($[Rn]_{exp}$) con un recuadro en amarillo donde se seleccionan los datos de las primeras 24 horas. En forma de miniatura se observa una gráfica donde aparecen los datos de concentración experimental de las primeras 24 horas y la pendiente (Pte) de estos en color azul. Además, también se grafican las pendientes para el límite superior (Pte_{LS}) e inferior (Pte_{LI}), representadas por una línea discontinua verde y roja, respectivamente.

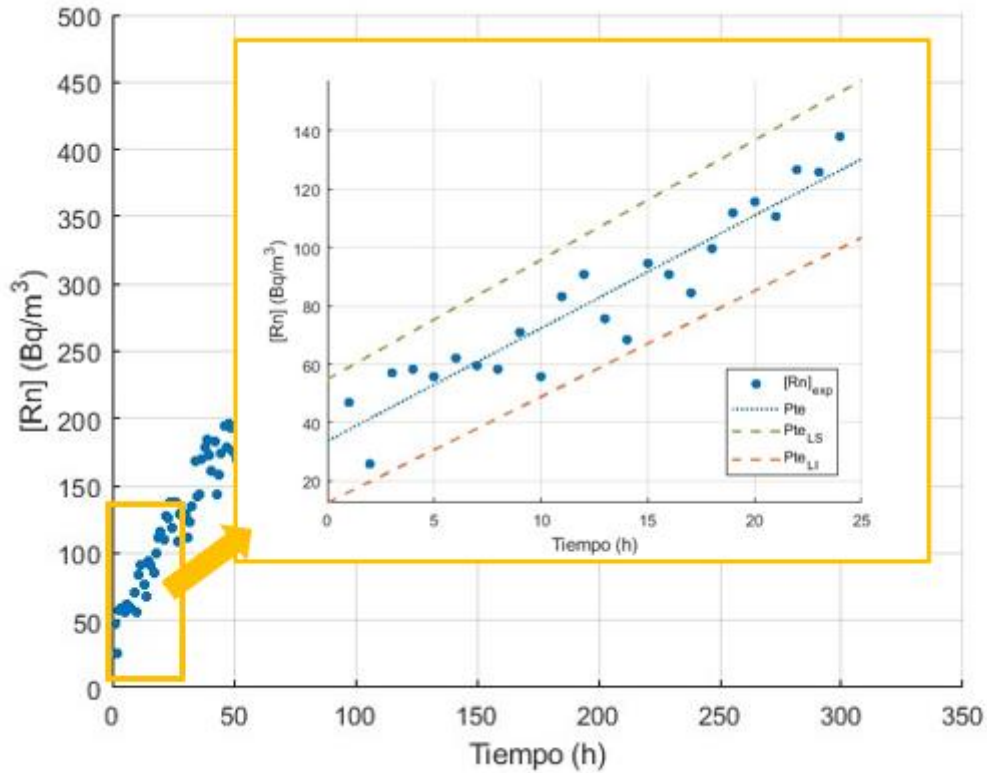


Figura 33. Representación de los datos experimentales de la concentración a las 24 horas y su pendiente para la pieza Rosa Porriño.

Aplicando la Ec. 26, la tasa de exhalación del Modelo 3 es de: **31.58 ± 1.80 (Bq/m²·d)**.

A continuación, se muestran los tres resultados de la tasa de exhalación que se han obtenido por los distintos modelos del RAD-7.

Tabla 21. Resultados de la exhalación de la pieza Rosa Porriño a partir del RAD-7.

Modelo	Exhalación (Bq/m ² ·d)	Error relativo (%)
1. Integrado	33.99 ± 4.55	-
2. Simplificado	32.53 ± 4.02	4.29
3. Pendiente	31.58 ± 1.80	7.09

Como se puede observar en la Tabla 21, los tres métodos ofrecen un valor de la exhalación muy similar. El error relativo se ha calculado eligiendo el valor del “Modelo 1 Integrado” como el valor exacto, ya que tiene en cuenta todos los datos experimentales y los otros dos modelos son una simplificación de este. Se puede observar que el error relativo del modelo simplificado y del modelo de la pendiente es menor del 15%, tomando este valor como un error relativo aceptable para la medición de la tasa de exhalación.

Azul Vizag

En la Figura 34 se muestran los resultados experimentales de la concentración de radón en la pieza Azul Vizag (15-B), además se muestra una miniatura con una ampliación de la escala.

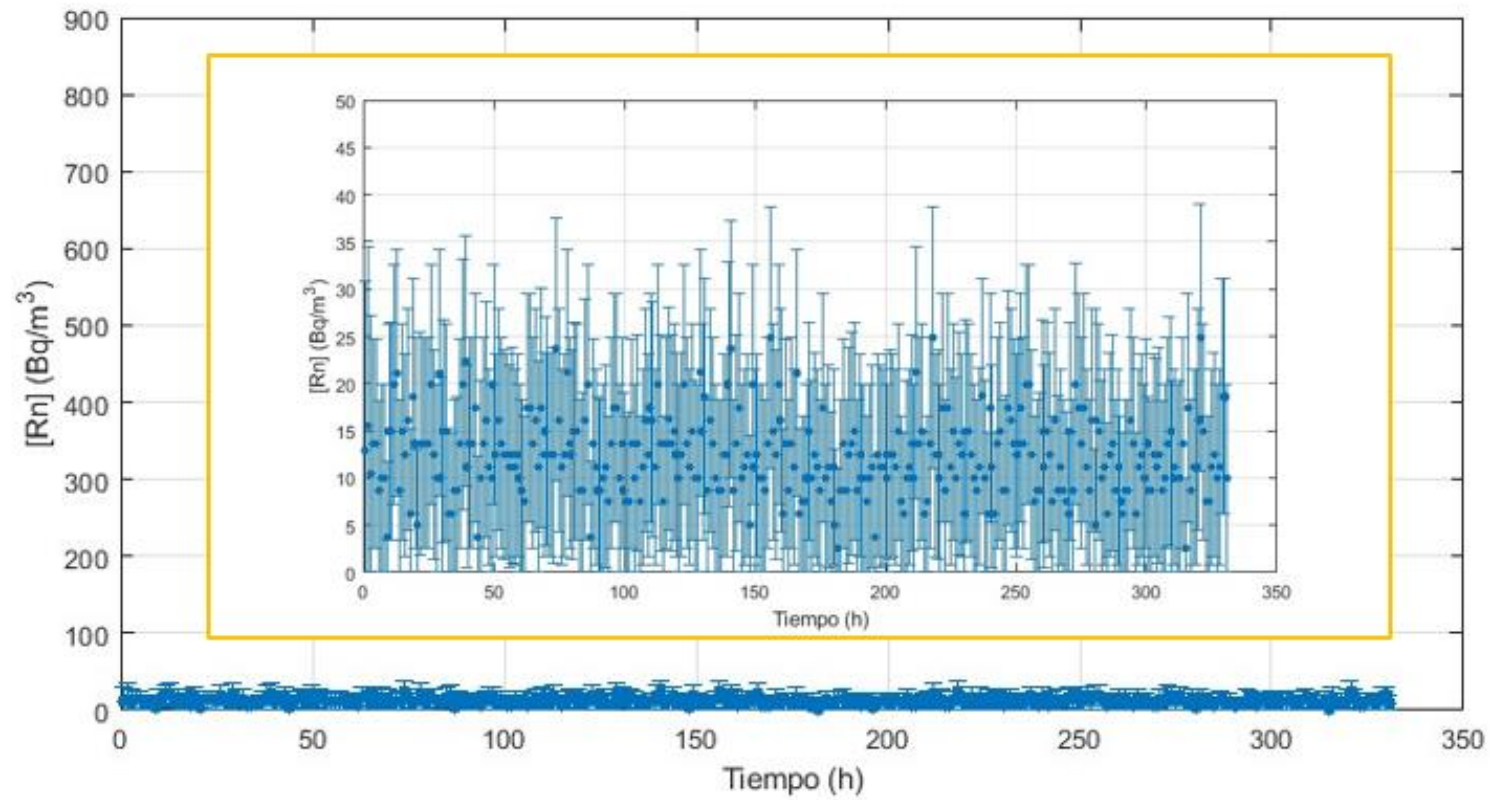


Figura 34. $[Rn]_{exp}$ frente al tiempo para la pieza Azul Vizag.

Como se observa en la Figura 34 los datos experimentales de la concentración de radón que ha medido el RAD-7 no forman ninguna curva de crecimiento. Esto se debe a que el material, en este caso, exhala muy poco radón y no aumenta la concentración de este, por lo que la concentración que registra el equipo es la concentración ambiente, es decir, la concentración de radón de fondo que hay en el laboratorio.

Por este motivo, no se van a realizar los cálculos de la tasa de exhalación por los distintos modelos, ya que no existe una curva de crecimiento.

Crema Julia

En primer lugar, en la Figura 35 se muestran los resultados experimentales de la concentración de radón en la pieza Crema Julia (16-B) medidos a partir del RAD-7.

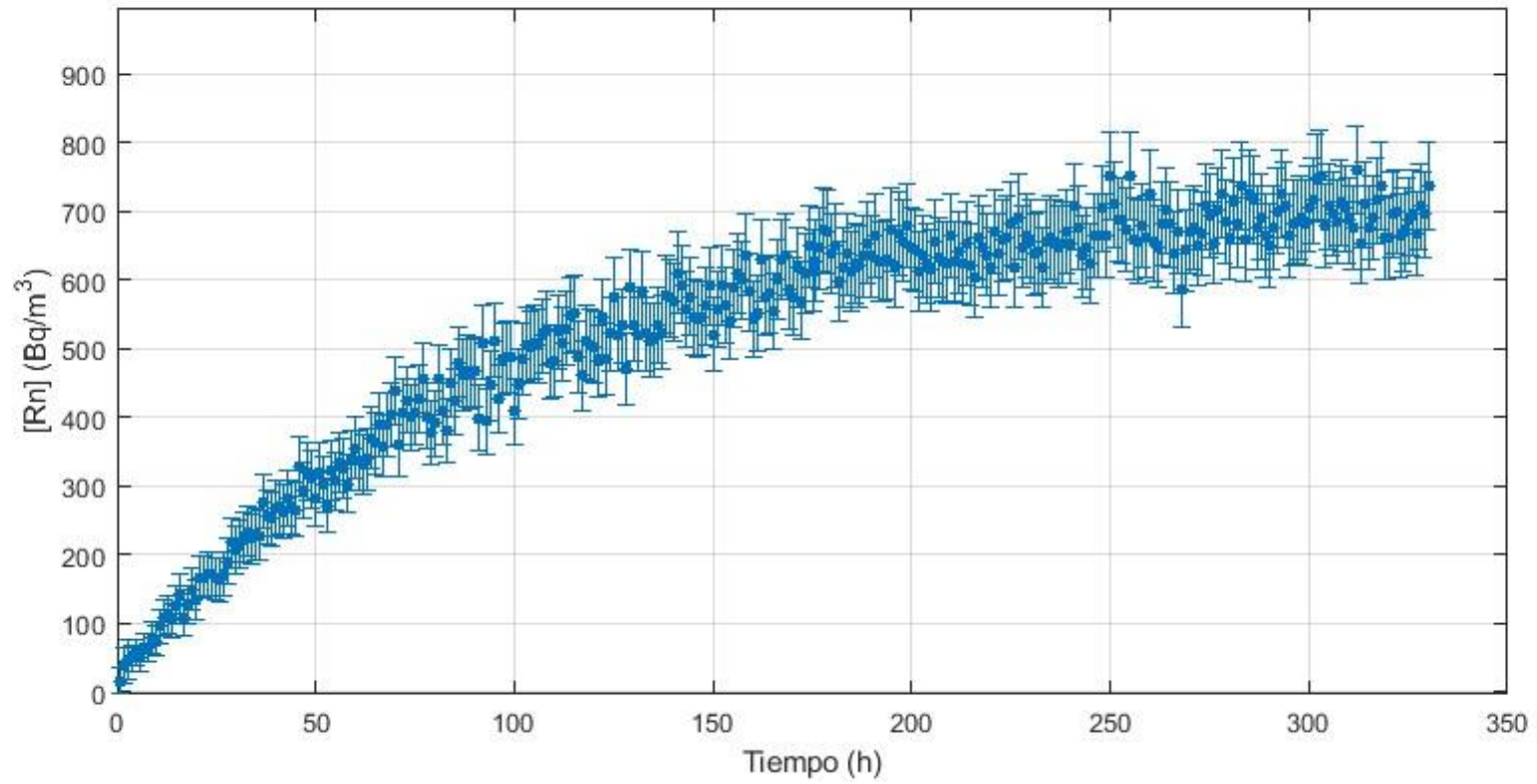


Figura 35. $[Rn]_{exp}$ frente al tiempo de la pieza Crema Julia medido a partir del RAD-7.

En este caso, para el cálculo del volumen de aire libre ($V_{\text{RAD-7}}$) se utilizan los mismos volúmenes del bidón y del soporte, y solo se modifica el volumen de la pieza del material, tal y como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Volúmenes para el cálculo de la exhalación en la pieza Crema Julia.

Volumen (m ³)	
V_{PIEZA}	$7.55 \cdot 10^{-4}$
$V_{\text{BIDÓN}}$	$3.00 \cdot 10^{-2}$
V_{SOPORTE}	$6.48 \cdot 10^{-4}$
$V_{\text{RAD-7}}$	$2.83 \cdot 10^{-2}$

Modelo 1: Ajuste integrado

En la Figura 36 se muestran los resultados de la concentración de radón experimental en forma de puntos azules obtenidos a partir del RAD-7 ($[\text{Rn}]_{\text{exp}}$), la curva teórica representada por una línea azul ($[\text{Rn}]_{\text{T}}$) y el límite superior (L.S.) e inferior (L.I.) de la curva teórica representados por líneas discontinuas de color verde y rojo, respectivamente.

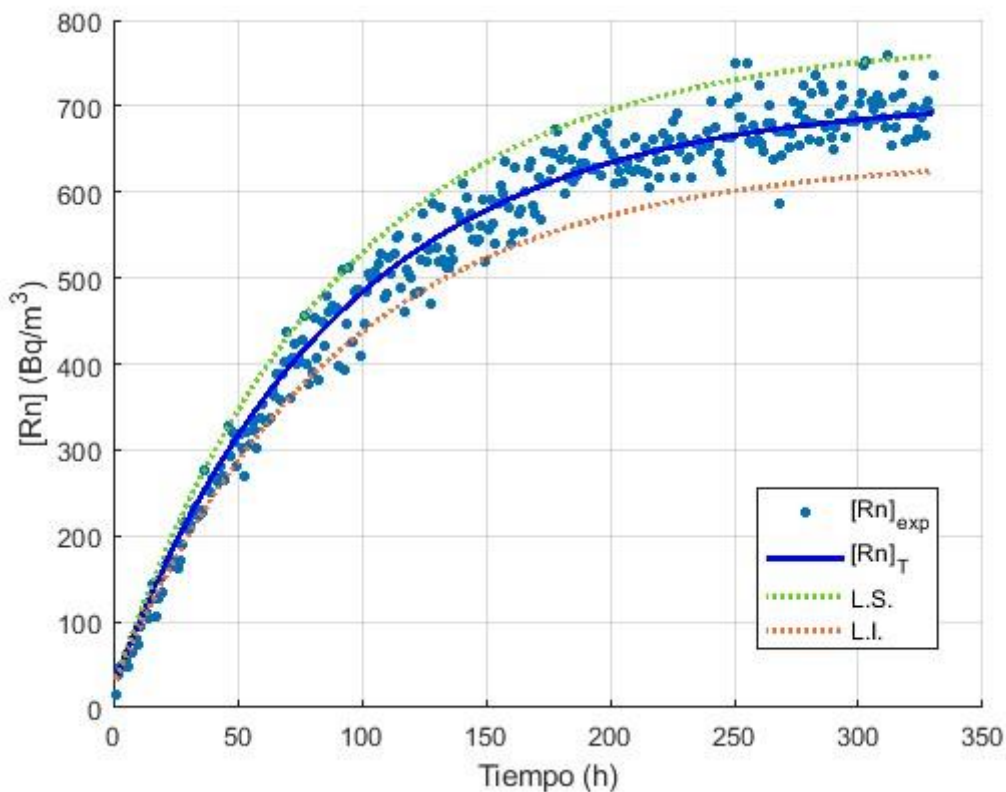


Figura 36. Representación de la $[\text{Rn}]$ experimental y la curva teórica ajustada para la pieza Crema Julia.

Para el cálculo de los límites se utiliza el mismo procedimiento anteriormente descrito en la pieza Rosa Porriño.

La tasa de exhalación a partir del modelo 1 es de: **60.31 ± 6.01 (Bq/m²·d).**

Modelo 2: Ajuste simplificado

En la Figura 37, se representan los datos experimentales de la concentración de radón mediante puntos azules y tres líneas discontinuas que representan la concentración media de radón para el estado estacionario, siendo la azul para los datos reales ($[Rn]_{EE}$), y el verde y rojo para el límite superior ($[Rn]_{EELS}$) e inferior ($[Rn]_{EELI}$), respectivamente. Además, se muestra mediante un recuadro amarillo la zona en la cual se estabiliza la concentración y se realiza la media para calcular la concentración estacionaria.

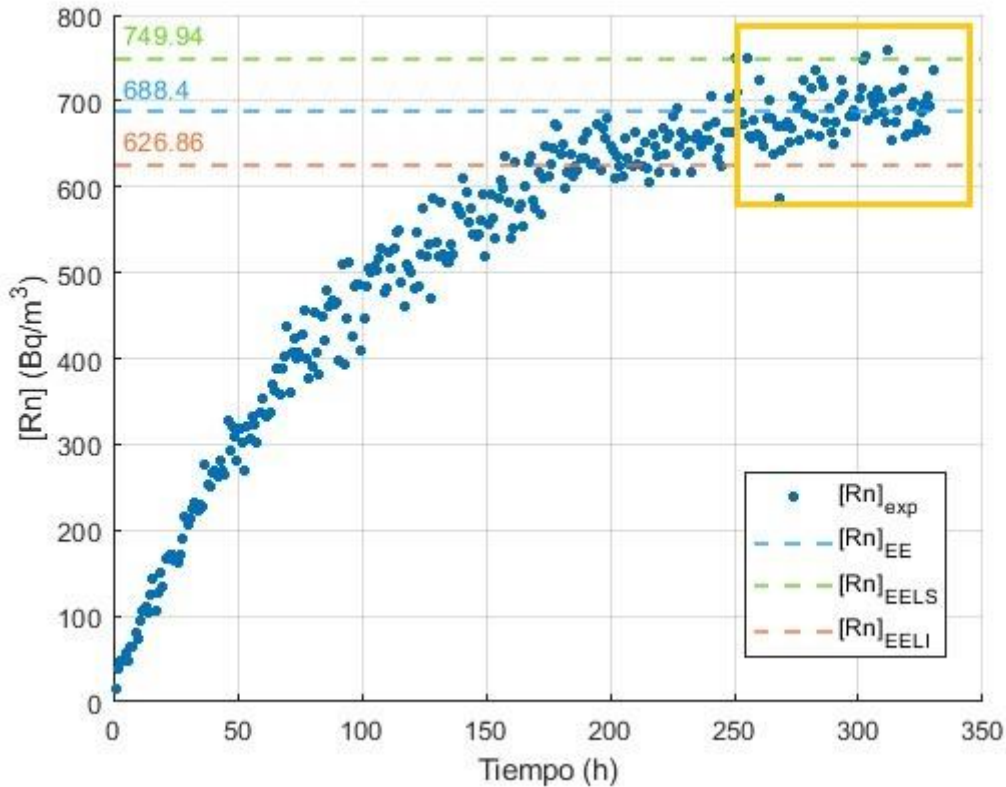


Figura 37. $[Rn]_{exp}$ frente al tiempo con el valor de la $[Rn]_{EE}$ para la pieza Crema Julia.

La concentración de radón en aire se estabiliza a partir de las 250 horas hasta finalizar el ensayo tal y como se observa en la Figura 37. Los resultados obtenidos en este periodo de 83 horas han sido utilizados para el cálculo de la tasa de exhalación, según la Ec. 23.

Para el cálculo de los límites se utiliza el mismo procedimiento anteriormente descrito en la pieza Rosa Porriño.

La tasa de exhalación del Modelo 2 es de: **58.54 ± 5.30 (Bq/m²·d).**

Modelo 3: Pendiente

En la Figura 38, se muestra la gráfica de la concentración experimental de radón ($[Rn]_{exp}$) con un recuadro en amarillo donde se seleccionan los datos de las primeras 24 horas. En forma de miniatura se observa una gráfica donde aparecen los datos de concentración experimental de las primeras 24 horas y la pendiente (Pte) de estos en color azul. Además, también se grafican las pendientes para el límite superior (Pte_{LS}) e inferior (Pte_{LI}), representadas por una línea discontinua verde y roja,

respectivamente.

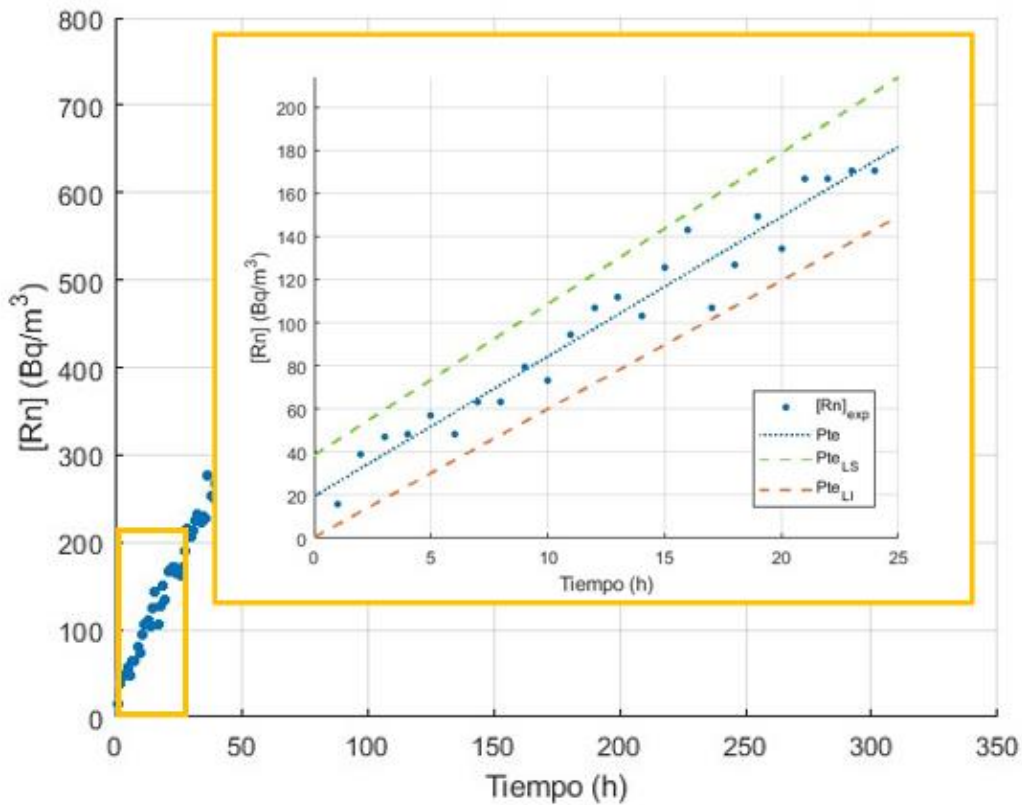


Figura 38. Representación de los datos experimentales de la concentración a las 24 horas y su pendiente para la pieza Crema Julia.

La tasa de exhalación del Modelo 3 es de: **51.56 ± 4.14 (Bq/m²·d)**.

A continuación, en la Tabla 23 se muestran los tres resultados de la tasa de exhalación que se han obtenido por los distintos modelos del RAD-7.

Tabla 23. Resultados de la exhalación de la pieza Crema Julia a partir del RAD-7.

Modelo	Exhalación (Bq/m ² ·d)	Error relativo (%)
1. Integrado	60.31 ± 6.01	-
2. Simplificado	58.54 ± 5.30	2.93
3. Pendiente	51.56 ± 4.14	14.51

Como se puede observar en la Tabla 23 los tres métodos ofrecen un valor de la exhalación similar. El modelo más preciso y el de referencia es el integrado, los otros dos son una simplificación para reducir cálculos y tiempo. Teniendo en cuenta las desviaciones de los tres modelos, se puede afirmar que los resultados están en el mismo rango de valores. El error relativo se ha calculado de la misma forma que se calcula en la pieza Rosa Porriño, y en los tres modelos es menor del 15%, tomando como aceptables los tres modelos.

6.5. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LAS TRES METODOLOGÍAS.

En este apartado se van a comparar las tres metodologías utilizadas, realizando un análisis de las concentraciones que se han medido y de la tasa de exhalación. Además, se van a analizar distintos aspectos como el tiempo necesario de medida, el precio o la precisión de cada una de las metodologías.

6.5.1. Comparación de las concentraciones.

En este apartado se analizan las concentraciones de radón medidas con los distintos métodos: electretes, trazas y Rad-7.

Para poder comparar las metodologías, se utiliza la curva de crecimiento del radón que se ha obtenido a partir de la metodología del RAD-7, único detector en continuo. Se determina, a partir de estos resultados, la concentración de radón a un tiempo de 72 horas, que hace referencia al tiempo de medición de los electretes y a un tiempo de 48 días, que hace referencia al tiempo de medición de las trazas.

Asimismo, se va a graficar la curva corregida en el caso de que no existieran pérdidas en el bidón a partir de la Ec. 21. La curva corregida hace referencia a la concentración a la que podría llegar el bidón si no tuviera pérdidas y con ello poder comparar las concentraciones con las concentraciones que se han obtenido mediante el método de los electretes y las trazas, ya que para estos métodos se utiliza una jarra hermética sin agujeros en la cual no hay pérdidas de concentración. Por lo tanto, se va a realizar la comparación de la concentración obtenida a partir del método de los electretes, la concentración integrada a los 3 días obtenida mediante la curva teórica a partir de los datos experimentales del RAD-7, en la cual se incluyen las pérdidas del equipo; y la concentración integrada a los 3 días, obtenida a partir de la curva corregida a partir de los datos experimentales del RAD-7 sin tener en cuenta las pérdidas del equipo.

Por otro lado, se va a comparar la concentración obtenida a partir del método de las trazas, la concentración integrada de la curva teórica a los 35 y 46 días (dependiendo del tiempo de medición de la pieza) y la concentración integrada de la curva corregida sin pérdidas a los 35 y 46 días.

Como la curva de crecimiento a partir del RAD-7 solo se ha representado para 14 días, se va a aumentar el tiempo hasta llegar a el tiempo de medición de las trazas y así poder observar su concentración tal y como se muestra en la Figura 39 para la pieza Rosa Porriño.

En la Figura 39 se representan en forma de puntos azules los datos de experimentales de la concentración de radón ($[Rn]_{exp}$) obtenidos mediante el método del RAD-7, la curva teórica extendida en el tiempo (Curva teo ext) se representa mediante una línea azul discontinua, y la curva corregida extendida sin tener en cuenta las pérdidas (Curva sp ext) se representa en una línea rosa discontinua.

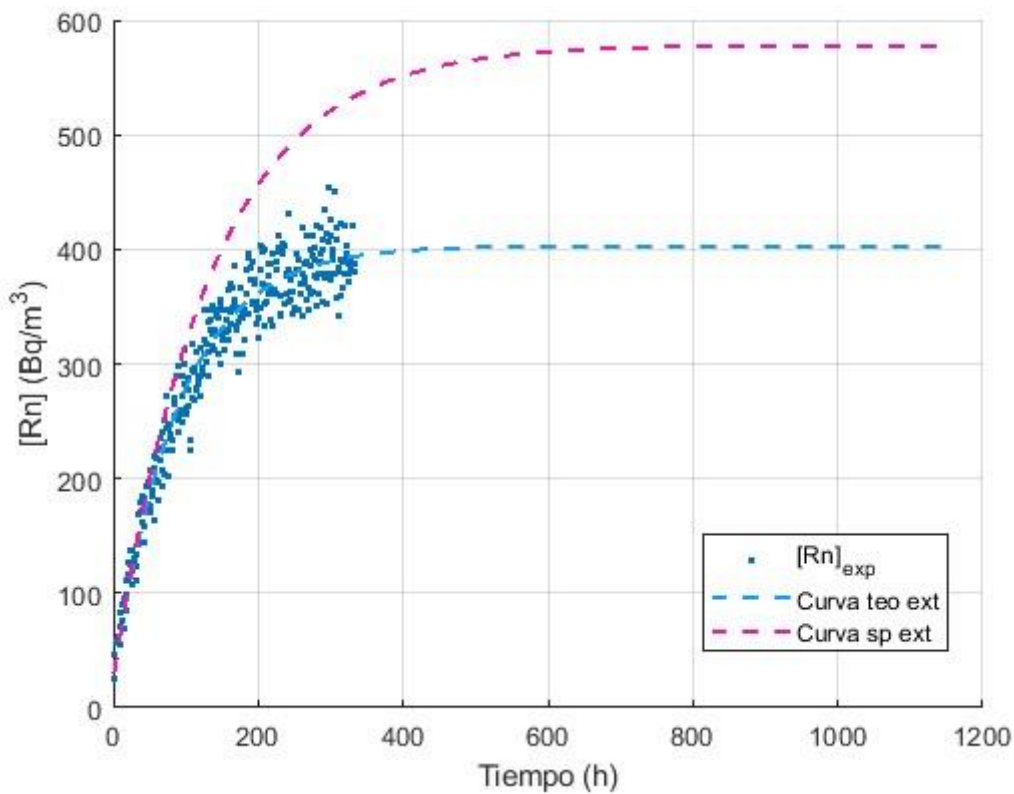


Figura 39. Representación de la curva teórica y la curva corregida sin pérdidas extendidas en el tiempo para la pieza Rosa Porriño.

En la Tabla 24 se presentan la comparativa de los resultados obtenidos para las tres metodologías, donde $[Rn]_{Teórica}$ representa la concentración de radón integrada medida a partir de la curva teórica (Curva teo ext), y $[Rn]_{SP}$ representa la concentración de radón integrada medida a partir de la curva corregida (Curva sp ext) para el caso del RAD-7 y para el caso de electretes y trazas la concentración que se ha obtenido mediante su propia metodología, ya que no se considera que existen pérdidas.

Tabla 24. Relación de las concentraciones de electretes y trazas con la curva del RAD-7 para la pieza Rosa Porriño.

Método	Tiempo (días)	$[Rn]_{Teórica}$ (Bq/m ³)	$[Rn]_{SP}$ (Bq/m ³)	Error Relativo sin pérdidas (%)
Electretes	3	-	175.5 ± 12	12.61
RAD-7	3	144.25 ± 16.61	153.36 ± 17.91	
Trazas	46	-	562.53 ± 44.66	8.96
RAD-7	46	372.40 ± 50.05	512.10 ± 71.32	

En la Figura 40 se presentan los resultados experimentales del RAD-7 ($[Rn]_{exp}$), la curva teórica con pérdidas, y la curva corregida sin tener en cuenta las pérdidas de la concentración de radón en aire para la pieza Crema Julia.

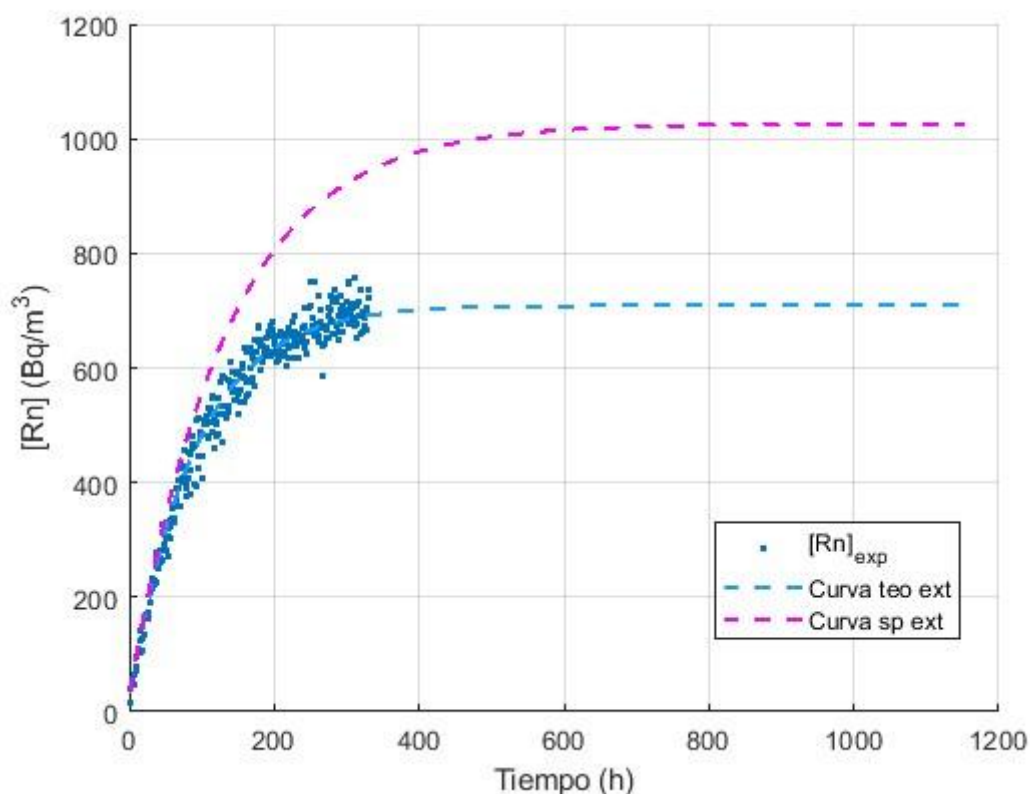


Figura 40. Representación de la curva teórica considerando las pérdidas y la curva corregida sin pérdidas extendidas en el tiempo para la pieza Crema Julia.

En la Tabla 25 se presenta la comparativa de los resultados obtenidos para las tres metodologías.

Tabla 25. Relación de las concentraciones de electretes y trazas con la curva del RAD-7 para la pieza Crema Julia.

Método	Tiempo (días)	[Rn] _{Teórica} (Bq/m ³)	[Rn] _{SP} (Bq/m ³)	Error Relativo sin pérdidas (%)
Electretes	3		242.00 ± 14.5	
RAD-7	3	240.41 ± 21.61	257.27 ± 23.31	6.30
Trazas	35		936.86 ± 73	
RAD-7	35	636.00 ± 61.42	869.17 ± 84.89	7.22

Como se puede observar en la Figura 39 y la Figura 40 la curva corregida sin pérdidas llega a unas concentraciones mucho más altas, llegando a una concentración estacionaria 1/3 más alta que la curva teórica con las pérdidas. Esto es debido a que cuando no hay pérdidas se concentra más radón dentro del bidón y llega a unas concentraciones más altas, pero como en el caso real del bidón sí que hay pérdidas la medida real de esta concentración no llega a ser tan elevada.

En la Tabla 24 y la Tabla 25 se puede observar que en el caso de los electretes, al ser un periodo de tiempo corto, la concentración que se ha obtenido mediante el método de los electretes, la concentración a partir de la curva teórica y la concentración obtenida a partir de la curva corregida sin

pérdidas son muy parecidas. Esto se debe al tiempo de medición, como solo se tiene en cuenta 3 días la concentración no llega a ser tan alta y las pérdidas no son notables. Sin embargo, en el caso de las trazas, al tener un periodo más largo de medición las pérdidas que existen en el bidón sí que afectan disminuyendo la concentración que se acumula, por esa razón, la concentración medida a partir de la metodología de las trazas se acerca mucho más a la concentración obtenida a partir de la curva corregida sin pérdidas. Con este razonamiento se puede afirmar que no existen pérdidas en la metodología utilizada para las trazas y los electretes, ya que en las dos se utiliza una jarra para realizar el ensayo la cual tiene una goma sellable y no tiene agujeros, además, se afirma que es necesario tener en cuenta las pérdidas del equipo del bidón y que en el caso que no existieran, la concentración acumulada sería mucho más alta.

6.5.2. Comparación de la tasa de exhalación.

En este apartado se va a comparar la tasa de exhalación que se ha obtenido a partir de los tres métodos de medida.

Rosa Porriño

A continuación, en la Tabla 26 se muestran los resultados de la tasa de exhalación a partir de los distintos métodos que se han estudiado y en la Figura 41 se han representado los resultados con sus desviaciones para poder analizarlos gráficamente.

Tabla 26. Comparación de la tasa de exhalación de la pieza Rosa Porriño a partir de las tres metodologías.

	Método	Exhalación (Bq/m²·d)
	Electretes	42.81 ± 2.76
	Trazas	37.42 ± 2.98
RAD - 7	Integrado	33.99 ± 4.55
	Simplificado	32.53 ± 4.02
	Pendiente 24h	31.58 ± 1.80

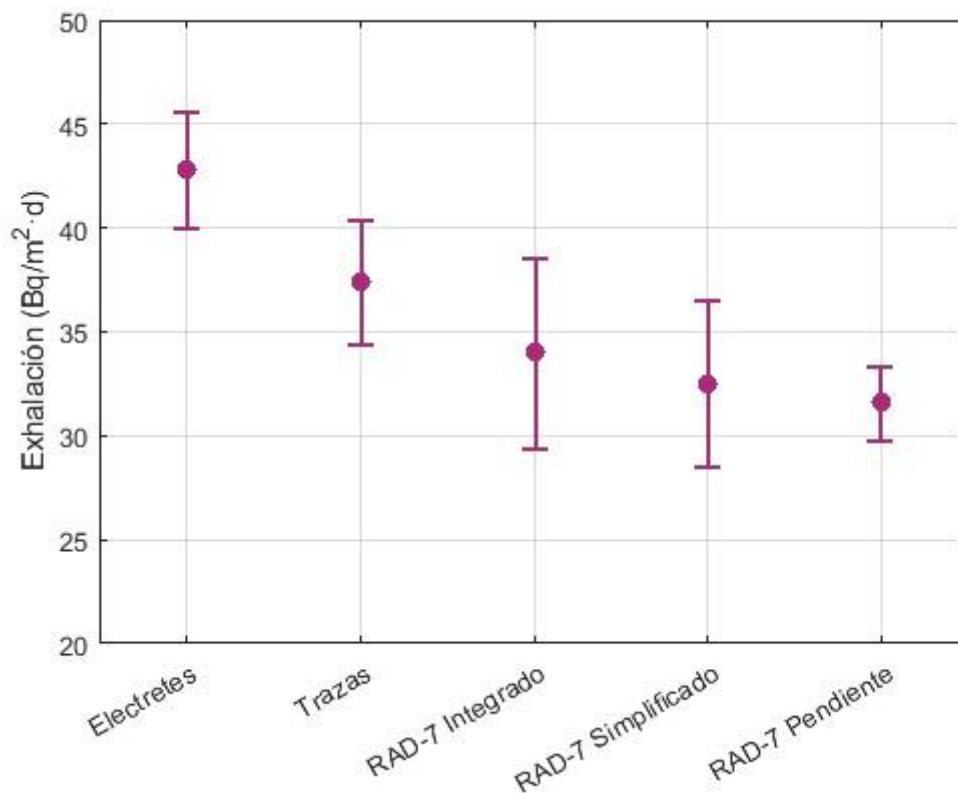


Figura 41. Representación de la tasa de exhalación de la pieza Rosa Porriño con sus desviaciones para cada uno de los métodos.

A partir de los resultados mostrados se puede observar que los 5 métodos por los cuales se ha calculado la tasa de exhalación muestran un valor muy similar. Teniendo en cuenta las desviaciones, todos los métodos están dentro del mismo rango de valores, entre 28.51 Bq/m²·d y 45.57 Bq/m²·d.

Crema Julia

Se van a mostrar los resultados de la tasa de exhalación para la pieza Crema Julia en la Tabla 27 y se van a graficar en la Figura 42.

Tabla 27. Comparación de la tasa de exhalación de la pieza Crema Julia a partir de las tres metodologías.

Método	Exhalación (Bq/m ² ·d)
Electretes	59.85 ± 3.59
Trazas	66.35 ± 5.19
RAD - 7	
Integrado	60.31 ± 6.01
Simplificado	58.54 ± 5.30
Pendiente 24h	51.56 ± 4.14

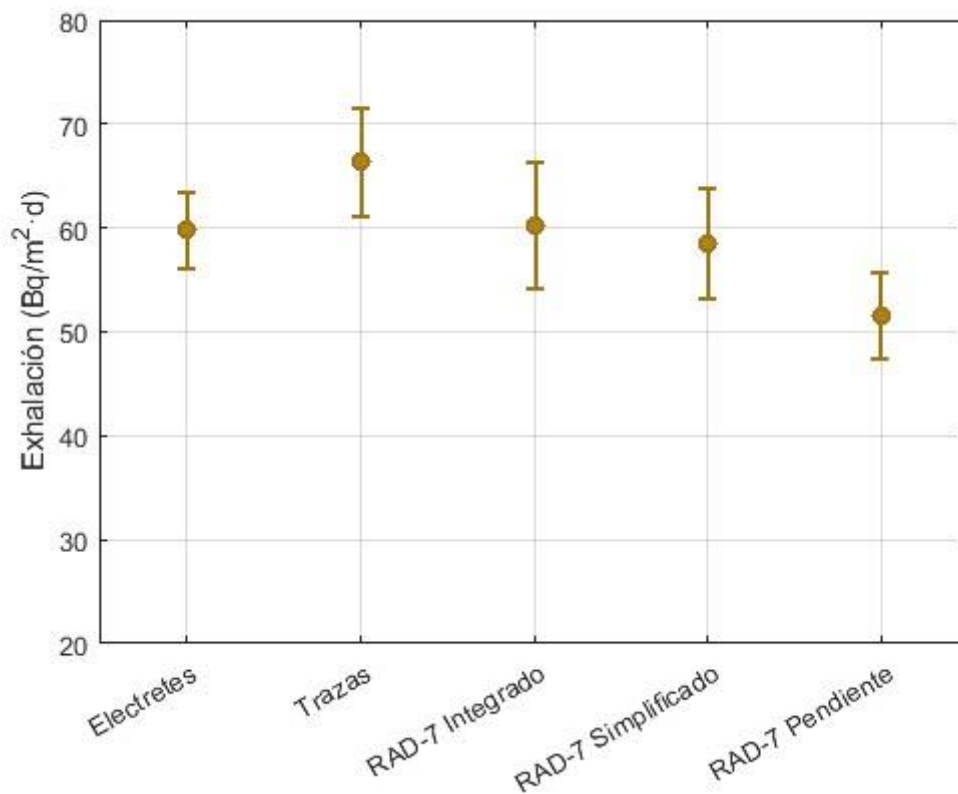


Figura 42. Representación de la tasa de exhalación de la pieza Crema Julia con sus desviaciones para cada uno de los métodos.

Como se puede observar en los resultados de la pieza Crema Julia (Figura 42) todos los valores de exhalación son muy similares. En este caso, el valor más alto de la tasa corresponde al método a partir de las trazas, el método por electretes y el RAD-7 presentan un valor muy parecido. Siendo el método de la pendiente el que tiene una tasa más baja. Considerando los márgenes de error todos los valores entran dentro del rango de variación de los demás, que es entre 47.42 Bq/m²·d y 68.54 Bq/m²·d, así que todos los valores son equivalentes.

A continuación, en la Figura 43 se realiza una representación de la tasa de exhalación que se ha obtenido en cada uno de los métodos para las piezas estudiadas.

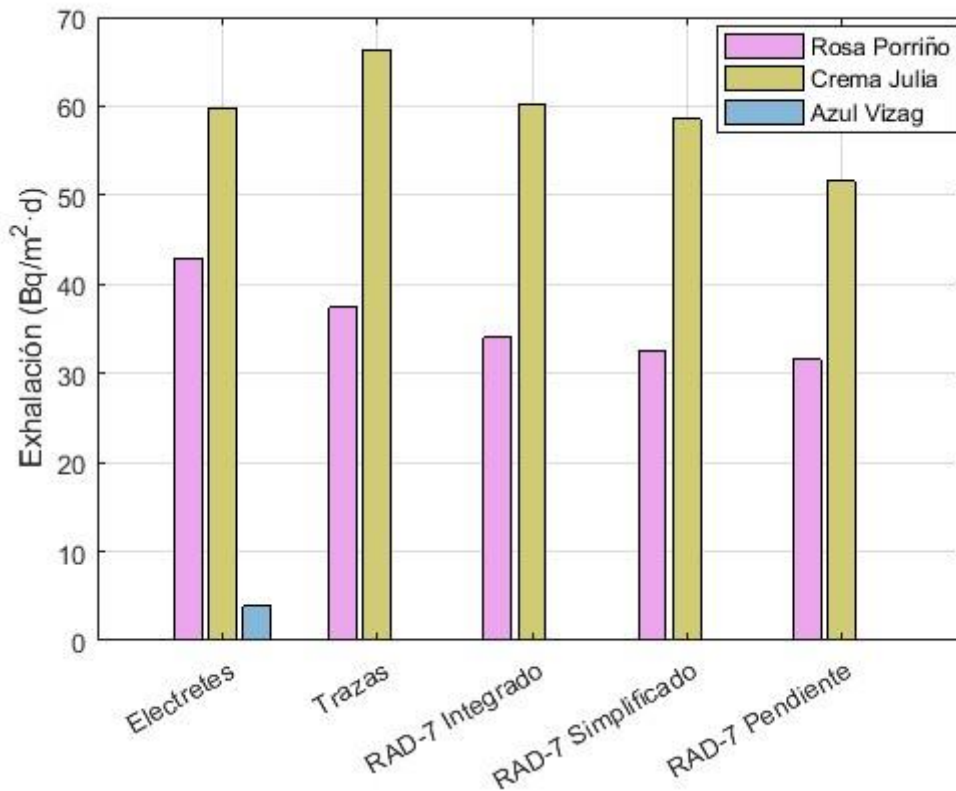


Figura 43. Representación de las distintas tasas de exhalación dependiendo del método y la pieza.

Finalmente, en la Figura 43 se puede observar como la pieza de Granito Crema Julia es la que tiene una tasa de exhalación más alta, seguida de la pieza de Granito Rosa Porriño y, por último, la pieza de Granito Azul Vizag. Para la pieza de Granito Azul Vizag solo fue posible calcular su tasa de exhalación mediante la metodología de los electretes, ya que mediante el RAD-7 los datos experimentales de concentración fueron datos de fondo y no se pudo aplicar ningún modelo, y por ello, no se realizó mediante la metodología de las trazas.

En relación con el índice de actividad radiactiva (I) que se describió anteriormente, los tres materiales superaban el valor en 1, pero se puede observar como el material de Granito Azul Vizag aunque superase el valor recomendado tiene una tasa de exhalación muy baja. Esto es debido al acabado que le añade el fabricante mediante pinturas y barnices que apantalla la exhalación del radón al exterior. Por lo tanto, la caracterización de los materiales no es suficiente para saber si un material de construcción va a producir altas concentraciones de radón dentro una vivienda, siendo necesario la medición de la tasa de exhalación de este material.

6.5.3. Comparación de los métodos.

En la Tabla 28 se presenta una comparación de los tres métodos utilizados para el cálculo de la tasa de exhalación (electretes, trazas y RAD-7). Además, también se incluyen los tres modelos utilizados para el RAD-7, ya que tienen diferencias en distintos aspectos a considerar.

Tabla 28. Comparación en diversos aspectos de los métodos utilizados.

Método	Tiempo	Precisión	Dificultad de medida	Lectura	Autonomía	Coste	Acreditación
Electretes	Bajo	Media	Fácil	Indirecta	NO	Bajo	SI
Trazas	Largo	Alta	Alta	Indirecta	NO	Alto	NO
RAD-7 Integrado	Medio	Alta	Media	Directa	SI	Medio	NO
RAD-7 Simplificado	Medio	Media	Media	Directa	SI	Medio	NO
RAD-7 Pendiente	Bajo	Media	Media	Directa	SI	Medio	NO

En la Tabla 28 se muestra una comparación de las tres metodologías estudiadas para saber cuál es la que más interesa escoger. Todos los métodos son buenos para calcular la tasa de exhalación, pero es necesario saber en qué aspectos se diferencian como, por ejemplo, el coste o el tiempo de medición para poder escoger el que más interese según las necesidades.

En cuanto al tiempo de medición, los electretes y el método de la pendiente son los que menos tiempo necesitan para obtener un resultado, 3 días y 1 días, respectivamente. Seguidamente, se encuentran el método simplificado e integrado del RAD-7 que tienen un tiempo medio de medición de unos 14 días, aproximadamente. Por último, el método que necesita un mayor periodo de medición son las trazas, ya que se ha comprobado que deben de medir al menos 30 días.

Por otro lado, se ha estudiado la precisión de las metodologías siendo las más altas, por este orden, la metodología de las trazas, la del RAD-7 integrado y el simplificado. La metodología a partir de los electretes y la pendiente del RAD-7 tienen una precisión media.

En cuanto a la dificultad de manejo, ninguno de los métodos supone una alta dificultad, aunque es mucho más fácil el montaje de los electretes y las trazas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la autonomía, en el caso del método del RAD-7, al ser un método activo, es necesario que esté conectado a la corriente para que no se termine la batería y deje de realizar mediciones. Sin embargo, los electretes y las trazas no necesitan corriente eléctrica.

Por último, el único método por el cual el ISIRYM, en concreto el grupo de Seguridad Nuclear y Bioingeniería de las Radiaciones Ionizantes (SENUBIO) tiene acreditación, son los electretes.

Con el estudio de los resultados para cada uno de los métodos la correcta selección dependerá de las condiciones que se requieran:

- Si el factor restrictivo es el tiempo, los mejores métodos que seleccionar son: electretes y RAD-7 pendiente.
- Si el factor restrictivo es la precisión, los métodos más adecuados son electretes, trazas o RAD-7 integrado.
- Si el coste es la variable a tener en cuenta, se seleccionará el método de los electretes ya que es el de más bajo coste.

6.6. BASE DE DATOS DE LA TASA DE EXHALACIÓN DE DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En este apartado se muestra la tasa de exhalación de distintos materiales de construcción que se han medido para la realización de una base de datos y para contribuir en el Proyecto de Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción (2021). Para la medición de estos materiales se ha seleccionado la metodología mediante electretes, ya que es un método rápido, preciso y el departamento SENUBIO está acreditado para ello.

A continuación, en la Tabla 29 se muestra el material que se ha medido, su referencia y el valor de la tasa de exhalación.

Tabla 29. Tasa de exhalación para distintos materiales.

Material	Referencia	Exhalación (Bq/m ² ·d)	Material	Referencia	Exhalación (Bq/m ² ·d)
Mármol Rojo Alicante	1-a	7.21	Silestone Blanco Zeus	19-e	11.64
Mármol Crema Marfil	2-a	8.67	Silestone Gris Expo	20-a	53.95
Mármol Verde Indio	3-a	28.72	Silestone Rougui	21-a	11.14
Mármol Cenia	4-a	0	Porcelánico Ascale	22-a	13.44
Mármol Caliza Capri	5-a	6.36	Porcelánico Infinity	23-a	14.45
Mármol Rojo Cehegin	7-a	4.62	Porcelánico Grey	24-b	11.40
Mármol Serpeggiante	8-a	15.60	Neolit Artic White	25-a	8.94
Mármol Emperador	9-a	2.52	Neolit Nero	26-a	10.86
Mármol Daino	10-a	26.16	Neolit Lauren	27-b	1.48
Granito Sudáfrica	12-a	6.04	Decton Kelia	28-a	3.33
Granito Blanco Perla	13-b	13.60	Decton Doomos	29-a	12.13
Granito	17-d	55.41	Decton Aura	30-a	5.37
			Porcelánico Súper Blanco	31-a	6.38

6.7. DOSIS INHALADA

El cálculo de la dosis inhalada se va a realizar en un cuarto de baño de una vivienda, ya que se trata de la estancia donde las condiciones de ventilación son las más desfavorables y la humedad es más alta, favoreciendo así las condiciones para que cuando los materiales de construcción exhalen radón se acumule más fácilmente.

Se ha diseñado un baño con unas medidas estándares de una vivienda en España. El plano y las medidas correspondientes se pueden observar en el Documento de Planos, el Plano 1.

Para el cálculo de la dosis se van a considerar dos casos distintos:

- **Caso 1:** Obtención de la dosis suponiendo distintas tasas de ventilación, desde la más restrictiva, sin nada de ventilación, hasta una tasa de ventilación donde la dosis cumpla que sea de 1 mSv/año y se garantice así el cumplimiento de la legislación.
- **Caso 2:** Una vez se tengan los valores de dosis para el caso más restrictivo, se van a estimar las tasas de exhalación que deberían de tener los materiales para disminuir la dosis a 1mSv/año. Esto permitirá tener conocimiento de la disminución de la tasa de exhalación que debería conseguirse con medidas de mitigación o apantallamiento de la exhalación de los materiales del cuarto de baño.

Los materiales que se han seleccionado para el diseño de este baño son los siguientes:

- Granito Rosa Porriño: este material ha sido estudiado en el proyecto y se ha considerado que tiene una alta tasa de exhalación.
- Granito Crema Julia: ha sido estudiado en el presente trabajo y tiene una alta tasa de exhalación.
- Porcelánico súper blanco.: este material se va a utilizar para las zonas del cuarto de baño en las cuales no se añaden los granitos. La tasa de exhalación de este material se encuentra en la Tabla 29.

Como se han estudiado varios métodos de medición durante la realización de este proyecto se han obtenido distintos valores de tasas de exhalación, por lo tanto, para calcular la dosis de inhalación se va a escoger el valor más desfavorable. A continuación, en la Tabla 30, se muestran los valores de tasas de exhalación seleccionados para cada material.

Tabla 30. Valores de la tasa de exhalación escogidos para el cálculo de la dosis.

Material	Exhalación (Bq/m ² ·d)
Rosa Porriño	42.81
Crema Julia	66.35
Porcelánico súper blanco	6.38

La distribución del baño es la siguiente:

- Suelo: formado por baldosas del material Rosa Porriño.
- Paredes: formadas por baldosas del material Crema Julia.
- Techo: formado por baldosas del material porcelánico.

A partir de esta distribución se calcula el área de exhalación de cada uno de los materiales, teniendo en cuenta que solo exhala radón por una cara de la baldosa. Se han obtenido las siguientes medidas, mostradas en la Tabla 31.

Tabla 31. Áreas de exhalación de los materiales que forman el baño.

Material	Área (m ²)
Rosa Porriño	4.70
Crema Julia	20.14
Porcelánico súper blanco	4.70

CASO 1:

Para calcular la dosis inhalada, primero hay que calcular la concentración de radón que hay dentro del baño, para ello se utiliza la Ec. 27 y es necesario saber el volumen de aire que hay dentro de la habitación y la tasa de ventilación.

$$V_{aire_{baño}} = 10.81 m^3$$

La tasa de ventilación (W) hace referencia a las renovaciones de aire por unidad de tiempo. En este caso, va a tener un rango de $0.007554 h^{-1}$ (valor de la constante de desintegración del radón, es decir equivalente a que no hay ventilación) a $0.5 h^{-1}$, es decir, a que se renueve 0.5 veces el aire cada hora. Con este rango se va a observar cómo afecta la tasa de ventilación a la concentración dentro de la habitación, y, por lo tanto, a la dosis recibida.

$$W = [0.007554 - 0.5] h^{-1}$$

Para el tiempo de exposición se ha supuesto el caso más extremo de que una persona permanece aproximadamente 3 horas al día en el baño, por lo tanto, para un año, el tiempo de exposición es el siguiente:

$$t_{exposición} = 1095 h$$

El factor de equilibrio se ha seleccionado el estándar según “El Manual de la OMS sobre el radón en interiores” (Zeeb, H., & Shannoun, F., 2015):

$$F = 0.4$$

Se aplica el siguiente coeficiente de dosis (Tene, T, et al., 2021):

$$C_D = 9 nSv (Bq \cdot h \cdot m^{-3})^{-1}$$

A partir de todos estos valores, se calcula la concentración en el interior del baño y seguidamente la dosis inhalada. En la Tabla 32 se muestran los resultados.

Estudio de la exposición al Radón 222 exhalado a partir de los materiales de construcción empleados en viviendas.

Tabla 32. Resultados de la $[Rn]_{\text{indoor}}$ y la Dosis según la tasa de ventilación.

W (h^{-1})	$[Rn]_{\text{indoor}}$ (Bq/m^3)	Dosis ($mSv/año$)	W (h^{-1})	$[Rn]_{\text{indoor}}$ (Bq/m^3)	Dosis ($mSv/año$)
7.55E-03	800.09	3.154	0.26	23.25	0.092
0.01	604.39	2.383	0.27	22.38	0.088
0.02	302.19	1.191	0.28	21.59	0.085
0.03	201.46	0.794	0.29	20.84	0.082
0.04	151.10	0.596	0.3	20.15	0.079
0.05	120.88	0.477	0.31	19.50	0.077
0.06	100.73	0.397	0.32	18.89	0.074
0.07	86.34	0.340	0.33	18.31	0.072
0.08	75.55	0.298	0.34	17.78	0.070
0.09	67.15	0.265	0.35	17.27	0.068
0.1	60.44	0.238	0.36	16.79	0.066
0.11	54.94	0.217	0.37	16.33	0.064
0.12	50.37	0.199	0.38	15.90	0.063
0.13	46.49	0.183	0.39	15.50	0.061
0.14	43.17	0.170	0.4	15.11	0.060
0.15	40.29	0.159	0.41	14.74	0.058
0.16	37.77	0.149	0.42	14.39	0.057
0.17	35.55	0.140	0.43	14.06	0.055
0.18	33.58	0.132	0.44	13.74	0.054
0.19	31.81	0.125	0.45	13.43	0.053
0.2	30.22	0.119	0.46	13.14	0.052
0.21	28.78	0.113	0.47	12.86	0.051
0.22	27.47	0.108	0.48	12.59	0.050
0.23	26.28	0.104	0.49	12.33	0.049
0.24	25.18	0.099	0.5	12.09	0.048
0.25	24.18	0.095	0.5	12.09	0.048
			0.5	12.09	0.048

En la Figura 44 se representa la dosis inhalada frente a la ventilación.

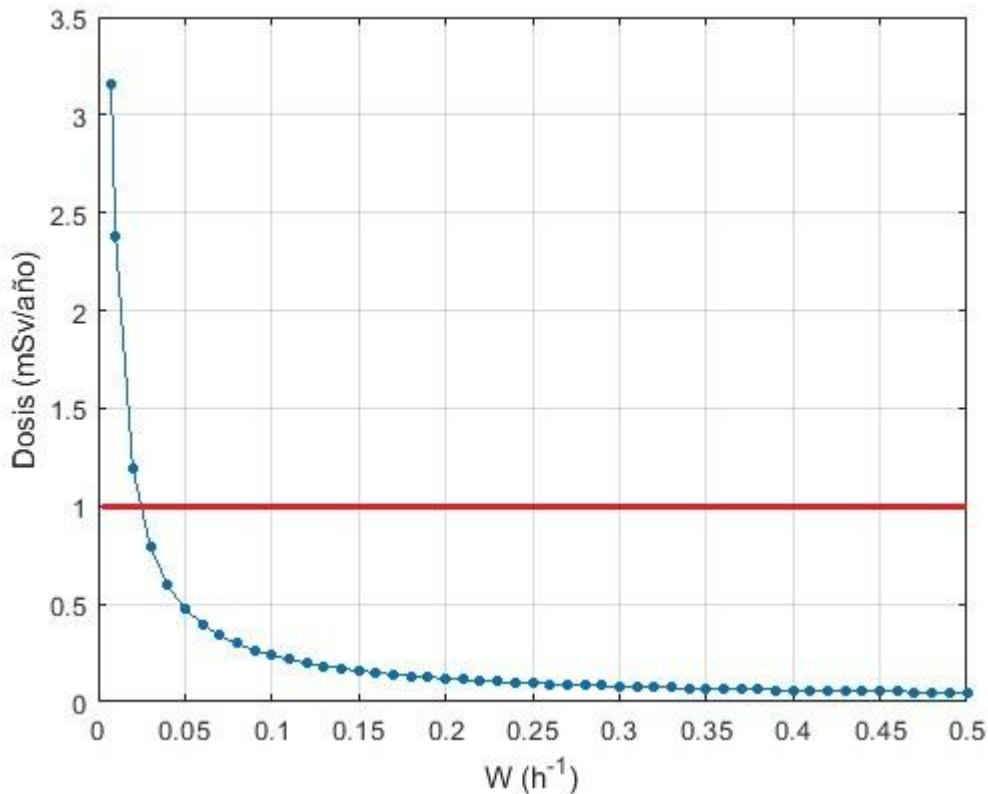


Figura 44. Representación de la Dosis (mSv/años) frente a la tasa de ventilación W (h^{-1}).

En la Figura 44 se muestra la representación de la dosis inhalada respecto a la tasa de ventilación (W) y, en ella se puede observar cómo la dosis inhalada desciende exponencialmente a medida que aumenta la tasa de ventilación. Además, se ha añadido una línea roja que representa 1 mSv al año que es la dosis máxima recomendada para miembros del público.

A partir de los resultados obtenidos se calcula la tasa de ventilación para que la dosis sea inferior a 1 mSv/año.

$$W = 0.02382 h^{-1}$$

Esto significa que el aire debe tener unas 0.02382 renovaciones cada hora para que la dosis sea menor que 1 mSv/año.

CASO 2:

Para este caso, como se ha explicado anteriormente, se va a utilizar el valor más desfavorable de la tasa de ventilación, que es el de la constante de decaimiento del radón, y un tiempo de exposición de 3 horas al día.

$$W = 0.007554 h^{-1}$$

$$t_{\text{exposición}} = 1095 h$$

La concentración en el interior del baño que se obtiene a partir de estos valores es la siguiente:

$$[Rn]_{indoor} = 800.09 Bq/m^3$$

Para el cálculo de la dosis, el factor de equilibrio y la constante de dosis son los mismos que para el Caso 1. El valor resultante de la dosis inhalada para este caso es el siguiente:

$$Dosis = 3.15 \text{ mSv/año}$$

Para reducir este valor de dosis a 1 mSv/año, se va a realizar un ajuste de mínimos cuadrados a partir de las tasas de exhalación de los tres materiales. Se van a añadir las siguientes restricciones para que los materiales que exhalan más sigan exhalando más después de realizar el ajuste.

- Dosis = 1 mSv/año
- Exhalación Crema Julia > Exhalación Rosa Porriño
- Exhalación Crema Julia > Exhalación Porcelánico
- Exhalación Rosa Porriño > Exhalación Porcelánico

Con estas restricciones y aplicando un ajuste por mínimos cuadrados se obtienen las siguientes tasas de exhalación para obtener una dosis de 1 mSv al año.

Tabla 33. Tasas de exhalación calculadas para obtener una dosis de 1 mSv/año para el Caso 2.

Material	Exhalación (Bq/m²·d)	% Reducción
Rosa Porriño	7.65	82.13 %
Crema Julia	21.45	67.67 %
Porcelánico súper blanco	6.15	3.60 %

A partir de las tasas de exhalación y los porcentajes de reducción mostrados en la Tabla 33 se obtendría una dosis de 1 mSv al año. La reducción de la tasa de exhalación se podría realizar mediante el barnizado o la pintura de las piezas para que disminuyeran la exhalación de radón al aire.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se ha llevado a cabo el estudio de la exposición debida a la exhalación del Rn^{222} en los materiales de construcción más comunes, utilizando distintos métodos y analizando su efecto en la salud de las personas. A partir de esta investigación, se ha llegado a las siguientes conclusiones.

- Se han seleccionado los materiales que más probabilidad tenían de tener una alta tasa de exhalación de radón a partir de datos ofrecidos por el "Proyecto EXTRADON". Esta selección se ha realizado a partir de la caracterización de distintos tipos de materiales, eligiendo aquellos que superaban el índice de actividad radiactiva en 1. Los materiales seleccionados para el estudio del presente trabajo fueron el Rosa Porriño, el Azul Vizag y el Crema Julia.
- Se ha llevado a cabo la puesta a punto de tres métodos para la medida de la tasa de exhalación. Los tres métodos estudiados y utilizados han sido los electretes, las trazas y el RAD-7, siendo, los dos primero los métodos pasivos y el último el método activo.
- Para el método del RAD-7, se han comparado tres tipos de modelos matemáticos a partir de los valores experimentales de la pieza.
- Comparando los resultados a partir de los tres métodos, se ha llegado a la conclusión de que los tres son una buena opción para realizar el cálculo de la tasa de exhalación, todos los resultados se han situado en el mismo rango.
- Las tres piezas que se han estudiado han dado una tasa de exhalación distinta, perteneciendo a la tasa más alta la pieza Crema Julia con un valor máximo de $66.35 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. La segunda pieza con el valor más alto ha sido la Rosa Porriño con $42.81 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Y, por último, la pieza Azul Vizag es la que ha resultado tener una tasa de exhalación más baja con $3.83 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.
- A partir de los resultados que se han obtenido con el método de los electretes de la pieza Azul Vizag se ha podido comprobar que la tasa de exhalación es muy baja. Además, mediante el método del RAD-7 se ha comprobado que los niveles de concentración de radón en el aire cuando se realizaba la medición de la pieza eran iguales a los niveles de concentración en el ambiente. Por este motivo, se descartó realizar la medición a partir del método de las trazas, ya que suponía un largo periodo de medición. Con estos resultados, se puede concluir que la caracterización de la pieza no es suficiente para saber si esta va a tener una alta tasa de exhalación, ya que depende también de las pinturas o barnices que se le hayan aplicado, y, por lo tanto, es necesario realizar alguna de las metodologías estudiadas para saber si realmente la pieza va a tener una alta tasa de exhalación o no.
- Con los resultados de los tres métodos, se ha realizado un estudio según distintos aspectos como el coste que supone, el periodo de medición o la acreditación. Estudiando todos los casos posibles, se ha seleccionado que el método más viable es el de los electretes. Tiene un tiempo

de duración bajo, una precisión de medición media, una dificultad de manejo fácil, un coste bajo y, además, el departamento en el cual se ha realizado este estudio estaba acreditado para la ejecución de este método.

- Además, se ha realizado una base de datos de distintos tipos de materiales de construcción donde se muestra el valor de la tasa de exhalación medida con el método de los electretes, ya que es el método que se ha seleccionado en este proyecto después de comparar los otros dos. Esta base de datos se ha realizado para el "Proyecto Exradón" con el fin de saber cuáles son los materiales que exhalan más radón, y, por lo tanto, aplicarles algún tipo de protección para reducir su exhalación.
- Con el cálculo de la dosis se ha observado que los materiales de construcción pueden llegar a crear altas concentraciones dentro de una habitación cerrada, superando el nivel de dosis recomendado de 1 mSv/año y siendo realmente peligrosos para la salud de las personas. Otro aspecto muy importante que se ha observado en el cálculo de la dosis es que hay dos maneras de que la dosis disminuya potencialmente. Por un lado, con la variable de la tasa de ventilación, se ha observado que con una buena ventilación la dosis que inhala una persona es mucho más baja ya que la concentración del radón disminuye notablemente. Y, por otro lado, otra de las opciones para la disminución de la dosis sería reducir la tasa de exhalación que tienen los materiales aplicándoles pinturas o barnices que no dejarían que el radón escapase del propio material.
- Por último, concluir este proyecto recalcando que es necesario la aplicación de nuevas normativas que regulen los materiales de construcción y la seguridad de las personas. Para ello, es indispensable futuras líneas de investigación que estudien el radón en los materiales de construcción y como aplicar medidas de seguridad, para que no afecte a largo plazo en la salud de las personas.

Para finalizar con las conclusiones, en el presente proyecto se ha contribuido en la ODS 3 "Salud y Bienestar", ya que se ha realizado el estudio de la tasa de exhalación del radón en distintos materiales de construcción y se han implementado distintas metodologías para poder calcularla. Esta investigación contribuye al conocimiento de que la población está expuesta inconscientemente al gas radón, el cual es cancerígeno y, por lo tanto, supone un gran riesgo para su salud.

Se ha contribuido con las siguientes metas de la ODS 3:

- Meta 3.9: que implica para 2030 la reducción del número de muertes y enfermedades producidas por la contaminación del aire.
- Meta 3.d: en la cual se quiere reforzar la reducción de riesgos y gestión de riesgos para la salud nacional y mundial.

Con la realización de este trabajo se concluye que es muy importante nuevas líneas de investigación del radón para así poder reducir el riesgo que este supone.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- *Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción* (SUB-33/2021). (22/12/21 - 21/12/23). Investigación competitiva proyectos. CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR.
- Consejo de Seguridad Nuclear (2017). Mapa del potencial de radón en España. [Mapa del potencial de radón en España - CSN](#)
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). (2018). Sistemas de detección de la concentración de radón en aire. [Figura].
- Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. Diario Oficial de la Unión Europea L nº 13, de 17 de enero de 2014.
- DURRIGE Company Inc (2014). *Detector de radón RAD7*, (Revisión 7.2.8). R7MAN v7.2.8 Spanish 2014-06-25 (durridge.com)
- Frutos Vázquez, B., Olaya Adán, M., (2010). Protección frente la inmisión del gas radón en edificios (INT-04.20). Consejo de seguridad Nuclear (CSN).
- Fuente Lastra, M. (2016). Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos [TFM, Universidad de Cantabria]. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10902/9385>
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n%2B2, Uranium_series\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2, Uranium_series).svg)
- ISO/TS 11665-13:2017 - Measurement of Radioactivity in the Environment — Air: Radon 222 — Part 13: Determination of the Diffusion Coefficient in Waterproof Materials: Membrane Two-Side Activity Concentration Test Method.
- Kotrappa, P., & Stieff, F. (2008). Electret ion chambers (eic) to measure radon exhalation rates from building materials. In *Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2008 International Symposium* (pp. 14-17).
- Mirion Technologies. "What is radiation?" (9 de Octubre, 2018). [Figura]. Recuperado de: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Radiaci%C3%B3n#cite_ref-5
- Muñoz Aguado AB, Cañete Hidalgo SA, Gordo Puertas E, Pastor Vega JM. Estudio de calidad del aire interior en edificios de la Universidad de Málaga: concentraciones de radón. *Rev. Salud ambient.* 2022; 22(2):150-158
- Noverques Medina, A. (2022). *Estudio del comportamiento del gas radón (222Rn) en los procesos de transferencia en agua y en aire* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2022). ¿Qué es la radiación? Recuperado de: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). El radón y sus efectos en la salud. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

- Park, B., Yoo, J., Kim, G., Lee, J., Lee, J., Shin, S., & Kim, S. (2023). Estimation and validation of the corrected short-term model for radon exhalation rate on building materials. *Building and Environment*, 234, 110181.
- Piedecausa-García, B., Payá, S. C., Recio, M., & Barbudo, M. A. J. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *Cemento Hormigón*, 946, 34-50. Recuperado de: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27056/1/Radiactividad%20natural%20de%20los%20materiales%20de%20construcci%3%b3n Parte%202.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27056/1/Radiactividad%20natural%20de%20los%20materiales%20de%20construcci%3%b3n%20Parte%202.pdf)
- Rad Elec Inc. (2022). *Radon in Water User's Manual* (Version 3.1).
- Radiaciones ionizantes - INSST - Portal INSST - INSST. (s. f.). Portal INSST. *Poder de penetración de los distintos tipos de radiaciones ionizantes [Figura]*, de <https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-fisicos/radiaciones-ionizantes>.
- ShiveHattery. (s.f.). [Figura]. Recuperado de: <https://www.shive-hattery.com/work/detail/169/radon>
- Stajic, J. M., Nikic, B., Gulan, L., Zivkovic, M., Radonjic, S., & Nikezic, D. (2023). Estimation of radon emanation power: a comparison of different methods. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-9.
- Tene, T., Gomez, C. V., Usca, G. T., Suquillo, B., & Bellucci, S. (2021). Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of Highland Region of Ecuador. *Construction and Building Materials*, 293, 123282.
- Uranium-238 Decay Chain - Inspection Gallery - InterNACHI®. (s. f.). *Cadena de desintegración del Uranio 238 [Figura]*. Recuperado de: <https://www.nachi.org/gallery/radon/uranium-238-decay-chain>
- Yousef, H. A., El-Farrash, A. H., El Ela, A., & Merza, Q. (2015). Determination of radon concentrations in some building materials using passive technique. *Intern. J. Phys. Res.*, 5 (2) 35, 46.
- Zeeb, H., & Shannoun, F. (2015). Manual de la OMS Sobre el Radón en Interiores: Una perspectiva de salud Pública.

DOCUMENTO II:

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	95
CAPÍTULO 2. PRESUPUESTO	97
2.1. COSTES DE MANO DE OBRA.....	97
2.2. COSTES DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.	97
2.3. ÚTILES DE LABORATORIO.....	98
2.4. PRESUPUESTO TOTAL.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto de Mano de Obra.	97
Tabla 2. Presupuesto de Equipos y Herramientas con una amortización de 10 años.	97
Tabla 3. Presupuesto de Equipos y Herramientas con una amortización de 5 años.	98
Tabla 4. Presupuesto de Reactivo y Materias Primas.	98
Tabla 5. Presupuesto de Material del Laboratorio.	98
Tabla 6. Presupuesto de Ejecución Material.	99
Tabla 7. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC).	99

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es definir el presupuesto que supone la realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM). Es de gran importancia la realización de este documento para que las futuras líneas de investigación que quieran medir la tasa de exhalación en los materiales de construcción sepan la inversión que deben de hacer.

Para la ejecución del presupuesto se aplicarán los costes de mano de obra, el material utilizado para las mediciones, la amortización de los equipos y los gastos adicionales.

CAPÍTULO 2. PRESUPUESTO

2.1. COSTES DE MANO DE OBRA.

En este apartado se detallan los costes asociados a la mano de obra que corresponden al personal que realiza el proyecto. El personal se compone de dos doctoras en ingeniería química responsables de la tutorización de este trabajo y de la alumna del máster en ingeniería química.

Tabla 1. Presupuesto de Mano de Obra.

Mano de Obra					
Ref	Ud	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
O1	h	Graduada en Ingeniería Química	19.99	300	5997.00
O2	h	Doctora en Ingeniería Química	51.40	25	1285.00
O3	h	Doctora en Ingeniería Química	51.40	25	1285.00
TOTAL					8567.00

2.2. COSTES DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.

En este apartado se detallan los costes de los equipos amortizados que se han utilizado para el proyecto. Se ha estimado un periodo de amortización de 10 años para los equipos que tienen una mayor duración y un periodo de 5 años para los equipos que tienen menor duración.

Tabla 2. Presupuesto de Equipos y Herramientas con una amortización de 10 años.

Equipos y herramientas (10 años)						
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Precio amortización (€)	Cantidad	Importe (€)
E1	año	Detector Radón RAD-7	10000.00	1000	0.12	120
E2	año	Medidor de voltaje SPER-1 Reader Voltage	2595.00	259.5	0.07	18.65
E3	año	Microscopio, reveladora de trazas y software RadoMeter RSV10	60000.00	6000.00	0.008	48
E4	año	Ordenador personal	700	70	0.25	17.5
E5	año	Balanza	750	75	0.005	0.37
E6	año	Estufa	1600	160	0.008	1.28
TOTAL						206.10

Estudio de la exposición al Radón 222 exhalado a partir de los materiales de construcción empleados en viviendas.

Tabla 3. Presupuesto de Equipos y Herramientas con una amortización de 5 años.

Equipos y Herramientas (5 años)						
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Precio de amortización (€)	Cantidad	Importe (€)
E7	año	Bidón de 30 L con cierre de ballesta	45	9	0.11	1.03
E8	año	Detector de electretes (ST)	28	5.6	0.33	1.84
E9	año	Cámara de electretes tipo S	50	10	0.33	3.3
E10	año	4 jarras	600	120	0.55	62.46
E11	año	Soporte metálico	40	8	0.11	0.92
TOTAL						69.56

2.3. ÚTILES DE LABORATORIO.

En este apartado se tienen en cuenta los costes asociados a los materiales y herramientas que no son amortizables. Se han dividido en dos tablas, una de los reactivos y las materias primas y, por otro lado, el material de laboratorio.

Tabla 4. Presupuesto de Reactivo y Materias Primas.

Reactivos y materias primas					
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Cantidad	Importe (€)
R1	kg	Sodio hidróxido en lentejas	11.71	3	35.130
R2	L	Ácido acético (99-100%)	32.40	0.18	5.832
R3	L	Agua Destilada	0.20	24	4.800
TOTAL					45.70

Tabla 5. Presupuesto de Material del Laboratorio.

Material de laboratorio					
Ref	Ud	Descripción	Precio adquisición (€)	Cantidad	Importe (€)
M1	Ud	Detector de trazas	25	30	750
M2	Ud	Alambre	4	1	4
TOTAL					754.00

2.4. PRESUPUESTO TOTAL.

En la Tabla 6 se muestra el presupuesto de ejecución material (PEM).

Tabla 6. Presupuesto de Ejecución Material.

Presupuesto Ejecución Material	
Capítulo	Importe (€)
Mano de Obra	8567.00
Equipos y Herramientas (10 años)	206.10
Equipos y Herramientas (5 años)	69.56
Reactivos y Materias Primas	45.70
Material de Laboratorio	754.00
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	9642.36

Tabla 7. Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC).

Presupuesto Ejecución por Contrata (PEC)	
Capítulo	Importe (€)
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	9642.36
Gastos Generales 13%	1253.50
Beneficio Industrial 6%	578.54
Costes indirectos 4%	385.69
IVA 21%	2024.89
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	13885.98

El presupuesto total para la realización del Trabajo Fin de Máster es de **TRECE MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y CINCO EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS**.

DOCUMENTO III:

PLANO

