



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis tutor/as toda la ayuda prestada durante estos meses. A Gúmer, per confiar i pensar en mi per a fer este treball, que sabies que m'encantaria. A María, por haberme ayudado tanto y estar siempre que lo he necesitado (con o sin TFM). A Belén, por todas las horas que has estado conmigo, por haberle dado la vuelta al proyecto mil veces y por confiar en mí desde el primer momento. Sois los tres mis modelos (cada uno a su manera) a seguir.

A José Luis Vivancos, por su ayuda en parte de este trabajo.

A la meua família, per acompanyar-me en la recerca dels radoncitos, per escoltar-me i estar sempre al meu costat.

Als meus pares, per confiar en mi en cada cosa que faig, per ajudar-me i recolzar-me en este i tots els projectes de la meua vida. A tu pare, per sempre, sempre, fer-me pensar i re-pensar cada cosa i fer-me vore que podem en tot. Y a ti ma, por acompañarme siempre en todo y a todo, por ayudarme, y cuidarme tanto como lo haces. Eres mi persona.



## Resumen

El radón es un gas radiactivo producido por la desintegración radiactiva del radio y del uranio. Su presencia en suelos y materiales de construcción y la gran preocupación que existe por la contaminación y seguridad de la población en la actualidad, hace necesaria la investigación de las cantidades de radón exhalado, siguiendo así con la Directiva 2013/59/EURATOM. Esta Directiva deberá ser incorporada a la legislación española en el año 2018.

En el presente Trabajo Final de Máster se pretende desarrollar metodologías para la medición de la tasa de exhalación de radón empleando distintas tecnologías. En concreto, de entre las distintas tecnologías existentes, se han seleccionado los cuatro métodos siguientes: sonda de gas de suelo conectada a un monitor de detección de radón, cámara de emisión superficial conectada a un monitor de detección de radón, cámara H conectada a un electrete, y *canister* de carbón activo medido con un detector de centelleo de yoduro sódico.

Para poner a punto las técnicas de medición y desarrollar las metodologías de medida pertinentes se han realizado mediciones en distintas localizaciones con previsión de diferentes valores de tasa de exhalación de radón. Los resultados se compararán para analizar las diferencias encontradas entre las distintas técnicas y para determinar los posibles factores de influencia en las diferencias encontradas.

Finalmente, se propondrán mejoras aplicables a las técnicas seleccionadas teniendo en cuenta la entrada en vigor de la Directiva anteriormente nombrada.

**Palabras clave:** Radón, exhalación, mediciones de radón.

## Resum

El radó és un gas radiactiu produït per la desintegració radiactiva del radi i del urani. La seua presència en sols i materials de construcció, i la gran preocupació existent per la contaminació i seguretat de la població en l'actualitat, fa necessària la investigació de les quantitats de radó exhalat, seguint així amb la Directiva 2013/59/EURATOM. Aquesta Directiva haurà de ser incorporada a la legislació espanyola en 2018.

En el present Treball Fi de Màster es pretén desenvolupar metodologies per a medició de la taxa d'exhalació de radó mitjançant diverses tecnologies. En particular, de entre les tecnologies existents, s'han seleccionat quatre mètodes: sonda de gas de sòl connectada a un monitor de detecció de radó, càmera de emissió superficial connectada a un monitor de detecció de radó, càmera H connectada a un electret i cànister de carbó actiu.

Per a la posta a punt de les tècniques de medició i desenvolupar les metodologies de mesura pertinents, s'han realitzat mesures en distintes localitzacions amb previsió d'obtindre diferents valors de taxes d'exhalació. Els resultats es compararan per a analitzar les diferències trobades entre les tècniques i per a determinar possibles factors d'influència en aquestes diferències trobades.

Finalment es proposaran una sèrie de millores aplicables a les tècniques seleccionades tenint en compte l'entrada en vigor de la Directiva anteriorment nombrada.

**Paraules clau:** Radó, exhalació, mesura de radó.

## Abstract

Radon is a radioactive gas produced by the radioactive decay of radium and uranium. Its presence in soils and building materials and the great concern that exists for the contamination and safety of the population at present makes it necessary to investigate the quantities of exhaled radon, thus following the Directive 2013/59/EURATOM. This Directive should be incorporated into Spanish legislation in the year 2018.

In this project is intended to develop methodologies for the measurement of radon exhalation rate using different technologies. In particular, the following four methods have been selected from among the following methods: soil gas probe connected to a radon detection monitor, surface emission chamber connected to a radon detection monitor, H chamber connected to an electret, and charcoal active canister measured with a sodium iodide scintillation detector.

In order to prepare the measurement techniques and to develop relevant measurement methodologies, measurements have been made at different locations with different radon exhalation rate estimates. The results will be compared to analyze the differences found between the techniques and to determine the possible influence by external factors.

Finally, improvements to the selected techniques will be proposed taking into account the Directive 2013/59/EURATOM.

**Keywords:** Radon, exhalation, radon measurements



# **ÍNDICE GENERAL**

**DOCUMENTO I: MEMORIA**

**DOCUMENTO II: PRESUPUESTO**

**DOCUMENTO III: PLANOS**



DOCUMENTO I:

---

MEMORIA



## Contenido

|   |    |
|---|----|
| 1. PRÓLOGO .....  | 7  |
| 2. INTRODUCCIÓN .....   | 9  |
| 2.1. Conceptos fundamentales .....                            | 9  |
| 2.1.1. Desintegración radiactiva.....                         | 10 |
| 2.1.2. Estabilidad nuclear .....                              | 12 |
| 2.1.3. Ley de desintegración radiactiva.....                  | 13 |
| 2.1.4. Origen de la radiactividad .....                       | 13 |
| 2.2. Incidencia radiológica.....                              | 15 |
| 3. EL RADÓN .....   | 17 |
| 3.1. Procedencia, isótopos y propiedades .....                | 17 |
| 3.2. Problemática del radón para la salud .....               | 21 |
| 3.3. Fuentes de radón .....                                   | 23 |
| 3.4. Distribución de los niveles de radón en España.....      | 24 |
| 3.5. Exhalación de radón .....                                | 27 |
| 3.5.1. Emanación .....  | 28 |
| 3.5.2. Transporte .....                                       | 29 |
| 3.5.3. Exhalación .....                                       | 29 |
| 3.6. Movilidad del radón .....                                | 31 |
| 3.7. Ciclos de variabilidad de la concentración de radón..... | 33 |
| 3.8. Normativa y legislación .....                            | 34 |
| 3.8.1. Normativa vigente.....                                 | 34 |
| 3.8.2. Normativa futura.....                                  | 36 |
| 3.9. Descripción de las técnicas de medición de radón .....   | 37 |
| 4. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....                            | 39 |
| 4.1. Objetivos .....  | 39 |
| 4.2. Justificación técnica.....                               | 40 |
| 4.3. Justificación académica .....                            | 40 |
| 5. METODOLOGÍA.....   | 41 |
| 5.1. Revisión bibliográfica .....                             | 43 |
| 5.2. Selección de las técnicas de medición .....              | 45 |
| 5.3. Selección de la ubicación de las mediciones.....         | 46 |
| 6. RESULTADOS .....   | 50 |
| FASE 1: Técnicas seleccionadas.....                           | 50 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Selección de las técnicas .....  | 50  |
| 6.2. Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección RAD7.....                    | 53  |
| 6.2.1. Descripción de la técnica.....   | 53  |
| 6.2.2. Puesta a punto de la técnica .....   | 57  |
| 6.3. Cámara de emisión superficial conectada al monitor de detección de radón RAD7.....   | 63  |
| 6.3.1. Descripción de la técnica.....   | 63  |
| 6.3.2. Puesta a punto .....   | 64  |
| 6.4. Cámara H conectada a un electrete.....   | 67  |
| 6.4.1. Descripción de la técnica.....   | 67  |
| 6.4.2. Puesta a punto de la cámara H .....  | 68  |
| 6.5. Cánister de carbón activado medido con un detector de centelleo de yoduro sódico ... | 71  |
| 6.5.1. Descripción de la técnica.....   | 71  |
| 6.5.2. Puesta a punto del cánister de carbón activo .....                                 | 72  |
| 6.6. Consideraciones importantes a tener en cuenta.....                                   | 77  |
| 6.7. Programación de las mediciones .....   | 78  |
| 6.7.1. Programación de medidas de alta concentración.....                                 | 79  |
| FASE 2: Análisis de los resultados .....  | 81  |
| 6.9. Resultados obtenidos según la técnica seleccionada .....                             | 81  |
| 6.9.1. Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección RAD7 .....                 | 81  |
| 6.9.2. Cámara de emisión superficial conectada al monitor de detección RAD7 .....         | 84  |
| 6.9.3. Cámara H conectada a un electrete.....   | 88  |
| 6.9.4. Cánister de carbón activo.....   | 91  |
| 6.10. Resultados obtenidos en función de la ubicación.....                                | 94  |
| 6.10.1. Sonda de gas de suelo .....   | 94  |
| 6.10.2. Mediciones de fondo.....  | 98  |
| 6.10.3. Mediciones en Peñíscola .....   | 99  |
| 6.10.4. Mediciones en el depósito que contiene una piedra pechblenda .....                | 100 |
| 6.11. Propuestas de mejora .....  | 101 |
| 7. CONCLUSIONES .....   | 103 |
| 7.1. Líneas futuras .....   | 104 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA .....   | 105 |

**Índice de Figuras**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Tipos de radiación según la interacción con la materia (Gob. Japonés, 2011) .....                       | 10 |
| Figura 2: Curva de estabilidad nuclear (Universidad de Alcalá, 2012).....   | 12 |
| Figura 3. Distribución de la radiación percibida por los seres humanos (CSN, 1992).....                           | 14 |
| Figura 4. Efecto de las radiaciones en el cuerpo humano (Núñez, 2008).....  | 16 |
| Figura 5. Cadena desintegración del Uranio 238 (Janis 4.0, 2013) .....  | 17 |
| Figura 6. Cadena de desintegración del Torio 232 ( Janis 4.0, 2013).....  | 18 |
| Figura 7. Cadena de desintegración del Uranio 235 (Janis 4.0, 2013) .....   | 18 |
| Figura 8. Cadena de desintegración del radón 222 (Janis 4.0, 2013).....   | 19 |
| Figura 9. Esquema de propagación del radón (Univ. Granada, 2000) .....  | 20 |
| Figura 10. Problemática del radón para la salud (OMS, 2009) .....   | 22 |
| Figura 11. Mapa predictivo MARNA de las concentraciones de radón en España (CSN, 2013) .                          | 24 |
| Figura 12. Categorías de exposición al radón en la provincia de Castelló a partir del mapa MARNA (CSN, 2013)..... | 25 |
| Figura 13. Categorías de exposición al radón en la provincia de València a partir del mapa MARNA (CSN, 2013)..... | 26 |
| Figura 14. Categorías de exposición al radón en la provincia de Alacant a partir del mapa MARNA (CSN, 2013).....  | 26 |
| Figura 15. Proceso de liberación del radón a la atmósfera (Fuente, 2016) .....                                    | 27 |
| Figura 16. Flujo de radón hacia el interior de una vivienda (CSN).....  | 31 |
| Figura 17. Vías de entrada del gas radón en una vivienda (CSN, 2012).....   | 32 |
| Figura 18. Esquema de los métodos de medición del radón y sus descendientes.....                                  | 38 |
| Figura 19. Diagrama de bloques de la metodología aplicada en el TFM .....   | 41 |
| Figura 20. Cronograma de la metodología seguida .....   | 42 |
| Figura 21. Esquema del proceso de análisis bibliográfico (n=nº de documentos) .....                               | 43 |
| Figura 22. Selección de la ubicación de las medidas a realizar .....  | 46 |
| Figura 23. Ubicación para las mediciones de fondo (UPV, 2017) .....   | 46 |
| Figura 24. Ubicación del depósito para la medición de concentraciones medias de radón.....                        | 47 |
| Figura 25. Ubicación para mediciones de fondo y concentraciones medias .....                                      | 48 |
| Figura 26. Localización de Peñíscola (Google Maps, 2016).....   | 49 |
| Figura 27. Detector de radón RAD7 (DurrIDGE RAD7 Manual, 2015).....   | 54 |
| Figura 28. Espectro de energía alfa del monitor en continuo RAD7 (DurrIDGE RAD7 Manual, 2015) .....               | 54 |
| Figura 29. Sonda <i>Soil Gas Probe</i> ( <i>User Manual</i> , 2016).....  | 56 |
| Figura 30. Circuito de funcionamiento de la sonda de gas ( <i>Soil Gas Probe Manual</i> ,2016) .....              | 57 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 31. Información de identificación del RAD7 .....   | 59  |
| Figura 32. Dispositivo creado para la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo .....   | 61  |
| Figura 33. Configuración para la medición de exhalación de radón mediante la sonda de gas. 61   |     |
| Figura 34. Cámara superficial de exhalación radón (Emission Chambers User Manual, 2012)..   | 63  |
| Figura 35. Circuito cámara de emisión superficial (Emission Chambers User Manual, 2012).....  | 63  |
| Figura 36. Circuito de purga para la cámara de emisión superficial .....  | 64  |
| Figura 37. Ejemplo cámara de acumulación UNE EN ISO 11665-5 .....   | 65  |
| Figura 38. Cámara H conectada al electrete .....  | 67  |
| Figura 39. Electrete Short-Term (S).....  | 67  |
| Figura 40. Medidor de voltaje SPER-1 Voltage Reader .....   | 68  |
| Figura 41. Esquema del detector de centelleo (Fuente,2016).....   | 71  |
| Figura 42. Espectro gamma (Software GammaVision) .....  | 72  |
| Figura 43. Cánister de carbón activo y recipiente impermeable al radón .....  | 72  |
| Figura 44. Cánister de carbón activo expuesto al aire .....   | 73  |
| Figura 45. Resultados obtenidos en la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo para los tres escenarios propuestos .....   | 83  |
| Figura 46. Ejemplo de obtención de la pendiente para la medición de fondo .....   | 84  |
| Figura 47. Ejemplo de obtención de la pendiente para el depósito que contiene una piedra pechblenda.....  | 85  |
| Figura 48. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante la cámara de emisión superficial .....  | 87  |
| Figura 49. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante la cámara H.....  | 90  |
| Figura 50. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante el cánister de carbón activo.....   | 93  |
| Figura 51. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones de fondo .....   | 94  |
| Figura 52. Puntos medición Peñíscola.....   | 95  |
| Figura 53. Localización de los puntos más conflictivos de la Marjal de Peñíscola.....   | 96  |
| Figura 54. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones en Peñíscola .....                                     | 96  |
| Figura 55. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones en el depósito que contenía una piedra pechblenda..... | 97  |
| Figura 56. Resultados obtenidos en las mediciones de fondo.....   | 98  |
| Figura 57. Resultados obtenidos en las mediciones realizadas en Peñíscola .....   | 99  |
| Figura 58. Resultados obtenidos en las mediciones realizadas en el depósito que contiene una piedra pechblenda .....  | 100 |

**Índice de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Principales propiedades fisicoquímicas de los isótopos $^{222}\text{Rn}$ , $^{220}\text{Rn}$ y $^{219}\text{Rn}$ (CSN, 2012) .....                  | 19 |
| Tabla 2. Concentración de uranio en función del tipo de roca (Quindós, 1995) .....   | 23 |
| Tabla 3. Clasificación de zonas geográficas en categorías de exposición potencial al radón según su nivel de radiación gamma (CSN, 2013) .....               | 25 |
| Tabla 4. Límites de dosis para diferentes clases de personal (Fuente: CSN) .....   | 34 |
| Tabla 5. Criterios y alternativas.....   | 51 |
| Tabla 6. Protocolos monitor RAD7(Fuente: DurrIDGE RAD7 Manual) .....   | 58 |
| Tabla 7. Cuadro resumen: mediciones sonda de gas de suelo .....  | 62 |
| Tabla 8. Cuadro resumen: mediciones cámara de emisión superficial.....   | 66 |
| Tabla 9. Cuadro resumen mediciones cámara H conectada a un electrete .....   | 69 |
| Tabla 10. Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la concentración de gas radón (E-PERM Manual, 2015).....                                | 69 |
| Tabla 11. Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la tasa de exhalación de gas radón (E-PERM Manual, 2015) .....                          | 69 |
| Tabla 12. Cuadro resumen: mediciones mediante cámara H conectada a un electrete .....  | 70 |
| Tabla 13. Factor de calibración .....  | 75 |
| Tabla 14. Cuadro resumen: mediciones mediante cánister de carbón activo.....   | 76 |
| Tabla 15. Planificación temporal diaria de las mediciones .....  | 78 |
| Tabla 16. Organización temporal de las mediciones realizadas en Peñíscola .....  | 80 |
| Tabla 17: Resultados obtenidos en la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo .....   | 82 |
| Tabla 18: Dimensiones de la cámara de emisión superficial .....  | 85 |
| Tabla 19. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo exhalado mediante la cámara de emisión superficial.....                                      | 86 |
| Tabla 20. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola exhalado mediante la cámara de emisión superficial.....                                  | 86 |
| Tabla 21. Resultados obtenidos en la medición de radón exhalado en el depósito con una piedra pechblenda mediante la cámara de emisión superficial .....     | 86 |
| Tabla 22. Dimensiones de la cámara H .....   | 88 |
| Tabla 23. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo mediante la cámara H conectada a un electrete.....   | 89 |
| Tabla 24. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola mediante la cámara H conectada a un electrete.....                                       | 89 |
| Tabla 25. Resultados obtenidos en la medición de radón en un depósito que contiene una piedra pechblenda mediante la cámara H conectada a un electrete ..... | 89 |
| Tabla 26. Dimensiones de la cámara que contiene al cánister .....  | 92 |

Tabla 27. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo mediante el cánister de carbón activo..... 92

Tabla 28. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola mediante el cánister de carbón activo..... 92

Tabla 29. Resultados obtenidos en la medición de radón en un depósito que contiene una piedra pechblenda mediante la cámara H conectada a un electrete ..... 92

## 1. PRÓLOGO

El presente Trabajo Final de Máster pretende valorar distintas metodologías para la medición de exhalación y emanación de radón.

En 1984 se descubrió accidentalmente la posibilidad de encontrar elevadas concentraciones de Radón en las viviendas construidas, principalmente en zonas graníticas. Las cantidades elevadas de radón en domicilios se deben principalmente al tipo de suelo sobre el que se asienta el edificio así como a algunos materiales de construcción con elevado contenido en uranio. El radón puede penetrar en los edificios por cualquier grieta existente, por mínima que sea, y puede acumularse en su interior si no se tiene una adecuada ventilación de la vivienda. Esta exposición al radón representa casi el 50% de toda la radiación que afecta al ser humano a lo largo de su vida.

El radón está considerado como un elemento cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en concordancia con la Agencia de Protección Ambiental (EPA) (1987) de EEUU y con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) (1988). Estas agencias lo han clasificado como cancerígeno del grupo 1 (OMS, 2010). El radón se considera la segunda causa de cáncer de pulmón, tras el tabaquismo, en personas fumadoras, y la primera causa entre personas no fumadoras. Se le ha vinculado con la leucemia y la esclerosis múltiple. Sin embargo, en España existen pocas entidades que midan radón, y en concreto su exhalación, para poder realizar actividades de prevención que eviten la exposición elevada.

En línea con todas estas investigaciones, en 2013 el Diario Oficial de la Unión Europea publicó la Directiva 59/EURATOM que establece valores límite y planes de acción frente a la exposición de radón para viviendas, edificios públicos y lugares de trabajo. Esta normativa hace hincapié en el control de las concentraciones de gas radón en aire en el interior de las viviendas. En esta normativa no se mencionan valores límite o posibles acciones frente a la exhalación de radón, previa a la construcción de las viviendas.

Esta directiva y sus efectos en la construcción de viviendas debería ser traspuesta a la legislación española antes de febrero de 2018.

La norma española UNE-EN ISO 11665 “Medición de la Radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222” fue publicada en mayo de 2016. Esta norma consta de ocho partes, más dos en fase de elaboración, en las que se establecen los orígenes del radón y los distintos métodos de medición (puntual, integrada, en continuo, etc.) para determinar concentraciones promedio de energía potencial alfa y para la actividad volumétrica. Esta norma constituye la base del procedimiento a seguir en las mediciones de radón en aire y radón exhalado.

Por el momento, gran parte de los estudios realizados acerca del gas radón se basan en estimaciones de la concentración en aire en el interior de los edificios. La normativa actual se refiere a Bq/m<sup>3</sup> en el interior de edificios, así como a límites de dosis a percibir por el público, pero no hace referencia a concentraciones de radón exhalado.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) recomienda seguir las indicaciones de la Unión Europea para edificios ya construidos ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), mientras que la OMS, siguiendo análisis de coste eficaces, sugiere intervenir en aquellas zonas en las que más del 5% de las viviendas actuales presenten concentraciones de radón superiores a  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

Para evitar que las concentraciones de radón superen los límites legislativos, es necesario conocer las propiedades del terreno sobre el que se sustentan las viviendas y edificios. Se precisa medir las concentraciones de radón exhalado sobre la superficie para prevenir elevadas cantidades de gas radón después de la edificación. Conociendo la cantidad de radón del terreno, se podrían realizar mejoras (ventilaciones subterráneas, cámaras de aire, etc.) que evitasen la acumulación del gas en las viviendas.

Asimismo, en España son escasos, de momento, los laboratorios de ensayo acreditados por ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) para las mediciones de radón en aire, exhalación de radón y para medir la actividad de radón en agua. Al inicio de este TFM el único laboratorio acreditado para la exhalación del radón es el Laboratorio de Radiactividad de la Universidad de Cantabria LARUC (ENAC, 2016). Es por esto que se hacen necesarios estudios de las diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelo, teniendo en cuenta diferentes entornos, para su aprovechamiento en los diseños constructivos.

Por todo ello, este Trabajo Final de Máster pretende una aproximación a una realidad inmediata: la incorporación de una nueva directiva que regulará las cantidades de radón exhalado, a través del estudio y puesta a punto de técnicas de medición de la exhalación de radón.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Conceptos fundamentales

La materia está formada por moléculas, que a su vez están formadas por átomos cuyos núcleos contienen protones y neutrones, y electrones girando a su alrededor. En condiciones de equilibrio, las partículas que conforman el átomo, se encuentran unidas. Cuando existe una falta o un exceso de neutrones, este equilibrio se puede romper y los átomos se convierten en elementos inestables. Cuando esto sucede, aumenta la tendencia de los elementos inestables a transformarse en otros elementos.

La radioactividad puede definirse como un fenómeno físico natural que se produce en el núcleo de ciertos elementos capaces de transformarse en núcleos de elementos de otros átomos. Algunos cuerpos emiten radiaciones con distintas propiedades: producir fluorescencia, ionizar gases, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Esta emisión, su propagación y la transferencia de energía se denominan radiación y se produce mediante ondas electromagnéticas. Cuando la radiación atraviesa la materia, suele arrancar los electrones de los átomos exteriores, los más alejados del núcleo, y el proceso se conoce como proceso de ionización.

La radiación suele clasificarse según si tiene o no suficiente energía como para romper los enlaces que unen los distintos átomos del medio que irradian, esto es, radiación ionizante o no ionizante, respectivamente.

Las radiaciones ionizantes están formadas por *ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia (rayos gamma o rayos X) o por partículas (partículas alfa y beta o neutrones), con suficiente energía como para poder producir la ionización y romper los enlaces atómicos que mantienen unidas las moléculas en las células.* Según la dosis de radiación recibida, las alteraciones pueden ser de mayor o menor gravedad.

### 2.1.1. Desintegración radiactiva

Según la interacción con la materia, existen tres tipos diferentes de radiación, que se muestran en la Figura 1:

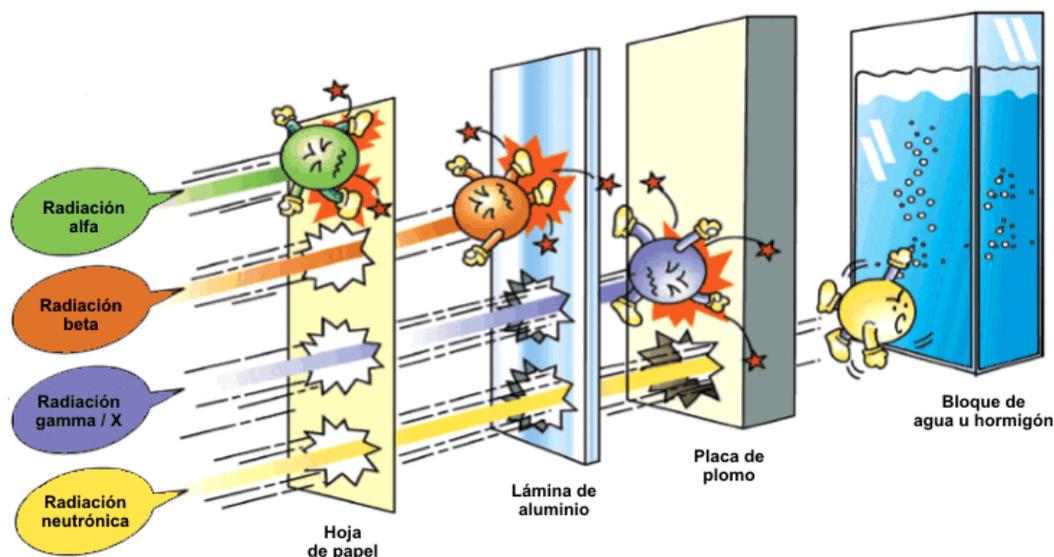


Figura 1. Tipos de radiación según la interacción con la materia (Gob. Japonés, 2011)

Siguiendo la representación de la Figura 1 y sabiendo que un proceso radiactivo es una *transición espontánea desde un estado energético inicial del núcleo a un estado final y que se produce debido a que la energía total del sistema inicial es superior a la del sistema final* (Franco, 2016), se pueden distinguir:

- **Radiactividad alfa**, formada por partículas pesadas con carga positiva, un núcleo de He formado por dos neutrones y dos protones. Sólo la pueden presentar nucleídos con número másico  $A > 150$ , y tiene una capacidad limitada de penetración en la materia. El proceso viene dado por la expresión de la Ec. 1:



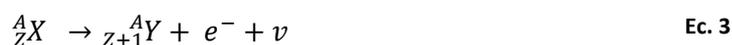
- **Radiactividad beta**, partículas ligeras formadas por positrones (con carga positiva) y por electrones (carga negativa). Tiene una capacidad de penetración en la materia ligeramente superior a la radiación alfa, pero menos intensa. Este tipo de emisión la puede presentar cualquier nucleído sea cual sea su número atómico  $Z$ . Los distintos tipos de radiación beta se agrupan en tres procesos de desintegración:

*1. Desintegración beta negativa:* emisión espontánea de electrones (partículas beta negativas) cuyas velocidades son muy próximas a la velocidad de la luz. Son emisores beta negativos los radionucleídos muy ricos en neutrones.

En este proceso, un neutrón (n) se convierte en un protón (p), un electrón ( $e^-$ ) y un neutrino ( $\bar{\nu}$ ) según la Ec. 2:



El núcleo descendiente tendrá un número atómico mayor que el precursor y mismo número másico, como se observa en la Ec. 3:



*2.Desintegración beta positiva:* emisión de positrones. En esta desintegración, un protón se convierte en neutrón, un electrón y un neutrino según la Ec. 4:



El núcleo descendiente tendrá un número atómico menor que el precursor y mismo número másico, tal y como se aprecia en la Ec. 5:



En la desintegración *beta* positiva, los positrones que se emiten no son partículas estables, sino que son emitidos y pierden parte de su energía cinética por lo que se combinan con un electrón libre del entorno.

*3.Captura electrónica:* algunos de los electrones que se encuentran en la corteza terrestre pueden ser capturados por un núcleo teniendo lugar el proceso mostrado en la Ec. 6:



La desintegración en forma de captura electrónica se produce de igual forma que en la desintegración beta positiva, según la Ec. 7:



•**Radiactividad gamma**, formada por fotones sin carga ni masa. Se considera la radiación más penetrante de todas. Este tipo de radiación se emite cuando un núcleo pasa de un estado excitado a otro de menor energía. El proceso se expresa mediante la Ec. 8, donde \* indica que el núcleo está en un estado excitado.



Existirá, además, un exceso de energía que será liberada o bien en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma, rayos X) o bien en forma de emisiones alfa, beta o gamma.

### 2.1.2. Estabilidad nuclear

La radiactividad proviene de la inestabilidad de algunos núcleos atómicos, concretamente del número de neutrones que lo conforman. Se considerará que el núcleo es estable si el número de neutrones es ligeramente superior al número de protones, ya que en él, tanto protones como neutrones están unidos por fuerzas cuya intensidad impide que escape cualquier partícula. Por el contrario, si el número de neutrones no está compensado con el número de protones, el núcleo del átomo no será estable y de forma espontánea tienden a alterar su composición emitiendo partículas y reaccionando hasta alcanzar una configuración estable (radiactividad).

Para obtener la curva de nucleidos estables, se representa el número de neutrones frente al número de protones tal y como se observa en la Figura 2:

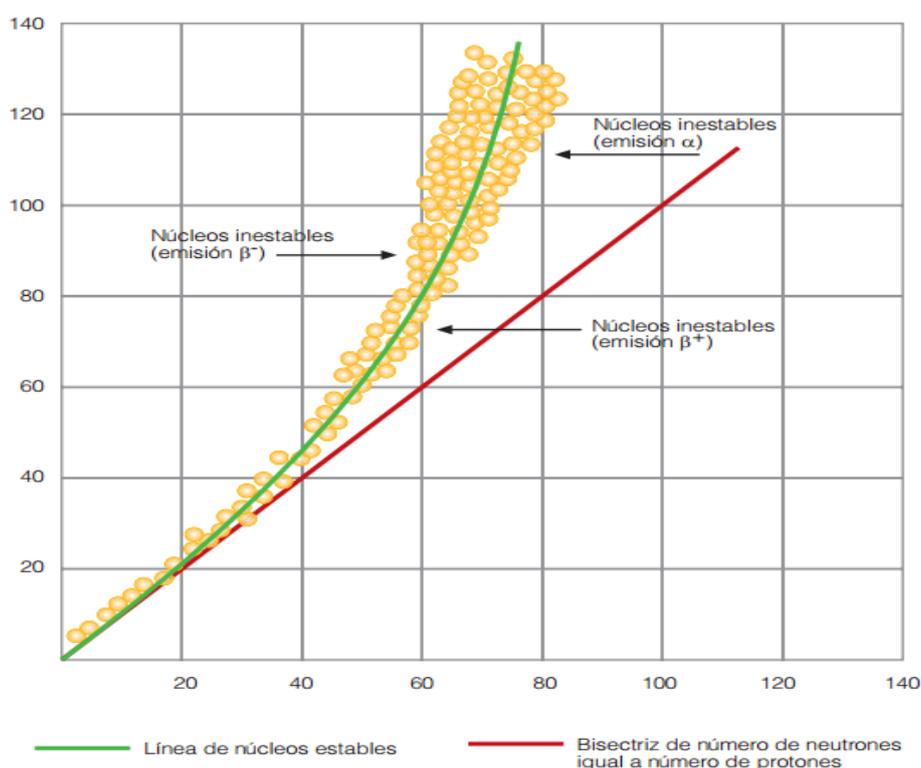


Figura 2: Curva de estabilidad nuclear (Universidad de Alcalá, 2012)

Sobre la bisectriz del cuadrante se sitúan los núcleos ligeros ya que contienen el mismo número de neutrones que de protones ( $A-Z=N=Z$ ). Para valores de  $Z>20$ , la curva se desvía de la bisectriz por la parte superior, lo que supone que el número de protones es inferior al número de neutrones de los núcleos pesados (Ródenas, 2003).

### 2.1.3. Ley de desintegración radiactiva

Los núcleos radiactivos siempre se desintegran de forma aleatoria independientemente de la temperatura, humedad, etc., del ambiente. Cada uno de los elementos radiactivos se caracteriza por una constante de desintegración ( $\lambda$ ) que indica la probabilidad de que un núcleo se desintegre por unidad de tiempo, aunque normalmente se utiliza otra constante: periodo de semidesintegración (Ródenas, 2003). El periodo de semidesintegración es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de una muestra determinada, según la Ec. 9:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{Ec. 9}$$

Siendo  $T$  el periodo de desintegración medido en unidades de tiempo (s) y  $\lambda$  la constante de desintegración (medida en unidades de tiempo<sup>-1</sup>).

Cada núcleo de un tipo de especie tiene una determinada probabilidad de desintegración aunque no se puede conocer qué núcleos exactamente van a sufrirla, sino cuántos. Es por ello, que se define el término de actividad como el promedio de desintegraciones por unidad de tiempo y no depende ni del tipo de radiación (alfa, beta, gamma) ni de su energía. La actividad se mide en el Sistema Internacional en Becquerelios, Bq (1Bq=1 desintegración por segundo) y equivale a la expresión de la Ec. 10:

$$A = \lambda \cdot N \quad \text{Ec. 10}$$

Siendo  $A$  la actividad radiactiva (medida en Bq),  $\lambda$  la constante de desintegración (medida en unidades de tiempo<sup>-1</sup>) y  $N$  número de núcleos por desintegrar.

### 2.1.4. Origen de la radiactividad

Tres cuartas partes de la radioactividad presente en el medio ambiente procede de la radiación cósmica pero también surge a partir de materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre como el uranio, el torio, o el gas radón (objeto de estudio del presente TFM). En la Figura 3, se muestra la contribución de las fuentes de exposición de origen natural y artificial a la dosis recibida por la población.



Figura 3. Distribución de la radiación percibida por los seres humanos (CSN, 1992)

Tal y como se observa en la figura anterior, los rayos cósmicos provenientes del exterior de la atmósfera y las radiaciones de origen natural suponen alrededor del 80% de la dosis recibida por una persona. El 20% restante proviene de radiaciones de origen artificial tales como los rayos X, los TAC, etc. El radón, como fuente de radiación natural contribuye en un 34% a la dosis efectiva recibida por el ser humano.

La magnitud con la que se mide la concentración de la actividad del radón es el Bequerelio por metro cúbico ( $Bq/m^3$ ) que expresa el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire. El Bequerel, expresa la actividad de la radiación que se produce por la desintegración del núcleo de un elemento radiactivo, que indica el número de desintegraciones por segundo del núcleo atómico del radón. Los niveles máximos legislativos que no deben ser superados en espacios cerrados y habitados se expresan en  $Bq/m^3$ .

En Estados Unidos en cambio, la concentración de gas radón se mide en picocurios por litro ( $pCi/L$ ). Siendo el curio, Ci, la cantidad de material en la que se desintegran  $3,7 \cdot 10^{10}$  átomos por segundo.

$$1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq \quad 1pCi/L = 37 Bq/m^3$$

## 2.2. Incidencia radiológica

La energía desprendida por las radiaciones al atravesar las células vivas produce iones y radicales libres que, a su vez, provocan cambios moleculares en las células afectadas por estas radiaciones. La transferencia de un material radiactivo a otro no radiactivo se denomina irradiación (irradiación externa en el caso de que la persona sólo estuviese expuesta a la radiación siempre y cuando la fuente emisora esté activa). Si hay contacto directo entre uno y otro material, se denomina contaminación radiactiva y ésta puede introducirse en el organismo por vía respiratoria, digestiva, dérmica o parental. Si los radionúclidos están simplemente depositados sobre la piel o la ropa, se tratará de contaminación externa, pero si por el contrario los radionúclidos han penetrado el organismo, se trata de contaminación interna.

El sometimiento de una persona a los efectos de los diferentes tipos de radiaciones (alfa, beta y gamma) puede ser (CSN, 2014):

- *Exposición interna:* se produce cuando un radionúclido es ingerido, inhalado o penetra de cualquier otra forma en el organismo y cesa cuando se elimina del organismo.
- *Exposición externa:* se produce cuando el radionúclido o material radiactivo se deposita sobre la piel o sobre cualquier tejido propio.
- *Exposición total:* suma de las exposiciones interna y externa.
- *Exposición continua:* se trata de una exposición externa que se produce durante un largo periodo de tiempo, o una exposición interna en el caso de que los radionúclidos se hayan introducido durante un corto periodo de tiempo.
- *Exposición parcial:* se produce cuando la exposición sólo afecta a una o varias zonas del organismo.

Las vías de exposición para determinar la incidencia radiológica son diversas. El cuerpo humano puede recibir dosis de radiación mediante la inhalación de algunos gases radiactivos como el radón. Además, puede ingerirse agua proveniente de algún río o acuífero contaminado o incluso por la ingesta de frutas y verduras cultivadas con tierras contaminadas. Hay que considerar también la cadena alimentaria humana: se come tanto carne como pescado que a su vez podrían haber ingerido alimentos también contaminados.

Los radionúclidos pueden emitirse o dispersarse rápidamente afectando al organismo humano tal y como se observa en el de la Figura 4.

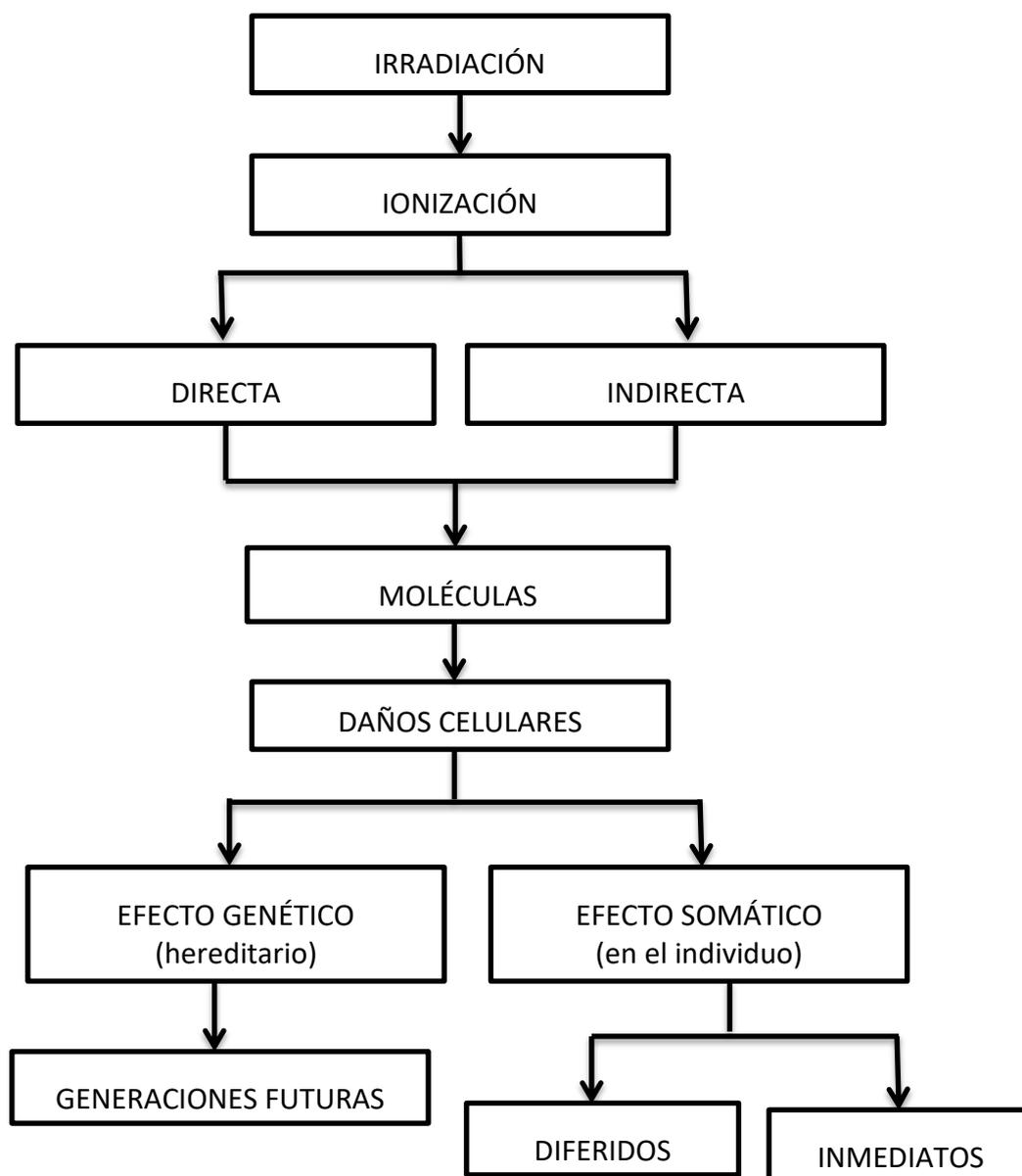


Figura 4. Efecto de las radiaciones en el cuerpo humano (Núñez, 2008)

Los efectos de la radiación en el cuerpo humano pueden considerarse efectos somáticos o genéticos. El efecto somático involucra a las células diploides y se manifestará en aquellos individuos que absorban las dosis de cualquier radiación recibida. Los efectos inmediatos se producen durante el primer año de exposición y se relacionan con el número de células muertas, con la reparación de daño y con la tasa de recambio de la célula irradiada (caída pelo, neumonitis rádica, etc.). Los efectos diferidos se producen a partir del año de haber recibido la dosis. Se relacionan estos efectos con el daño debido a la dosis y al de los mecanismos de reparación (fibrosis pulmonar, cataratas, etc.).

El efecto genético detalla las alteraciones genotípicas hereditarias que se producen como resultado de la mutación de los genes o cromosomas de las células germinales (Núñez, 2008).



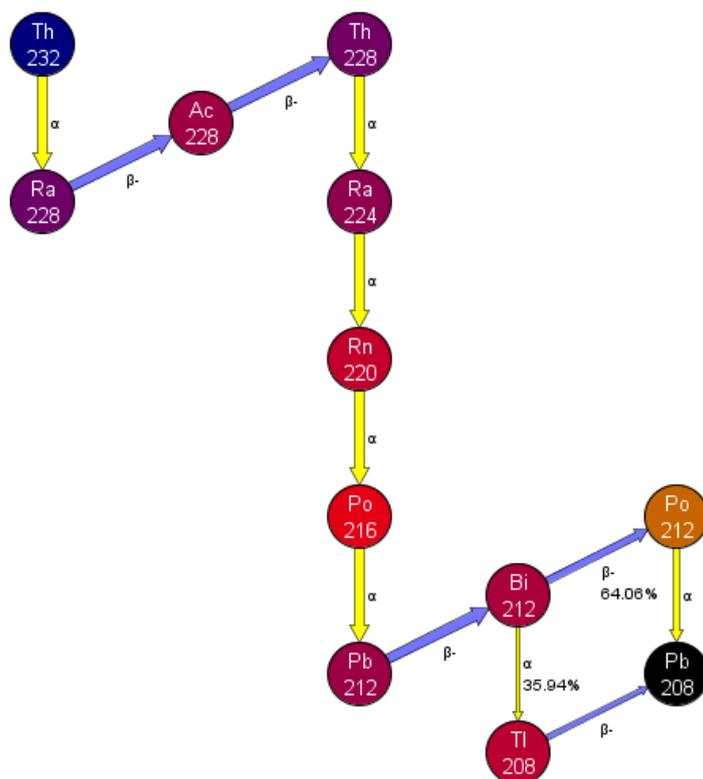


Figura 6. Cadena de desintegración del Torio 232 ( Janis 4.0, 2013)

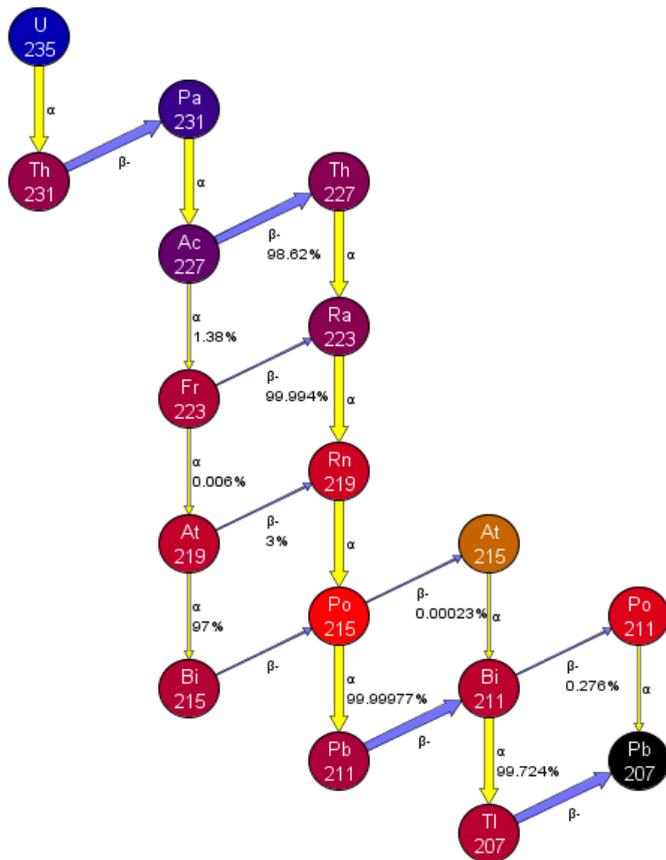


Figura 7. Cadena de desintegración del Uranio 235 (Janis 4.0, 2013)

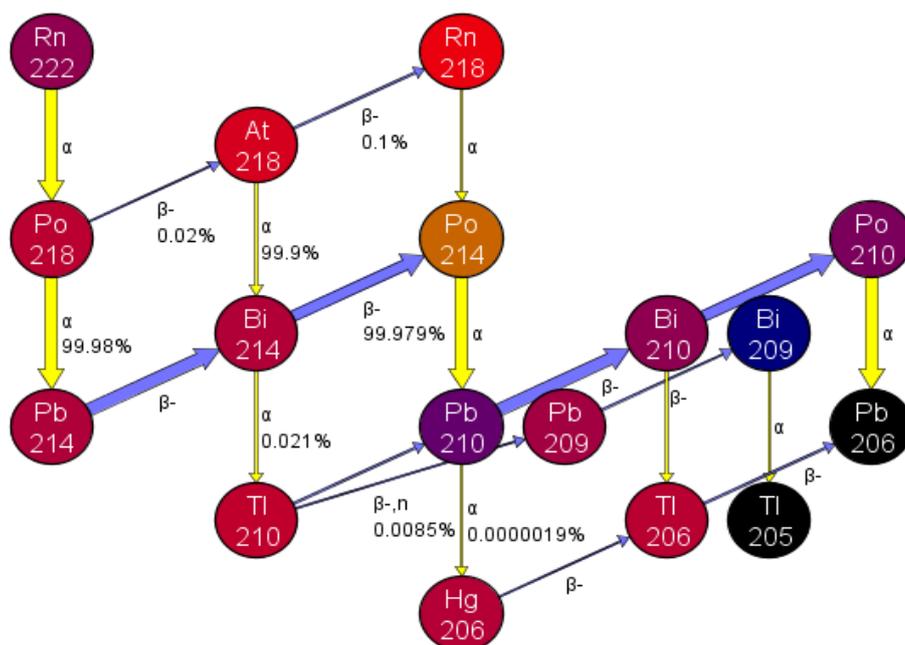
Los tres isótopos naturales de radón presentan propiedades fisicoquímicas distintas, las cuales se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Principales propiedades fisicoquímicas de los isótopos  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  y  $^{219}\text{Rn}$  (CSN, 2012)**

| Parámetro                                  | Símbolo   | $^{222}\text{Rn}$        | $^{220}\text{Rn}$       | $^{219}\text{Rn}$      |
|--|-----------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Periodo de semidesintegración              | $T_{1/2}$ | 3,8232 d                 | 55,8 s                  | 3,98 s                 |
| Constante de desintegración                | $\lambda$ | $2,0984 \cdot 10^{-6}/s$ | $1,242 \cdot 10^{-2}/s$ | $1,74 \cdot 10^{-1}/s$ |
| Energía media de retroceso en la formación | $E_t$     | 86 keV                   | 103 keV                 | 104 keV                |
| Coeficiente de difusión en aire            | $D_{MA}$  | $1 \cdot 10^{-5} m^2 /$  |                         |                        |
| Coeficiente de difusión en agua            | $D_{MW}$  | $1 \cdot 10^{-9} m^2/s$  |                         |                        |

El isótopo que presenta una vida más larga es el  $^{222}\text{Rn}$  y cualquier superficie en contacto con este isótopo se recubre con un depósito activo cuyas radiaciones presentan energías alfa, beta y gamma. El  $^{222}\text{Rn}$  proviene de la cadena de desintegración del Uranio-238, que se define como la serie de radionucleidos en los que se transforma para llegar a un núcleo estable.

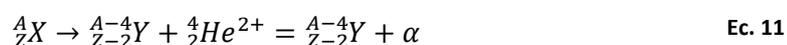
Cada núcleo de radón-222 se desintegra a través de la secuencia: Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214 y Pb-210. En cada una de estas transformaciones, el núcleo del elemento emite radiaciones: partículas alfa y partículas beta, tal y como se observa en la cadena de desintegración de la Figura 8.



**Figura 8. Cadena de desintegración del radón 222 (Janis 4.0, 2013)**

Los núcleos de Po-218 tiene una vida media de 3,05 minutos y emiten una partícula alfa con una energía de aproximadamente 6 MeV. Cuando se desintegra, se convierte en Pb-214, un sólido radiactivo con una vida media de 26,8 minutos que emite radiación beta. El Pb-214 se desintegra y se convierte en Bi-214, también un sólido radiactivo emisor beta. Éste tiene una vida media de 19,8 minutos y se transforma en Po-214 en su desintegración. El Po-214 tiene una vida media muy corta, de 164 microsegundos, y emite partículas alfa con una energía de 7,69 MeV, convirtiéndose en Pb-210, que tiene una vida media de 22,3 años. Ocasionalmente, el Po-210 sufre una desintegración beta y se convierte en Pb-216, un elemento estable.

La desintegración del radón se lleva a cabo mediante partículas alfa, en la cual el núcleo atómico emite estas partículas y se convierte en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico. El proceso viene dado por la expresión de la Ec. 11:



El radón se encuentra en la naturaleza en forma de gas incoloro e inoloro lo que impide la posibilidad de detección humana en cualquier ambiente. Se trata de un gas noble por lo que no reacciona químicamente y permanece en la atmósfera una vez se ha liberado.

El isótopo más estable del radón es el  ${}^{222}\text{Rn}$ , con una vida media de 3,82 días, tal y como se ha indicado en la Tabla 1 y cuando el núcleo de radón se desintegra, se libera una partícula alfa con una energía de 5,49 MeV. Se transforma en Po-218, cuyos átomos son metales que pueden adherirse a cualquiera de las superficies en contacto.

Así mismo, al tratarse de un gas radiactivo el radón puede viajar por el espacio intersticial del material donde se ha formado y puede, por una parte, introducirse en masas de agua subterránea (presenta elevada solubilidad en el agua) y, por otra parte, salir también hacia la atmósfera por exhalación. Además, el gas radón puede estacionarse en lugares cerrados a través de cimientos y materiales de construcción (Sahoo, 2010).

La propagación del radón de forma natural se produce según se muestra en la Figura 9:



Figura 9. Esquema de propagación del radón (Univ. Granada, 2000)

## 3.2. Problemática del radón para la salud

### ***Descubrimiento del gas radón en las viviendas***

En 1984 el ingeniero Stanley Watras trabajaba en la Central Nuclear de Limerick, Pensilvania (EEUU) en la puesta a punto de una de las unidades de la planta y en las labores de mantenimiento de uno de los reactores. En diciembre de 1984, Watras hizo saltar las alarmas por elevadas dosis de radiación durante diversos días. Las autoridades y órganos competentes trataron de encontrar la fuente de radiación en el interior de la central sin éxito alguno, por lo que decidieron trasladar sus investigaciones a los exteriores de la planta.

El origen de la radiación se encontraba en la casa del ingeniero Watras, cuya concentración de gas radón era 2.000 veces superior a los valores permitidos en EEUU. La casa de Watras estaba construida sobre una masa de granito precámbrico, con elevadas concentraciones de uranio (hasta 80 ppm), considerándose valores típicos entre 3 y los 4 ppm. Respirar el aire acumulado en el interior de la casa equivalía a fumar alrededor de 135 paquetes de tabaco al día. A partir de ese momento, la preocupación ciudadana por el gas radón aumentó y se empezaron a realizar mediciones de los niveles de concentración de radón en viviendas y oficinas (Lentijo, 2011).

### ***Toxicidad y problemática del gas radón***

La toxicidad del radón se debe a su radiactividad, ya que se trata de un elemento emisor de partículas  $\alpha$ , que pueden producir ionizaciones en la materia celular. Como el radón produce partículas ionizantes, los efectos sobre la salud se relacionan con los de las radiaciones ionizantes, considerando que la entrada al cuerpo humano se produce a través del aire alveolar (Pascual, 1999). La interacción de la radiación con las diferentes células es probabilística, es decir, puede o no interaccionar y si interacciona, puede o no producir daños o lesiones. La energía que se produce por este tipo de radiaciones la absorben las células de forma muy rápida ( $10^{-7}$  segundos) y puede causar lesiones no específicas (no distinguibles de otras lesiones causadas por agentes químicos o físicos). Los cambios que producen las radiaciones ionizantes son de tipo lesivo, suponen una alteración de los procesos normales de las células y no se manifiestan de forma inmediata regularmente. El tiempo que tardan en manifestarse se denomina periodo de latencia.

Desde 1998, el radón y sus descendientes están considerados como carcinógenos humanos del Grupo 1 según la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El modelo de riesgo carcinogénico adoptado a nivel internacional es el modelo lineal sin umbral. Según diversas fuentes especialistas de Europa (Darby *et al.*, 2005), Norteamérica (Kwewski *et al.*, 2005) y China (Lubin *et al.*, 2005), un aumento de 100 Bq/m<sup>3</sup> en la concentración media de radón en una vivienda supone un incremento del 10% en la probabilidad de sufrir cáncer de pulmón (CSN, 2010).

La OMS ha estimado que existe una proporción de casos de pacientes con cáncer de pulmón en España que se pueden atribuir al radón respecto del total. Esta proporción varía entre un 3% y un 14% según la concentración media nacional de radón y de la cantidad de tabaco consumido en España (OMS, 2009). Aunque se han realizado diversos estudios en poblaciones de mineros que reflejan la relación entre la exposición a elevadas concentraciones radón con el riesgo de padecer cáncer, ha resultado difícil extrapolar los resultados al riesgo existente por exposición en viviendas.

### ***El radón en el cuerpo humano***

Como se ha detallado en apartados anteriores, el radón se difunde a través de la superficie terrestre hasta salir al exterior. Una vez en la superficie atmosférica, el radón se mezcla con el aire y es transportado hasta la inhalación por parte del ser humano.

Aunque el radón es un gas, sus descendientes, el  $^{218}\text{Po}$  y el  $^{214}\text{Po}$  se inhalan y se depositan en forma de pequeñas partículas sólidas en los pulmones. En la Figura 10 se muestra la incorporación por inhalación del radón en el organismo:

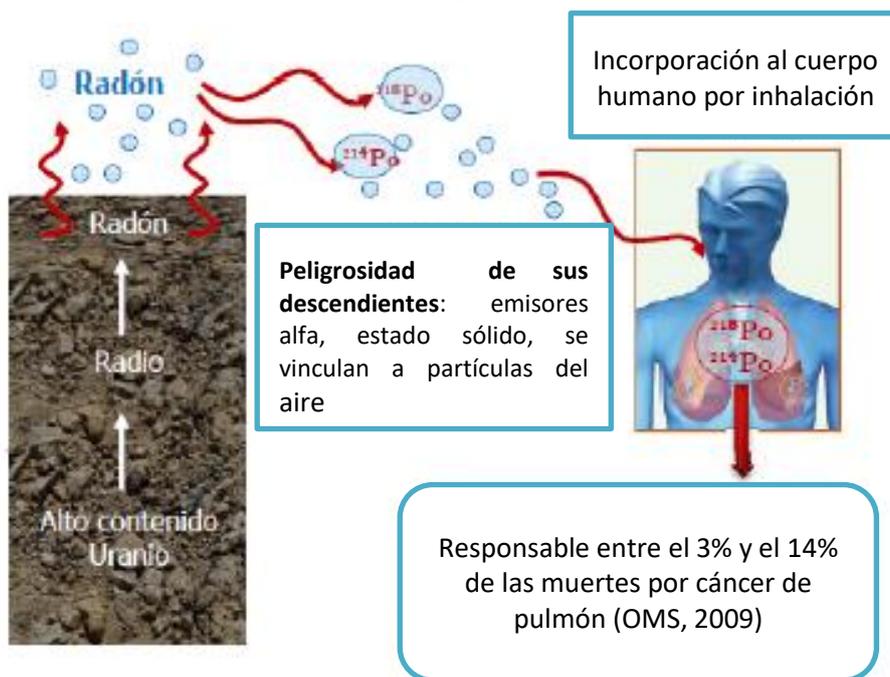


Figura 10. Problemática del radón para la salud (OMS, 2009)

### 3.3. Fuentes de radón

El  $^{222}\text{Rn}$  está presente en diversos suelos, en mayor o menor cantidad según el tipo de roca; en el agua, cuando se disuelve en ella el gas, o en los materiales de construcción, si utilizan como materias primas elementos con un alto contenido de radio (Vázquez et al., 2010). Así, como fuentes de radón se tiene:

- **Terreno:** principal fuente de radón. Según el tipo de roca y la cantidad de uranio que contiene, el suelo o terreno tendrá mayor o menor tendencia a generar radón. Algunos ejemplos para la concentración de uranio en las rocas se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Concentración de uranio en función del tipo de roca (Quindós, 1995)

| Tipo de roca | Concentración de uranio $^{238}\text{U}$ (ppm) |
|--------------|--|
| Basálticas   | 1,0  |
| Granitos     | 5,0  |
| Arcillas     | 3,7  |
| Arenas       | 0,5  |

Para conocer la capacidad de generar radón se ha de tener en cuenta el tipo de roca, así como la permeabilidad del terreno. En función de este factor, la capacidad de escape del radón de la estructura rocosa, y su transporte desde los poros de las rocas hasta la superficie terrestre, variará.

- **Agua:** el gas radón puede disolverse en aguas subterráneas desde donde es transportado hacia ríos, manantiales, estanques, etc. El gas radón disuelto en agua puede ser liberado a la atmósfera, permitiendo un aumento de la concentración en espacios cerrados (Vázquez et al., 2010).
- **Materiales de construcción:** algunos de los materiales de construcción están formados por materias primas que contienen  $^{226}\text{Ra}$ , tales como ladrillos cerámicos, hormigón, yesos, cementos o cenizas volantes. Se recomienda utilizar materiales con bajo contenido en radio y evitar la estanqueidad y encerramiento de espacios interiores, con el fin de evitar la exhalación del gas radón. El radón proveniente de los materiales de construcción supone el 20% del total en un espacio cerrado, entre 5 y 20  $\text{Bq}/\text{m}^3$  (Vázquez et al., 2010).

### 3.4. Distribución de los niveles de radón en España

A nivel español, existe el Mapa Marna (Suárez, et al., 2000), un modelo predictivo que evalúa la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de origen natural a 1 metro de altura sobre el nivel del suelo. Las medidas de las concentraciones de radón se llevaron a cabo durante los años 1991 y 2004. En la Figura 10 se muestra el mapa MARNA de radiación gamma ambiental, que *satisface las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de la Unión Europea, sobre la conveniencia de disponer de mapas de radiación natural para poder evaluar niveles de radiación y sus posibles incrementos respecto del fondo natural*, según el CSN:

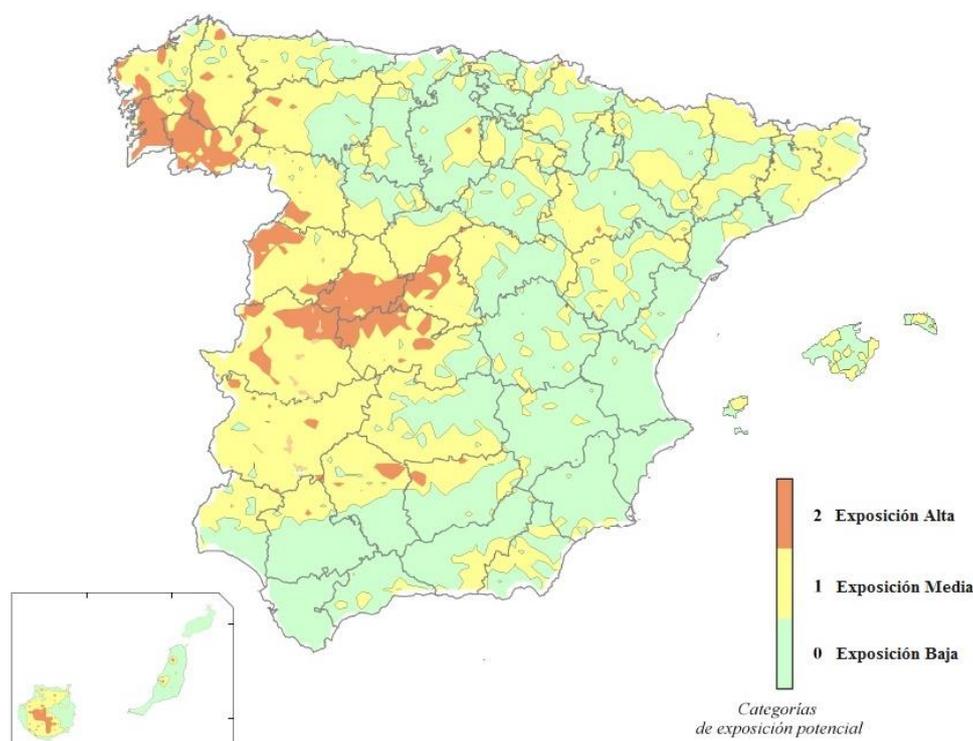


Figura 11. Mapa predictivo MARNA de las concentraciones de radón en España (CSN, 2013)

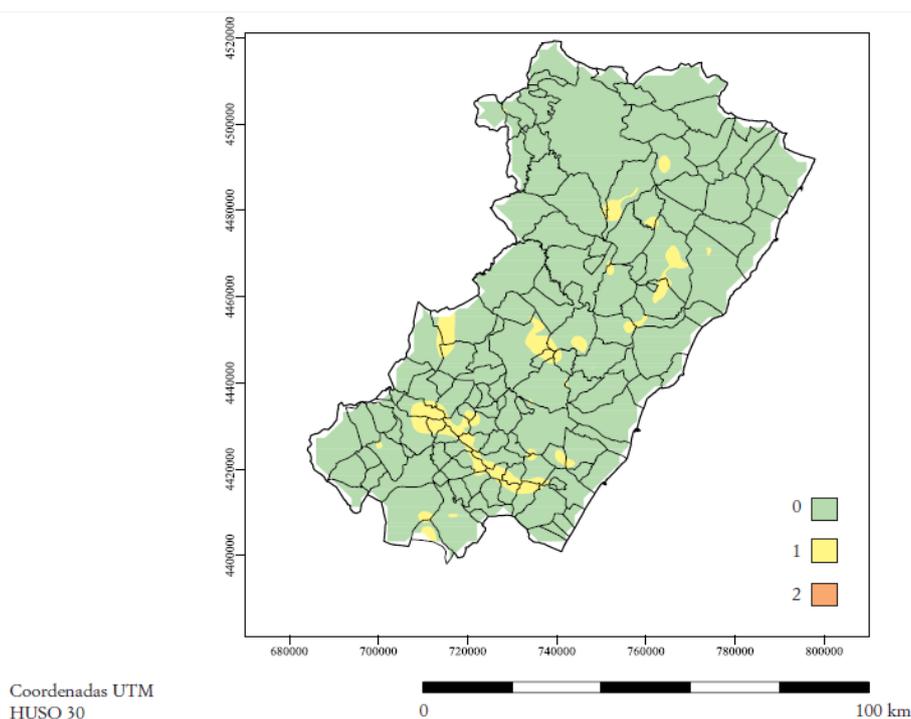
El mapa predictivo se clasifica en zonas de exposición potencial: alta (Categoría 2) para concentraciones superiores a los 300 Bq/m<sup>3</sup>; media (Categoría 1) para concentraciones que oscilan entre 150 Bq/m<sup>3</sup> y 300 Bq/m<sup>3</sup>; y baja (Categoría 0), para concentraciones inferiores a los 150 Bq/m<sup>3</sup>. Se ha establecido además una equivalencia entre los valores de concentraciones para cada categoría y las tasas de exposición a la radiación gamma, que se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3. Clasificación de zonas geográficas en categorías de exposición potencial al radón según su nivel de radiación gamma (CSN, 2013)**

| Categoría | Exposición potencial | Tasa de exposición gamma ( $\mu\text{R/h}$ ) |
|-----------|----------------------|--|
| 0         | Baja                 | <7.5   |
| 1         | Media                | 7.5-14                                       |
| 2         | Alta                 | >14  |

En las zonas de exposición baja, la probabilidad de encontrar edificios con concentraciones elevadas no alcanza el 1%, mientras que en las zonas de exposición alta se puede superar la esta probabilidad en un 10%.

En la Comunitat Valenciana, cada una de las tres provincias: Castelló, València y Alacant, presenta el mapa predictivo en función de las tres categorías de exposición potencial en  $\text{Bq/m}^3$  (alta, media, baja), que se muestran en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14. Para cada uno de los mapas predictivos, los ejes X e Y muestran las coordenadas y longitudes de las comarcas de cada provincia (García-Talavera et al., 2013)



**Figura 12. Categorías de exposición al radón en la provincia de Castelló a partir del mapa MARNA (CSN, 2013)**

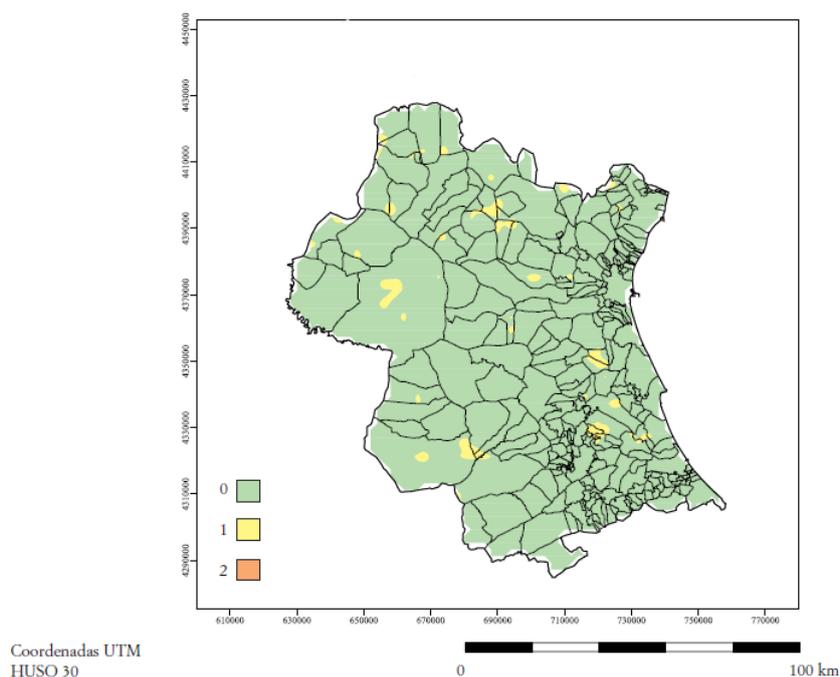


Figura 13. Categorías de exposición al radón en la provincia de València a partir del mapa MARNA (CSN, 2013)

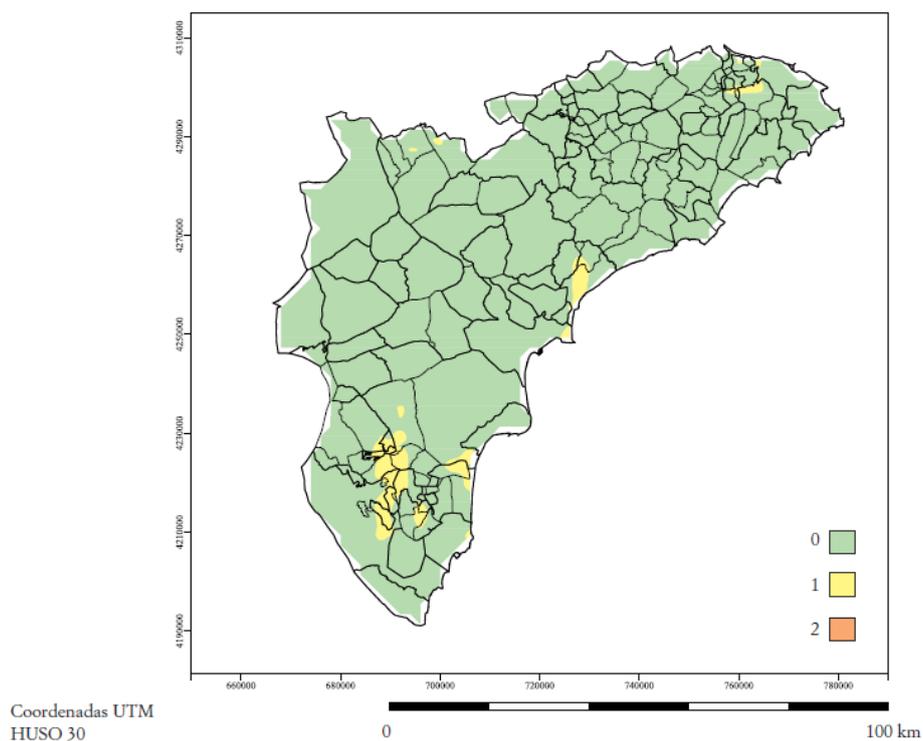


Figura 14. Categorías de exposición al radón en la provincia de Alacant a partir del mapa MARNA (CSN, 2013)

En ninguna de las tres provincias de la Comunitat Valenciana el riesgo de exposición al radón alcanza la Categoría 2, aunque sí aparecen zonas que alcanzan la Categoría 1. En su mayoría, la Comunitat Valenciana se caracteriza por tener bajos niveles de concentración de radón, tal y como se ha mostrado en el mapa predictivo de cada comunidad.

### 3.5. Exhalación de radón

El radón es un gas en condiciones normales de presión y temperatura. La vida media del  $^{222}\text{Rn}$ , de 3.8 días, es lo suficientemente larga como para que el gas pueda moverse desde la roca donde se produce hasta alcanzar el aire atravesando el suelo. Sus átomos, que se encuentran dentro de gránulos sólidos, presentan una baja probabilidad de liberación a la atmósfera debido a sus bajos coeficientes de difusión en sólidos. No obstante, si el radón se encuentra en el espacio intersticial entre los granos, y consigue escapar del sólido del material, se produce el fenómeno de emanación. Una vez producido el fenómeno de emanación, los átomos del radón que se encuentran en el espacio intersticial, son transportados hacia la superficie del suelo mediante difusión o advección a través del terreno. En la mayor parte de los casos, el transporte del gas se produce mediante el fenómeno de difusión. Después de la emanación y el transporte difusivo a la superficie terrestre, el gas radón puede ser liberado a la atmósfera. Este proceso de liberación de  $^{222}\text{Rn}$  se conoce como exhalación (Frutos et al., 2010).

Los procesos de liberación de gas radón se muestra en la Figura 15:

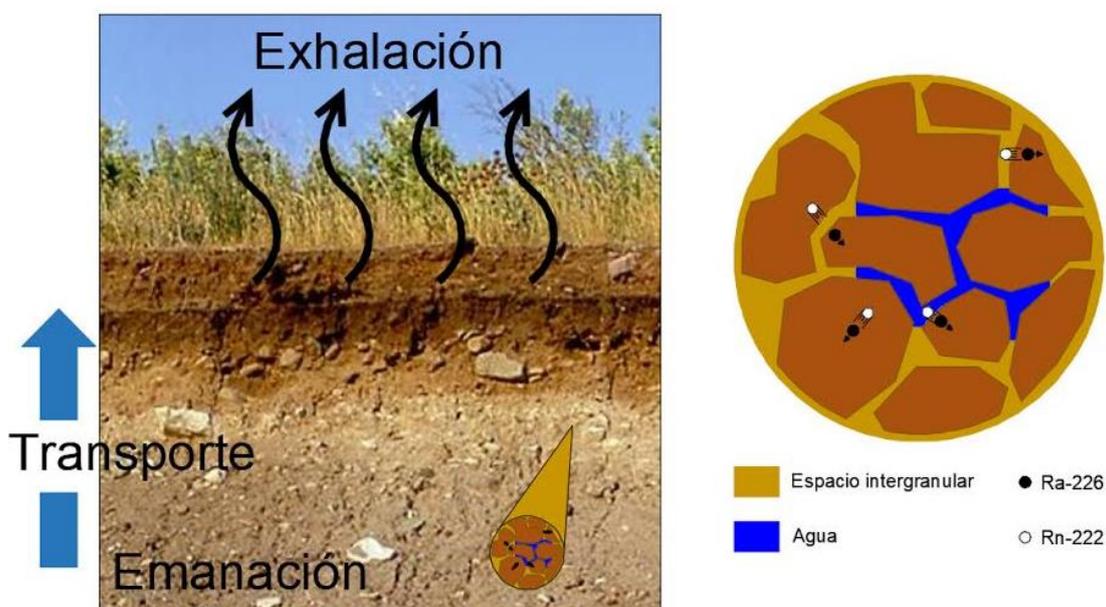


Figura 15. Proceso de liberación del radón a la atmósfera (Fuente, 2016)

La cantidad de radón que puede transportarse hacia la superficie una vez producido el fenómeno de emanación, viene dada por la tasa de producción de radón por unidad de volumen del material  $P$  (en  $\text{Bq}/\text{m}^3\text{s}$ ) según la Ec. 12:

$$P = \lambda \epsilon R \rho_b \quad \text{Ec. 12}$$

Siendo,  $\lambda$  la constante de desintegración radiactiva del radón ( $\text{s}^{-1}$ ),  $\epsilon$  el coeficiente de emanación (adimensional),  $R$  la concentración de  $^{226}\text{Ra}$ , de quien desciende el radón, ( $\text{Bq}/\text{kg}$ ) y  $\rho_b$  la densidad aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Cuando el gas radón llega a la superficie, una cantidad de gas consigue escapar al aire. Esta cantidad, por unidad de tiempo y unidad de superficie se conoce como tasa superficial de exhalación del radón ( $Bq/m^2/s$ ) y varía en función de las condiciones meteorológicas y de las características físicas del suelo. Los valores de la tasa de exhalación varían entre  $1 mBq/m^2/s$  y  $100 mBq/m^2/s$  para espacios con uranio (ISO/FDIS 11665-7, 2012). En función de las unidades con que se va a trabajar en este TFM, el rango de variación de la tasa de exhalación de radón deberá estar comprendido entre los siguientes valores:

$$Tasa\ exhalación \equiv \left[ 3.6 \frac{Bq}{m^2} \sim 360 \frac{Bq}{m^2} \right]$$

### 3.5.1. Emanación

En el proceso de emanación, los átomos de radón escapan de los gránulos al espacio intersticial existente entre ellos. El escape del gas radón se produce a partir de la energía con que salen despedidos cuando el radio se desintegra (proceso de retroceso). En sólidos, el rango de retroceso del radón es pequeño por lo que solo consiguen escapar.

Para el agua y para el aire, las distancias de retroceso son diferentes a las distancias en sólidos lo que supone que en función del medio en el que se encuentre el radón, éste podrá escapar o no.

Además para poder caracterizar el comportamiento físico del radón en los diferentes materiales es necesario definir el coeficiente de emanación  $\epsilon$  como la fracción de átomos de  $^{222}Rn$  producidos a partir de la desintegración radiactiva del  $^{226}Ra$  que emigran desde un gránulo del material hasta el espacio intersticial de los poros (Fuente, 2016). Este coeficiente varía entre 0, cuando no escapa del material, y 1 cuando escapa del material (Bosew,2003).

Los principales factores que afectan a la emanación de radón son:

- Coeficiente de emanación, que variará en función del tipo de material y de los gránulos de mineral.
- El tamaño de los gránulos del mineral, cuanto menor sea, el átomo de radón presenta mayor facilidad para escapar hacia el espacio intersticial.
- Contenido en humedad, cuanto mayor sea, mayor agua tendrán los poros de los materiales y la probabilidad de que el átomo de radón se vea frenado es mayor.

### 3.5.2. Transporte

En el proceso del transporte se produce el movimiento de los átomos del radón emanados del suelo a la superficie.

El transporte del gas radón a través del terreno o de los diversos materiales de construcción, se puede producir por difusión o por convección.

•**Difusión:** se produce el movimiento del gas radón desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. Este movimiento varía en función de la diferencia de concentraciones entre un lugar y otro. El transporte del gas radón se relaciona con su concentración mediante la ley de difusión de Fick, mostrada en la Ec. 13:

$$J = n \cdot D \frac{dC}{dz} \quad \text{Ec. 13}$$

Siendo:

J: tasa de emanación del radón ( $\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

n: porosidad del medio

D: coeficiente de difusión del radón en el medio ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

C: concentración de radón en los poros del medio ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

z: distancia en la dirección de la difusión (m)

•**Movimiento por convección:** el flujo convectivo (advectivo) se produce por la diferencia de presiones que existe entre el espacio en que el radón se encuentra confinado y la atmósfera o el interior de un edificio. El transporte convectivo depende también de la permeabilidad del medio.

En la mayoría de los casos, el transporte del gas radón se produce mediante el fenómeno de difusión.

### 3.5.3. Exhalación

En el proceso de exhalación los átomos de radón transportados a la superficie del suelo son emitidos a la atmósfera tras ser transportados desde su fuente de origen. El proceso de liberación a la atmósfera se define mediante la tasa de exhalación,  $\phi$ , definida como la concentración de radón que se libera por unidad de superficie durante un tiempo determinado ( $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ ).

La tasa de exhalación depende en mayor medida de los factores que influyen tanto en el coeficiente de emanación  $\epsilon$ , como en el transporte de radón (porosidad, tamaño del gránulo, humedad, etc.).

Además, para el estudio de la exhalación de gas radón, se ha de tener en cuenta las condiciones meteorológicas en el momento de medición (Frutos et al., 2010). Los parámetros de mayor influencia son:

- **Presión atmosférica:** las variaciones en la presión influyen de distinta manera al espacio intersticial de los poros del terreno y al espacio aéreo en las proximidades de la superficie, por lo que se producen cambios en el gradiente de presión que modifica el flujo convectivo. Este cambio provoca una mayor exhalación de radón en momentos de bajas presiones.
- **Temperatura y variaciones diarias:** el movimiento convectivo del aire se ve modificado con la temperatura. Debido al calentamiento de la atmósfera, la concentración de gas a nivel de la superficie terrestre es menor mientras que cuando se produce una mayor estabilidad atmosférica, por las noches, las concentraciones de gas aumentan.
- **Altura respecto al suelo:** el aire es menos pesado que el gas radón (ocho veces menos) por lo que a una altura elevada la posibilidad de encontrar gas radón es baja.
- **Viento:** el aire puede infiltrarse a través del suelo modificando las concentraciones de radón en el mismo.
- **Humedad y lluvias:** en suelos con elevada humedad, los poros se colmatan y el radón se disuelve en el agua. De esta forma, radón y agua se transportan por las diferentes corrientes subterráneas y la exhalación del radón a la superficie se ve disminuida.

### 3.6. Movilidad del radón

Tal y como se ha explicado anteriormente, el  $^{222}\text{Rn}$  proviene de la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$ , se transporta de forma difusiva entre los gránulos y rocas, y se emite a la atmósfera en forma de exhalación. Una vez en la atmósfera, se mezcla con aire y otros gases y su concentración se ve disminuida. El problema con el gas radón aparece en aquellas localizaciones en las que existe una edificación sobre el terreno. Debido a la diferencia de presión que existe entre los poros y gránulos del suelo y el espacio confinado en la edificación se instaura un flujo de gas desde el terreno hasta el interior de la construcción.

Al tratarse de un gas, el radón presenta una movilidad elevada entre los diversos materiales de construcción empleados en la edificación y penetra fácilmente en viviendas, edificios, garajes, etc. Si el gas se acumula dentro de las viviendas o edificios, la concentración del mismo aumenta, pudiendo alcanzar niveles muy superiores a los límites establecidos en la legislación. No obstante, la concentración de radón medido en el interior de los edificios puede ser inferior a la medida en el propio subsuelo debido a las ventilaciones, las filtraciones de puertas o ventanas y a las variaciones atmosféricas.

El flujo de radón, tal y como se muestra en la Figura 16, debido a procesos convectivos es posible cuando el gradiente de presiones es positivo,  $p_B > p_A$

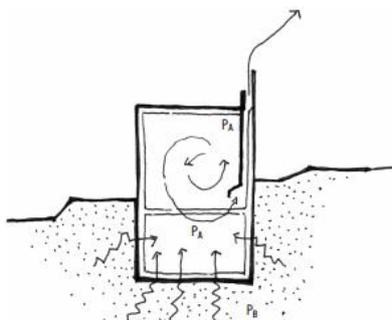


Figura 16. Flujo de radón hacia el interior de una vivienda (CSN)

Según el Consejo de Seguridad Nuclear, se contemplan cinco posibles formas o caminos para que el radón se introduzca en los edificios: por el interior de la cámara de aire de los muros exteriores, a través de la solera, a través de los muros de sótano, a través de conductos de saneamiento y a través del forjado sanitario (Frutos et al., 2010). Estos caminos se ven representados en la Figura 17.

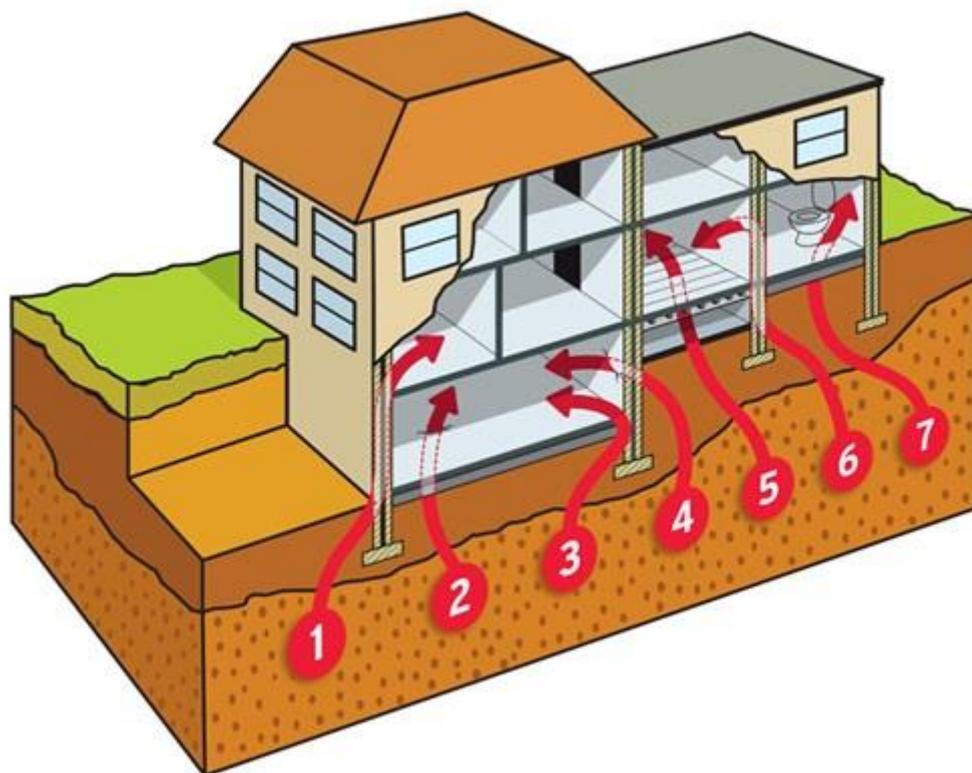


Figura 17. Vías de entrada del gas radón en una vivienda (CSN, 2012)

|                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| 1: Cámara de aire de muros exteriores | 2: Grietas en suelos  |
| 3: Muro del sótano                    | 4: Grietas en paredes |
| 5: Forjado sanitario                  | 6: Grietas en paredes |
| 7: Conducto de saneamiento            |                       |

- **Cámaras de aire de los muros exteriores:** el radón atraviesa los muros y puede viajar a pisos superiores.
- **Soleras en los sótanos:** los materiales utilizados para la construcción de las soleras requieren de juntas de dilatación, necesarias en el proceso. Estas juntas permiten la circulación del gas radón hacia el interior. Además, el material utilizado en este tipo de obra suele ser el hormigón, fabricado a partir de áridos que pueden contener radón.
- **Grietas en suelos y paredes:** las grietas permiten la penetración del radón hacia el interior de la vivienda
- **Muros de sótano:** se trata de materiales en contacto directo con el subsuelo que el radón puede traspasar fácilmente.
- **Forjados sanitarios:** bajo el forjado sanitario podría producirse la acumulación de gas radón, traspasar el forjado e introducirse en la edificación si no hubiese ventilación alguna.
- **Conductos de saneamiento:** de forma general, los conductos de saneamiento suelen estar conectados a las arquetas situadas en el sótano o en la solera, por lo que el radón puede penetrar a través de ellas y ascender hasta los posibles cuartos húmedos en caso de pérdida de efectividad del sifón.

La tasa de ventilación influye en la cantidad de concentración de gas radón en el interior de viviendas y edificios, y tiene un carácter estacional: durante el invierno la ventilación es menor y la concentración de gas radón aumenta, mientras que en verano, con las ventanas abiertas, se produce una mayor ventilación y por tanto existe una menor concentración de gas. No obstante, la ventilación de las viviendas no es suficiente para eliminar el radón presente en los casos en los que las concentraciones sean superiores a los 400 Bq/m<sup>3</sup>, suponiendo un grave riesgo para la salud de los habitantes.

Existe un problema añadido en las viviendas en las que se pretende mejorar la eficiencia energética. Para conseguir un ahorro energético, se intenta mejorar la hermeticidad de edificios y viviendas que a su vez causa la estanqueidad de los mismo provocando un aumento de la concentración de radón.

### **3.7. Ciclos de variabilidad de la concentración de radón**

La concentración de radón se caracteriza por la variabilidad temporal, que incluye ciclos diarios y ciclos estacionales. Es necesario tener información acerca de esta variabilidad y sus ciclos para realizar una mejor elección de los aparatos de medida, para la comparación de resultados y, en caso de ser necesario, para realizar las medias anuales adecuadas (Llerena, 2006).

Las variaciones de la concentración de radón durante ciclos diarios se explican a partir de la variación de la temperatura durante el día y la noche, con una menor dependencia de otras variables como la velocidad y dirección del viento, las precipitaciones, la humedad o la presión atmosférica. En cambio, las variaciones de la concentración de radón durante periodos más largos, ciclos estacionales anuales, depende en mayor medida de las condiciones climatológicas del lugar de medición (Rowe et al., 2002).

En la mayoría de los estudios, los valores de concentración de radón son superiores durante los meses de verano e inferiores durante los meses de otoño e invierno.

Otro estudio ha analizado datos de concentraciones de radón y la temperatura del lugar de medición para conocer si la temperatura podría utilizarse como un factor de corrección a la estacionalidad de la cantidad de concentración de radón. De este estudio, se concluyó que existe una buena correlación entre la concentración de radón y la temperatura interna de la ubicación donde se midió el mismo, mientras que la correlación con la temperatura externa ambiental es baja (Groves-Kirkby et al., 2015).

### 3.8. Normativa y legislación

En este apartado se detalla la normativa vigente en cuanto a la protección radiológica contra radiaciones ionizantes, los límites de dosis en función del personal así como guías de seguridad y diversas instrucciones técnicas. Se detalla además, la normativa futura, de cuasi inmediata aplicación.

#### 3.8.1. Normativa vigente

La normativa vigente española, Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre de 2010, modifica el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio de 2001, que establecía las normas referentes a la protección tanto de trabajadores como de público en general frente a los riesgos resultantes de la radiación ionizante. Esta modificación dictaminaba que el reglamento no se aplicaría en casos de exposición al radón en viviendas ni a los niveles naturales de radiación. Únicamente el reglamento se aplicaría a actividades laborales que implicasen almacenamiento o manipulación de materiales o residuos, que supusiesen exposición a radiación cósmica o a aquellas en que los trabajadores estuviesen expuestos a inhalación de descendientes de torón, radón, o radiación gamma, entre otros.

Los límites de dosis establecidos en el Real Decreto 783/2001 para distintas clases de personal se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Límites de dosis para diferentes clases de personal (Fuente: CSN)**

| <b>Clasificación personal</b> | <b>Dosis efectiva</b> | <b>Dosis en cristalino</b> | <b>Dosis en piel y extremidades</b> |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Trabajador expuesto           | 50 <i>mSv/año</i>     | 150 <i>mSv/año</i>         | 500 <i>mSv/año</i>                  |
| Miembro del público           | 1 <i>mSv/año</i>      | 15 <i>mSv/año</i>          | 50 <i>mSv/año</i>                   |

El 21 de diciembre de 2011, el Consejo de Seguridad Nuclear publicó la Instrucción IS-33 del CSN, *Criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural*, por la cual se establecían los criterios radiológicos y controles aplicables para los diferentes rangos de dosis efectivas indicados en la IS. Las medidas correctoras y los dispositivos de vigilancia propuestos se limitaban a los trabajadores expuestos y a los lugares de trabajo, no a viviendas o edificios habitables. El nivel máximo de concentración media anual de gas radón establecido para los puestos de trabajo es de 600 Bq/m<sup>3</sup>. En los casos de permanencia de miembros de público, el nivel de intervención será de 300 Bq/m<sup>3</sup> para la concentración media anual de gas radón.

En la IS-33 se establecen tres niveles de referencia según las actuaciones indicadas en el artículo 63 del RPSRI:

- Concentraciones inferiores a  $600 \text{ Bq/m}^3$ : no es necesario control.
- Concentraciones entre  $600$  y  $1.000 \text{ Bq/m}^3$ : se debe aplicar un nivel bajo de control.
- Concentraciones superiores a  $1.000 \text{ Bq/m}^3$ : se debe aplicar un nivel alto de control.

La Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del CSN, fue publicada en el BOE nº22 de 26 de enero de 2012.

El 18 de enero de 2012, el CSN publicó la Guía de Seguridad 11.2 (GS-11.02), *Control de la exposición a fuentes naturales de radiación*, donde se establecen criterios de exención de control radiológico y de gestión de residuos, así como criterios recomendados para la protección del público frente a la exposición del radón en las viviendas. Para la protección de los inquilinos, público en general, de viviendas y edificios, los niveles serán:

- Edificios construidos:
  - Concentración media anual de radón superior a  $300 \text{ Bq/m}^3$ : inicio de acciones de remedio (según la UE).
  - Concentraciones medias anuales de  $100 \text{ Bq/m}^3$ : iniciación de acciones de remedio sencillas.
- Edificios de nueva construcción: nivel objetivo de diseño de  $100 \text{ Bq/m}^3$  de concentración media anual de radón.

En 2016 se publicó la norma española UNE-EN ISO 11665, elaborada por el Comité Técnico AEN/CTN 73 Energía Nuclear, Tecnologías Nucleares y Protección Radiológica (Secretaría desempeñada por AENOR). La norma establece los principios de medición puntual e integrada para determinar concentración promedio de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta; los métodos de medición integrada para determinar la actividad volumétrica y el método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie, entre otros. De la parte 7 de la normativa, UNE-EN ISO 11665-7, se han recogido los principios de funcionamiento para el método de acumulación en cámara superficial que se detallará en el apartado de Resultados.

Las recomendaciones y normativa acerca de los espacios residenciales y sus condiciones de salubridad en la edificación, se contemplan en el Código Técnico de la Edificación (CTE) derivado de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE). Actualmente, no se recoge en esta normativa la protección de individuos ante el riesgo de vivir en recintos con elevada concentración de gas radón.

### 3.8.2. Normativa futura

En 2013, se publicó en el Diario Oficial de la Unión Europea, la Directiva 2013/59/EURATOM que establece *normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivas de la exposición a radiaciones ionizantes, derogando las anteriores directivas*. Esta Directiva establece valores límite y *planes de acción frente a la exposición de radón para viviendas, edificios públicos y lugares de trabajo para cualquier vía de entrada (suelo, materiales de construcción o agua)*.

La Directiva 2013/59/EURATOM deberá ser incorporada a la Legislación Nacional antes del 6 de febrero de 2018, según el capítulo X, Artículo 106:

*-Los Estados miembros pondrán en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en la presente Directiva a más tardar el 6 de febrero de 2018.*

La Directiva establece el nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire en  $300 \text{ Bq/m}^3$  para concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. Este mismo nivel de referencia se establece para las concentraciones de radón en las viviendas. El Estado debe fomentar la adopción de las medidas pertinentes que permitan identificar las viviendas en aquellos casos en los que se superen los límites de referencia para poder reducir las concentraciones. Además, el Estado debe garantizar la información tanto local como nacional acerca de la exposición al radón en lugares cerrados y los riesgos para la salud.

### 3.9. Descripción de las técnicas de medición de radón

Con el fin de proporcionar información básica acerca de la medición de radón y sus productos de desintegración se va a realizar un análisis de las diferentes técnicas de medición de radón existentes.

La aplicación y selección de un método u otro para la medición de radón y sus descendientes depende de características como la accesibilidad, la experiencia para su uso o su confiabilidad.

Algunas de las aplicaciones más comunes son:

- Mediciones a corto plazo, que permiten identificar de forma rápida aquellas ubicaciones en las que existen elevadas concentraciones de radón.
- Mediciones de seguimiento, que permiten confirmar y caracterizar elevadas concentraciones de radón.
- Mediciones de diagnóstico, para determinar posibles soluciones correctivas
- Mediciones pre y post-mitigación, cuyo objetivo es determinar la eficacia de las medidas correctivas.

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, la concentración de gas radón se mide habitualmente en  $\text{Bq/m}^3$ .

La elevada variabilidad que presenta el gas radón hace necesario las mediciones a largo plazo para conseguir información útil mediante promedios anuales. Las mediciones de corta duración suelen suponer una primera aproximación a las condiciones del terreno.

Los instrumentos para la medición de radón y sus descendientes se muestran en la Figura 18.

Los sistemas de detección de radón se clasifican en métodos activos y métodos pasivos. Los métodos activos son sistemas de medición en continuo. Se emplean para investigación (variaciones día-noche, efectos de ventilación, etc.) y para protección radiológica. Este tipo de métodos se han estado utilizando en laboratorios de referencia y deben ser instalados por un técnico. En general, los sistemas de medición activos son precisos, trabajan en continuo y trabajan en amplios rangos de concentraciones. En cambio, su coste es elevado, son de mayor tamaño y dependen de la red eléctrica para su funcionamiento.

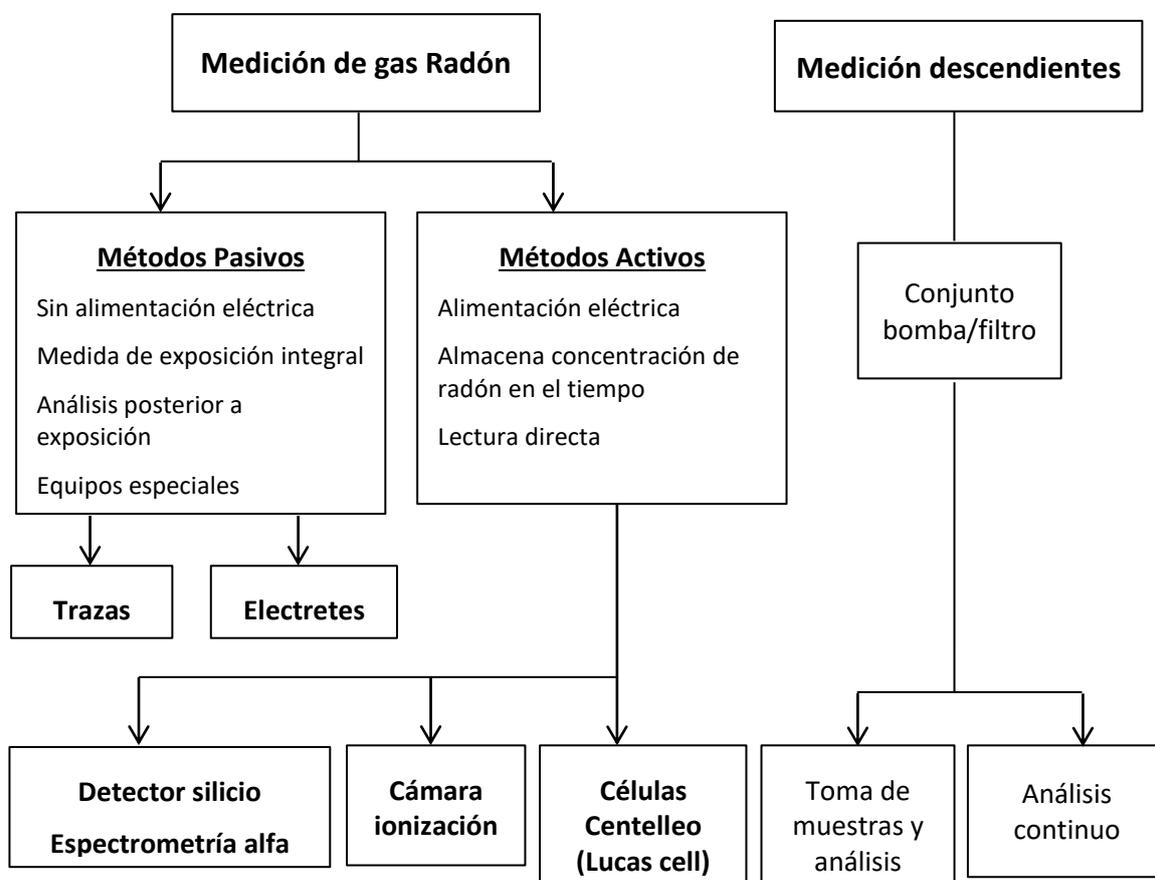


Figura 18. Esquema de los métodos de medición del radón y sus descendientes

Los métodos pasivos son sistemas de medida integradores, utilizados en campañas de medida a gran escala en viviendas, lugares de trabajo, minas, minas o cuevas. Pueden ser distribuidos y adquiridos en tiendas comerciales. El coste es bajo. Los cánister de carbón activo (duración: varios días), los detectores de trazas (duración: varios meses) o los electretes (duración: días-semanas) son algunos ejemplos de sistemas de detección pasivos.

Existe también la posibilidad de medir la concentración de radón en función de sus descendientes. En este caso, se utiliza como técnica la detección de las emisiones alfa provenientes de los descendientes del radón, el Po-214 y el Po-218, que son retenidos mediante un filtro y bombeados hasta el detector.

## 4. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

### 4.1. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster (TFM) es el desarrollo de diversas metodologías para la medición de exhalación de Radón 222 con el fin de definir el procedimiento y condiciones de aplicación de cada una de las técnicas ante la entrada en vigor de la Directiva 2013/50/EURATOM que deberá ser incorporada antes de febrero de 2018 a la normativa española.

Para la consecución del objetivo principal es necesario definir los diferentes aspectos que se van a desarrollar:

- Estudio de las diversas técnicas existentes para la medición de Radón y sus descendientes.
- Selección de las técnicas más adecuadas en función de los criterios establecidos para el caso de este TFM.
- Puesta a punto de las técnicas seleccionadas a partir de la experimentación y mediciones de campo.
- Selección de la ubicación donde se pondrán en marcha las mediciones de radón.
- Realización de las mediciones de la concentración de radón exhalado en los escenarios propuestos.
- Cálculo de las tasas de exhalación a partir de las concentraciones medidas según la técnica y ubicación seleccionadas.
- Comparación de resultados de tasa de exhalación.

A partir de todos los resultados obtenidos se ofrecerán propuestas de mejora de las técnicas empleadas para proyectos futuros del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.

## 4.2. Justificación técnica

La Directiva 2013/50/EURATOM, a incorporar en España antes de febrero de 2018, aboga por realizar estudios de los niveles de concentración de radón exhalado en superficies edificables así como en emplazamientos ya edificados.

De acuerdo a esta Directiva, resulta imprescindible conocer los métodos de medición de exhalación de radón que mejor se ajusten a las características de cada emplazamiento. Las características físicas del suelo y las condiciones meteorológicas variarán en función del momento y del lugar de medición.

Pocos estudios, hasta la fecha, han realizado un estudio comparativo de diferentes técnicas de medición de radón exhalado utilizando diferentes emplazamientos para conocer así la influencia de factores externos como lluvia, humedad o diferencias de presión y temperatura.

Es por esto, que este Trabajo Final de Máster pretende una aproximación a la realidad de una directiva de inminente aplicación en el campo de la protección radiológica.

Las técnicas seleccionadas se han basado no sólo en la revisión bibliográfica de los estudios publicados hasta la fecha sino también en la propia experiencia del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universitat Politècnica de València (UPV) en el estudio de radón en aire y agua.

## 4.3. Justificación académica

Este Trabajo Final de Máster supone la culminación de los estudios de Máster en Ingeniería Química y la obtención del título otorgado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universitat Politècnica de València.

## 5. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la ejecución del TFM se ha dividido en diversas fases. En la Figura 19 se han representado, mediante un diagrama de bloques, los pasos seguidos, que se detallarán en los siguientes apartados.

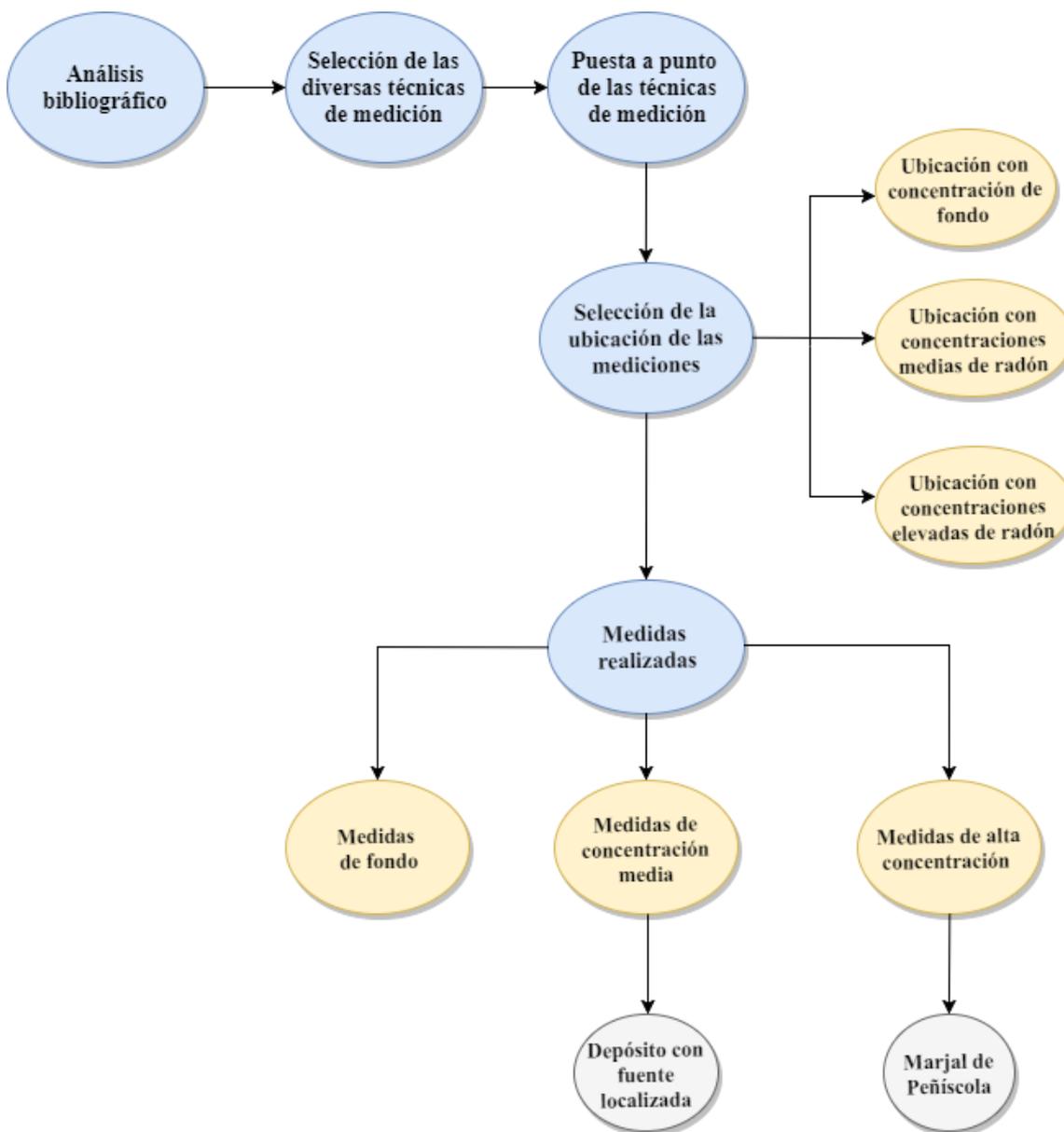


Figura 19. Diagrama de bloques de la metodología aplicada en el TFM

El Trabajo Final de Máster se inició con un análisis bibliográfico con el objetivo de recabar información sobre el radón, así como de las diversas técnicas existentes para su medición. De entre toda la información y documentación obtenida se seleccionaron las técnicas para obtener concentraciones de radón exhalado siguiendo criterios metodológicos y de disponibilidad.

Una vez seleccionadas las técnicas de medición, se realizó la puesta a punto de la instrumentación a partir de los manuales y especificaciones técnicas de cada una y se introdujeron pequeñas adaptaciones a partir de las experiencias observadas.

La selección de la localización geográfica en la que se realizaron las mediciones se basó en la búsqueda de tres escenarios: uno con muy bajas concentraciones de radón para poder medir la concentración de fondo; otro con concentraciones medias y, por último, otro con elevadas concentraciones de radón. Las tres ubicaciones fueron seleccionadas con el objetivo de probar si los instrumentos de medida funcionan de igual forma ante concentraciones muy diferentes del gas. Las mediciones realizadas en los tres escenarios propuestos fueron con las mismas técnicas, las cuales se describen con detalle en el apartado de resultados.

Cabe destacar que las medidas de fondo se realizaron en un espacio abierto, cuya concentración de radón era muy baja, mientras que las medidas de media concentración se realizaron en un espacio cerrado, concretamente en un recipiente lleno de tierra en el cual se había introducido un elemento radioactivo de origen natural, una piedra pechblenda. Para el escenario de concentraciones elevadas de radón exhalado, se realizaron también medidas en la zona del Marjal de Peñíscola, cuya elevada concentración es conocida gracias a diversos estudios y la propia experiencia del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV.

En la Figura 20 se muestra un cronograma en el que se recogen las actividades realizadas desde el momento del análisis bibliográfico hasta el análisis de resultados. De esta forma se obtiene una visión general y temporal del proceso de ejecución del TFM.

| Tarea                                      | may-16 | jun-16 | jul-16 | ago-16 | sep-16 | oct-16 | nov-16 | dic-16 | ene-17 | feb-17 | mar-17 | abr-17 | may-17 | jun-17 | jul-17 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Análisis bibliográfico                     | ■      | ■      |        | ■      |        |        |        | ■      | ■      |        |        |        | ■      |        |        |
| Selección técnicas de medición             |        | ■      | ■      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Puesta a punto técnicas seleccionadas      |        |        | ■      | ■      | ■      |        |        |        |        | ■      | ■      |        |        |        |        |
| Selección ubicación                        |        |        | ■      |        | ■      |        |        |        |        |        | ■      |        |        |        |        |
| Medidas Fondo (UPV)                        |        |        | ■      |        |        |        |        |        |        |        |        | ■      | ■      |        |        |
| Medidas concentración media (Depósito UPV) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | ■      | ■      |        |        |
| Medidas concentración alta (Peñíscola)     |        |        |        |        | ■      | ■      |        |        | ■      |        |        |        |        |        |        |
| Resultados y conclusiones                  |        |        |        |        |        |        | ■      |        |        |        | ■      |        |        | ■      | ■      |

Figura 20. Cronograma de la metodología seguida

## 5.1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica es imprescindible en cualquier investigación pues permite conocer en profundidad el tema a tratar, en este caso, el radón y las metodologías utilizadas para la medición de exhalación del mismo. Es por esto que la primera fase de la metodología se ha centrado en el análisis bibliográfico de la información recogida. El proceso de análisis bibliográfico seguido en la ejecución del presente TFM se muestra en la Figura 21.

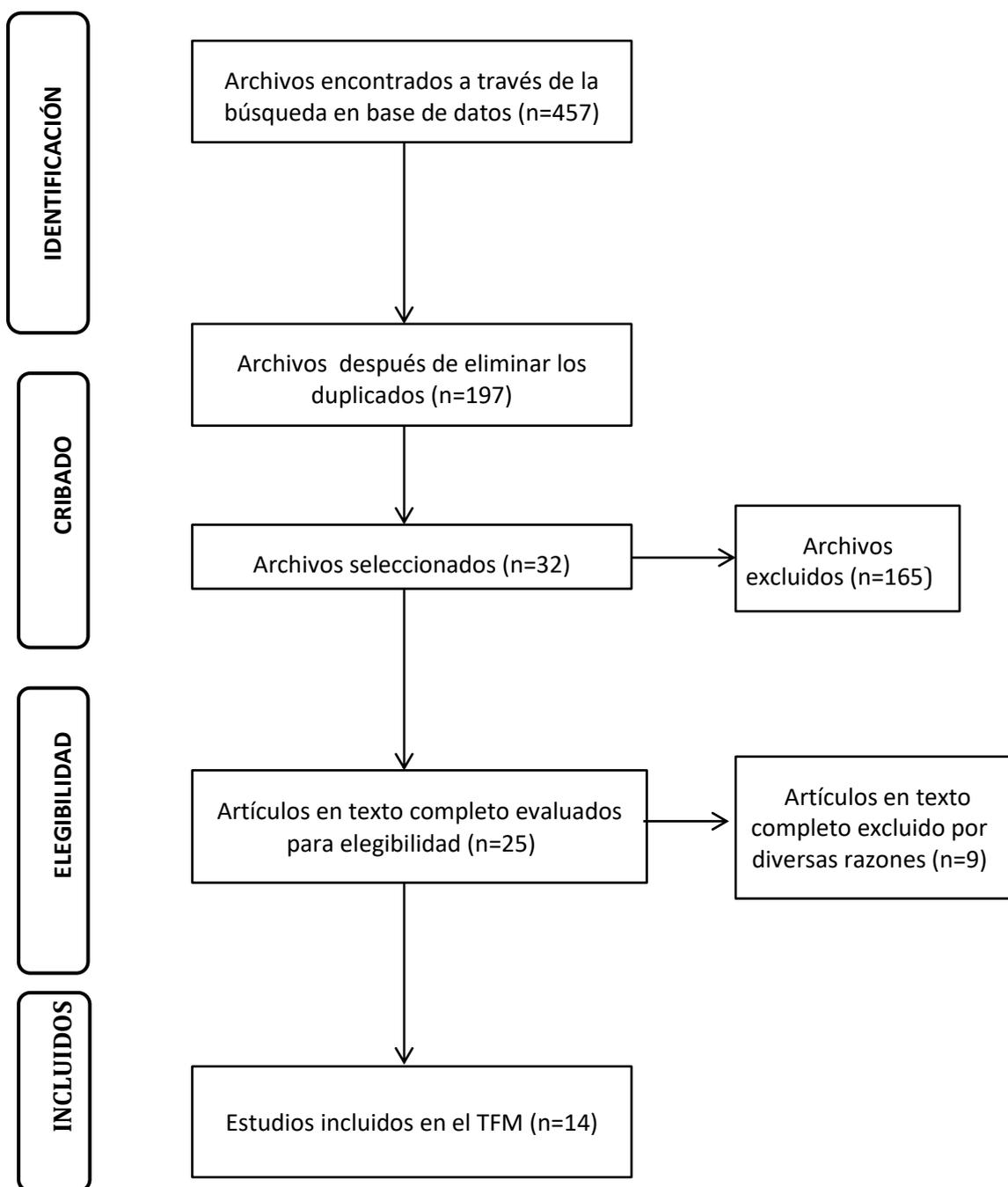


Figura 21. Esquema del proceso de análisis bibliográfico (n=nº de documentos)

La búsqueda de información se inició en bases de datos a partir de conceptos tales como “radón”, “exhalación de radón”, “radón en aire” o “metodologías de medición de radón”. Se utilizaron bases de datos como *Web of Science*, o *Science Direct*, entre otras. Se encontraron más de 457 artículos de los cuales se descartaron alrededor de 300 debido a la duplicidad de estudios y experimentos realizados. Muchos de ellos habían utilizado la misma instrumentación y metodología, pero en ciudades y países distintos.

De los casi 200 trabajos restantes que se habían seleccionado, se rechazaron unos 165 artículos, en base a la relevancia de los mismos. La mayoría de la información encontrada trataba la medición de radón en aire o agua pero pocos de ellos mostraban metodologías empleadas en la medición de radón exhalado. La mayoría de los artículos, aunque no aportaban experiencias sobre exhalación, sí recogían información interesante acerca de la difusión del gas, de cómo el gas se introduce en viviendas, del aumento de las elevadas concentraciones en el interior de edificios debido a los propios materiales de construcción, de la relación de las elevadas concentraciones de gas con el aumento del cáncer de pulmón, etc.

Se realizó una nueva selección, esta vez basada en el criterio de aplicabilidad de la instrumentación propuesta en cada artículo para la medición de exhalación de radón. No toda la instrumentación encontrada en las bases de datos se podía utilizar, ya que alguna suponía un elevado coste de adquisición y puesta en marcha. Se procuró la selección de métodos cuyo funcionamiento fuera similar al de los instrumentos disponibles en el Departamento de Ingeniería Nuclear para poder adaptarlos y utilizarlos de la misma forma. En concreto, uno de los artículos analizados ha servido en su integridad para la medición de exhalación de gas radón: el cánister de carbón activado en el interior de un recipiente impermeable.

Durante el proceso de revisión bibliográfica se utilizaron artículos, manuales de usuarios de diferentes metodologías, normativas, páginas webs de fabricantes de equipos y libros del Departamento.

Finalmente, los artículos que superaron todas las fases de selección, se han incluido y se citan a lo largo de este estudio.

## 5.2. Selección de las técnicas de medición

Finalizado el proceso de análisis bibliográfico se estudiaron las metodologías que se ajustaban al objetivo del presente Trabajo Final de Máster. Los criterios de selección se basaron en:

- Instrumentación disponible en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV que pudiera servir, con pequeñas modificaciones, para la medición de exhalación de gas radón, así como el coste en caso de nueva adquisición.
- Posibilidad de medir la cantidad de radón exhalado por la superficie.
- Si se trataba de un detector activo o pasivo, y si medían directamente la concentración de radón o si ésta se obtenía a través de la medición de sus descendientes.
- Lectura directa de las concentraciones de radón o si requerían de un soporte externo para la obtención de los resultados.
- Rango de medición, es decir, si se utilizaba en exteriores, interiores o en ambos entornos.
- Si su transporte era fácil y sencillo para mediciones de campo.
- Normativa existente, concretamente la ISO 11665 que establece los principios para la medición de la radiactividad en el ambiente. En particular, la *Parte 7: Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie* que establece una guía para estimar la cantidad de radón exhalado a partir de la cantidad que se acumula en una cámara de volumen conocido.
- Artículos que ofrecían experimentos y simulaciones de interés para la realización del TFM.

La aplicación de estos criterios para la selección de las técnicas a estudiar se describe en el apartado 6.1 de Resultados.

### 5.3. Selección de la ubicación de las mediciones

La selección de la ubicación para la realización de las diversas medidas de radón exhalado, se ha basado en los tres escenarios o fases, representados en la Figura 22.

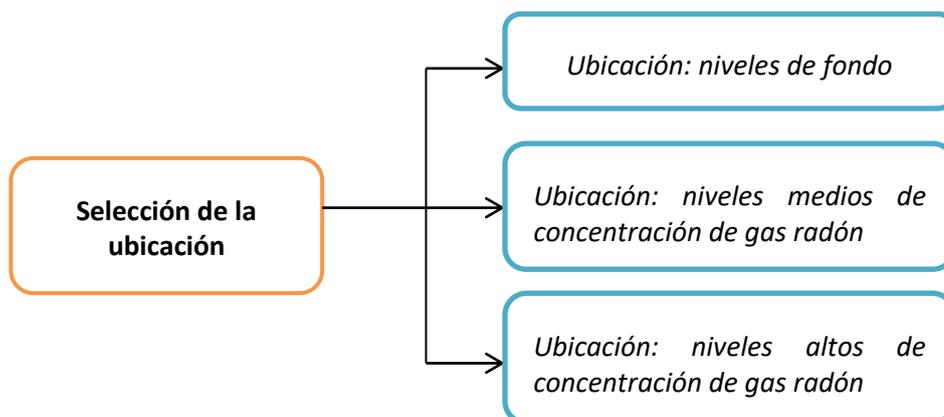


Figura 22. Selección de la ubicación de las medidas a realizar

#### a) *Ubicación: niveles de fondo*

Para poder tomar datos de valores de fondo aceptables, la ubicación seleccionada fueron los jardines de la UPV. En concreto, las mediciones se realizaron en el jardín de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, justo enfrente del edificio 5I de la universidad, tal y como se observa en la Figura 23.

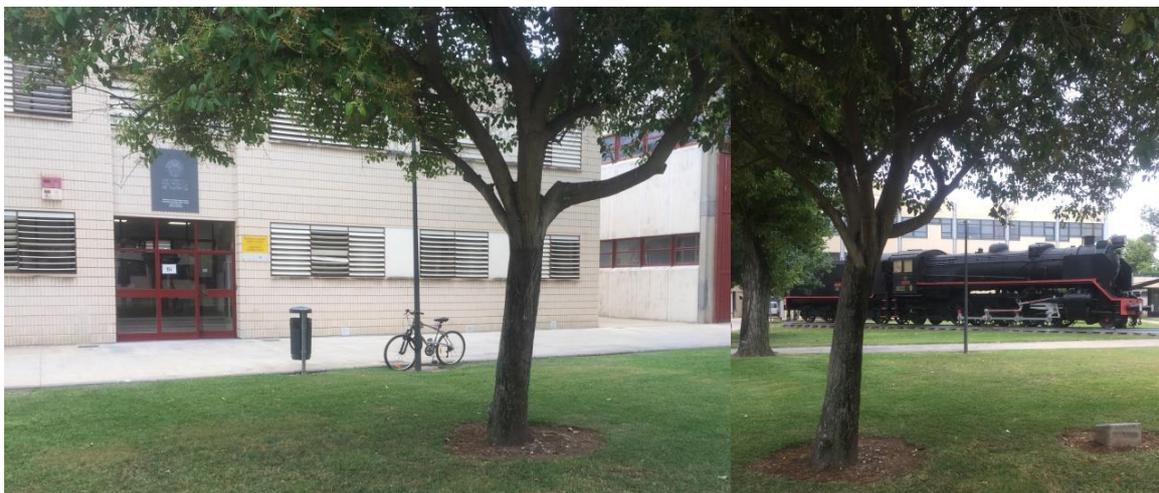


Figura 23. Ubicación para las mediciones de fondo (UPV, 2017)

Se aprovechó un emplazamiento libre de residuos y piedras, cerca de un árbol que podía simular una ubicación para edificaciones.

Los valores de fondo esperados, tal y como establece el mapa MARNA para la provincia de Valencia son valores inferiores a los  $150 \text{ Bq/m}^3$ .

***b) Ubicación con niveles medios de concentración de gas radón***

Para las mediciones de concentraciones medias de radón exhalado se utilizó un depósito de plástico de alta densidad, impermeable al gas, en cuyo interior se depositó una piedra pechblenda, un óxido natural de uranio.

El recipiente se cubrió con tierra de los jardines de la UPV libre de contaminación y se situó en el interior del Laboratorio de Física Nuclear del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. La ubicación del depósito se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

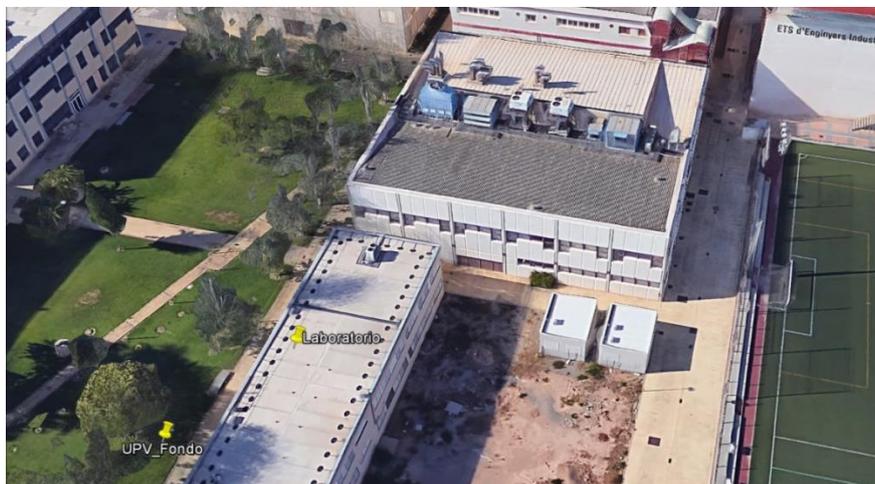


**Figura 24. Ubicación del depósito para la medición de concentraciones medias de radón**

El depósito se situó a más de un metro de distancia de las paredes del laboratorio y alejado de puertas y ventanas para prevenir las posibles corrientes de aire. Las ventanas situadas más próximas al depósito se encontraban cerradas durante todo el proceso de medición.

Las mediciones realizadas en el depósito no se ven afectadas por cambios en las condiciones climatológicas como lluvia, viento, humedad o variaciones bruscas de temperatura y presión. Es por esto que los resultados obtenidos en las mediciones son considerados relevantes por su reproducibilidad en otros escenarios similares y para poder comparar las diferentes técnicas cuando no influyen factores externos.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la localización de las ediciones de fondo y de concentraciones medias en el laboratorio del Departamento.



**Figura 25. Ubicación para mediciones de fondo y concentraciones medias**

### ***c) Ubicación con niveles altos de concentración de gas radón***

Las mediciones de radón en elevadas concentraciones se realizaron en diferentes puntos de la Marjal de Peñíscola.

El Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV ha estado realizando mediciones de radón en agua en los últimos años en la localidad de Peñíscola, donde las concentraciones, por razones no clarificadas, son altas. Además, los estudios de varias universidades (Cherta, A., 2012) realizados en el mismo escenario han mostrado el interés particular de la zona en cuanto a existencia de radón.

Por lo tanto, este ha sido el escenario escogido para realizar medidas con altos niveles de concentración. En este nuevo escenario, las condiciones climatológicas y del propio terreno varían constantemente, lo que permitirá conocer el funcionamiento de las diferentes metodologías en una aproximación a la realidad.

La ciudad de Peñíscola se encuentra situada en la costa norte de la provincia de Castellón, en la comarca del Baix Maestrat. El término municipal de Peñíscola tiene una extensión de 79 km<sup>2</sup> y una población de alrededor de 7.500 habitantes. La ubicación de la ciudad de Peñíscola se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Localización de Peñíscola (Google Maps, 2016)

A escasos metros del mar se encuentra la Marjal de Peñíscola, un paraje considerado Lugar de Interés Comunitario (LIC) desde el 10 de julio de 2001 teniendo en cuenta el cumplimiento de los objetos establecidos por la Directiva y en el Real Decreto 1997/1995. Está catalogado como Microreserva de flora del municipio.

La Marjal de Peñíscola es una zona húmeda, donde confluyen aguas de diversa procedencia, que conserva parte de sus características naturales, dando lugar a la mayor población mundial de Samaruc, y a una de las últimas reservas del Fartet. Diversas aves conviven en el humedal. Los proyectos urbanísticos que han asolado la costa mediterránea durante las últimas décadas han provocado la degradación del humedal así como una pérdida importante de las especies que habitan. Numerosos artículos (Moreno, 2008) citan la alta densidad de habitantes y el abuso de captaciones hídricas entre las principales causas de la degradación y contaminación de la marjal.

## 6. RESULTADOS

El apartado de resultados se va a dividir en dos fases.

- La Fase 1, corresponde a la selección de las técnicas y su justificación, en función de los criterios y las valoraciones propuestos para este TFM, y la descripción técnica y puesta a punto de cada una de las metodologías empleadas.
- La Fase 2, corresponde a los resultados obtenidos en el manejo de cada una de las técnicas en los tres emplazamientos propuestos: jardines ETSII, Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, y Marjal de Peñíscola.

### FASE 1: Técnicas seleccionadas

#### 6.1. Selección de las técnicas

En este apartado se valoran algunas de las alternativas estudiadas para la medición de la cantidad de radón en función de algunos criterios base, expuestos en el apartado de Metodología (apartado 5.2). Para cada una de las alternativas se ha valorado mediante Sí/No en los casos de respuesta binaria, o con respuesta concreta según el criterio.

En la Tabla 5 se recoge para cada alternativa su valoración en función de los criterios de selección.

Tabla 5. Criterios y alternativas

| Alternativas                                | CRITERIOS                   |                 |                        |                  |                          |                    |                 |                        |         |                         |
|---|-----------------------------|-----------------|------------------------|------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|------------------------|---------|-------------------------|
|   | Disponibilidad Departamento | Mide exhalación | Detector Activo/Pasivo | Alimentación red | Mide concentración de Rn | Mide descendientes | Lectura directa | Rango medida           | Transp. | Cumple UNE EN ISO-11665 |
| Cánister de carbón activo                   | Sí                          | Sí              | Activo                 | No               | No                       | Sí                 | No              | Interior y exterior    | Sí      | No                      |
| Detector de trazas                          | Sí                          | Sí              | Pasivo                 | No               | Sí                       | No                 | No              | Interior y exterior    | Sí      | No                      |
| Cámara H conectada a electrete              | No                          | Sí              | Pasivo                 | No               | Sí                       | No                 | No              | Interior y exterior    | Sí      | No                      |
| Cámara ionización (ALPHAGUARD)              | Sí                          | No              | Activo                 | No               | Sí                       | No                 | Sí              | Muy útil en interiores | No      | No                      |
| Lucas Cell (Radon Scout PMT, medidor)       | Sí                          | No              | Activo                 | Sí               | Sí                       | Sí                 | Sí              | Ambiente               | Si      | No                      |
| Sonda de gas de suelo conectado a RAD7      | Sí                          | No              | Activo                 | Dependencia red  | No                       | Sí                 | Sí              | Exterior               | Sí      | No                      |
| Cámara emisión superficial conectada a RAD7 | No                          | Sí              | Activo                 | Dependencia red  | No                       | Sí                 | Sí              | Exterior               | Sí      | Sí                      |

El primer y principal criterio para la selección de las técnicas de medición empleadas en este TFM ha sido el tipo de medición que realizaban. Es decir, si podían medir o no concentraciones de radón exhalado. De esta forma, las alternativas se redujeron a: cánister de carbón activo en el interior de una cámara, detector de trazas en cámara, cámara H conectada a electrete y cámara superficial conectada al monitor RAD7.

En el caso del caso del cánister de carbón activo, este instrumento se encuentra disponible en el Departamento, y sí permite la medición de la cantidad de radón exhalado por la superficie. Se trata de un método activo, mide la concentración de radón a partir de sus descendientes y el coste de adquisición es nulo porque ya está disponible en el Departamento. Aunque no permite la lectura directa de la concentración de radón, se puede utilizar tanto en interiores como en exteriores. No requiere de alimentación de red y es fácilmente transportable. Aunque no se nombra esta técnica en la normativa UNE-EN ISO 11665, existen estudios de medición de radón en los que ha sido empleada (Wang, 2009). Por todo esto, el cánister es una de las técnicas seleccionadas para medición de radón.

Por su parte, la cámara de emisión superficial cumple con la normativa española UNE EN ISO 11665-7 y, aunque no estaba disponible en el Departamento, se conecta al monitor en continuo RAD7, disponible y de uso habitual en el Departamento. El uso de la cámara resultaba sencillo aunque no tanto la selección de protocolos mediante el monitor RAD7. La duración de las mediciones se puede seleccionar en función del interés del usuario y los resultados se pueden obtener de forma instantánea. Se trata de una técnica que permite medir la concentración de radón a través de la concentración de sus descendientes y proporciona una lectura directa. La cámara puede utilizarse en exteriores, mediante la inserción en el suelo, y aunque depende de la alimentación a la red, para poder cargar el monitor RAD7, es fácilmente transportable.

En cuanto a los electretes, de uso habitual en las mediciones de radón en aire realizadas por el Departamento, requerían de una nueva cámara que permitiese la acumulación de radón. Por ello, se realizó la compra de una cámara H, a la que se conectaba el electrete. Su uso es sencillo y se puede obtener de forma rápida la concentración de radón (entre 6-8 horas de medición). Los electretes miden la concentración del radón y se pueden utilizar tanto en exteriores como en interiores. Su tamaño es pequeño, fácilmente transportable y no depende de la alimentación a la red eléctrica.

La última técnica seleccionada ha sido la sonda de gas de suelo. Aunque este instrumento de medición no se puede utilizar para la obtención de la concentración de radón exhalado, sí puede utilizarse para conocer la cantidad de radón que puede emanar para ser posteriormente transportado hasta la superficie. Este dispositivo ya estaba disponible en el Departamento y por tanto no suponía ningún coste. Además, su utilización es sencilla, los periodos de medición cortos (30 minutos aproximadamente), y permite conocer los valores de concentración de forma rápida, con cada bombeo de aire que realiza. Se suele utilizar en exteriores y la lectura de las concentraciones se realiza de forma directa. No obstante, requiere de alimentación a la red para recargar el monitor RAD7.

Una vez seleccionadas las técnicas de medición oportunas, se realizó su puesta a punto. Para ello se utilizaron los manuales y especificaciones técnicas de cada uno de los instrumentos.

Durante los primeros días de la puesta a punto se realizaron pequeños cambios y mejoras en la utilización de la instrumentación. Estos cambios suponían una mejor captación de gas radón exhalado, una mejor permeabilización de las cámaras, y por tanto, una mejora en las condiciones de medición.

Analizando de nuevo, cada una de las técnicas de medición por separado, la descripción técnica y el resultado de la puesta a punto se muestra en los siguientes apartados.

## **6.2. Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección RAD7.**

En este apartado se va a detallar la técnica seleccionada para la medición de la emanación de gas radón en el suelo. Como la sonda está conectada al monitor de detección RAD7 se va a detallar primero el principio de funcionamiento del RAD7.

### **6.2.1. Descripción de la técnica**

El principio de funcionamiento de cada uno de los aparatos de medición se detalla a continuación.

#### **Monitor de detección de radón RAD7**

El monitor de detección de radón RAD7, de la compañía DurrIDGE, es un instrumento de medición eficaz, rápido y versátil utilizado en laboratorios y trabajos de investigación de todo el mundo. Se trata de un monitor en continuo que permite conocer las variaciones en las cantidades de radón, medido durante todo el proceso de medición. El RAD7 está formado por un detector de silicio, una bomba de aire incorporada, baterías recargables y una impresora infrarroja inalámbrica (DurrIDGE RAD7 Manual, 2015). El RAD7 presenta la imagen que se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Detector de radón RAD7 (DurrIDGE RAD7 Manual, 2015)

El RAD7 utiliza un detector de desintegraciones alfa,  $\alpha$ , de estado sólido. El detector de estado sólido está formado por un material semiconductor, silicio, de iones implantados, que transforma la radiación alfa recibida en una señal eléctrica.

Un circuito de alimentación de alta tensión carga el conductor interno y crea un campo eléctrico en toda la celda. El campo eléctrico, a su vez, impulsa las partículas que están cargadas positivamente para ubicarlas sobre el detector.

El dispositivo en estado sólido es robusto y es capaz de determinar de forma electrónica la energía que emite cada una de las partículas alfa, mientras que es completamente insensible a las radiaciones de tipo beta o gamma. Las energías de las partículas alfa conforman el espectro de energía característico para cada muestra tomada.

El espectro alfa, tal y como se observa en la Figura 28, consiste en una serie de picos distribuidos de forma lineal en función de sus energías que permite conocer qué isótopo ( $^{218}\text{Po}$  o  $^{214}\text{Po}$ ) se produce en la radiación:

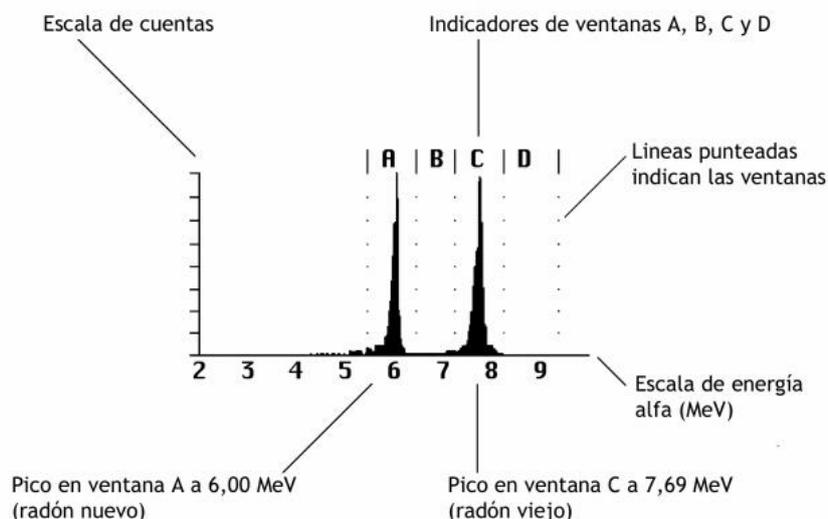


Figura 28. Espectro de energía alfa del monitor en continuo RAD7 (DurrIDGE RAD7 Manual, 2015)

Para el radón, los dos picos que se observan corresponden al  $^{218}\text{Po}$  y al  $^{214}\text{Po}$  cuyas energías de desintegración son 6,15MeV y 7,69MeV respectivamente. El Po-214 sólo será visible en las mediciones en las que se requieran tiempos mayores, debido a que sólo es observable cuando se alcanza el equilibrio.

El monitor RAD7 mide únicamente la concentración de gas radón presente en las diferentes muestras tomadas, no los descendientes o hijos del mismo. A través de la bomba que contiene el monitor, las muestras de aire extraído se hacen pasar por un filtro que no permite el paso de los descendientes del radón. El radón se va desintegrando en el interior de la cámara en forma de partículas alfa que son captadas por el monitor.

En cuanto a las especificaciones técnicas, el rango de operación del monitor en continuo RAD7 permite trabajar con temperaturas que oscilan entre los 0°C y los 45°C y con humedades de entre el 0% y el 100%. Para una mejor resolución de los datos, será necesario trabajar con una humedad que no supere el 10% debido a la gran afinidad que presenta el gas radón por las moléculas de agua. El límite de detección del monitor en continuo RAD7 se sitúa entre 4-750.000 Bq/m<sup>3</sup>.

Antes de iniciar cualquier medida mediante el detector de radón RAD7 se debe comprobar que su memoria interna no esté llena, y para ello se deberá leer el número de ciclos mediante el comando ENTER, que deberá ser inferior a 90. Si el espacio restante o los número de ejecución libres son pocos se deberá realizar la descarga de todos los datos a un ordenador para poder liberar así la memoria.

#### **Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección de radón RAD7**

Según *DURRIDGE Radon Instrumentation*, para la correcta medición de la cantidad de radón en el suelo es necesario utilizar técnicas que permitan el estudio del mismo sin exponerlo al aire exterior. Por ello se ha utilizado la sonda *Soil Gas Probe* (sonda de gas de suelo) que consiste en un tubo de acero inoxidable de 35,6 cm de largo con una punta afilada en el extremo inferior. Contiene una válvula y un manómetro de vacío, unas gomas de plástico de suman un total de 10 metros así como un adaptador en forma de T (mango) para facilitar su inserción en el suelo. La sonda presenta un aspecto como el que se muestra a continuación en la Figura 29.



**Figura 29. Sonda Soil Gas Probe (User Manual, 2016)**

La sonda de medición de gas radón se colocará en un suelo uniforme y libre de rocas, muy por encima de la capa freática, primera capa de agua subterránea que se encuentra al realizar una perforación. Si durante la inserción de la sonda se encuentra alguna roca, ésta se retirará y se buscará un nuevo emplazamiento sin llegar a forzarla.

Una vez seleccionado el mejor punto para la medición de radón, se procederá a la limpieza de la sonda. Ésta tiene en su extremo, en forma de punta, unos oricios de apenas 1mm de diámetro que deberán ser limpiados antes de cada medición para evita su obstrucción, mejorando así la captación de gas radón. A continuación se insertará la sonda en el suelo colocando la punta de forma vertical y aplicando una nueva presión mediante el mango en forma de T. El mango irá girando lentamente en sentido horario hasta conseguir que la sonda esté a la profundidad adecuada, a unos 29 cm. En caso de encontrar un terreno duro y difícil, se podría utilizar una varilla piloto de acero, más fina y de mayor longitud, dada por el fabricante, para así penetrar en el suelo con mayor facilidad.

Cuando la sonda es insertada en el suelo, y para evitar que se escape el gas contenido en el mismo, se ajustará la tierra alrededor de la sonda quedando así sellado.

Para conectar la sonda de acero inoxidable al RAD7, se retirará el mango en forma de T y se envolverá la rosca de la sonda con cinta de teflón para después enroscar la válvula de agua y el manómetro de vacío. La junta debe permanecer sellada y apretada.

La sonda de gas permite succionar aire del interior de la tierra, exhalado por las rocas durante todo el proceso de medición. Se conecta al filtro que retiene las partículas de polvo y éste a su vez está unido a la unidad de secado por la parte superior de la misma. La unidad de secado está formada por piedras driheritas que permiten la retención de humedad del gas extraído del suelo. La parte inferior de la unidad de secado se conecta al RAD7 mediante un pequeño filtro al final del tubo conductor. Una vez se ha introducido el gas en el RAD7, éste realiza el análisis de los datos a partir del protocolo seleccionado y el gas capturado se devuelve a la atmósfera mediante el orificio de salida (Soil Gas Probe Manual, 2015).

El circuito de funcionamiento de la sonda de gas de suelo se muestra en la Figura 30.

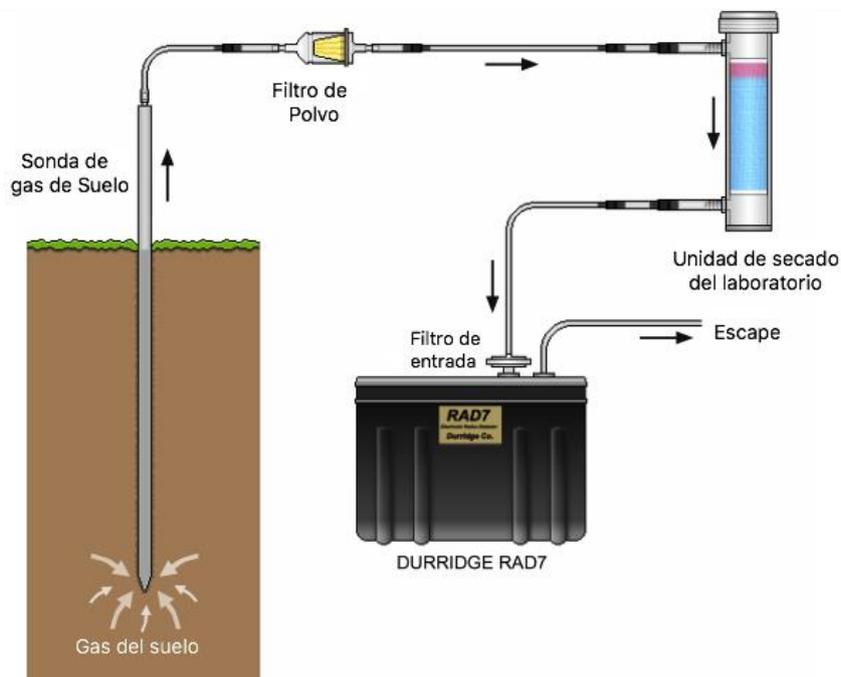


Figura 30. Circuito de funcionamiento de la sonda de gas (Soil Gas Probe Manual, 2016)

Cabe destacar que la sonda de gas de suelo se utilizará únicamente para conocer la emanación de gas radón en el suelo y no su exhalación. Esto supone que únicamente permite detectar de forma rápida (alrededor de 30 minutos) los puntos en los que hay, o no, radón.

### 6.2.2. Puesta a punto de la técnica

En este apartado se detallará la puesta a punto del monitor de detección de radón RAD7, que se utilizará para la sonda de gas de suelo y para el caso de la cámara de emisión superficial así como la propia puesta a punto de la sonda de gas de suelo.

#### **Monitor de detección de radón RAD7**

##### ***Configuración del protocolo***

El monitor de radón RAD7 dispone de diversos protocolos en función de las necesidades y exigencias del usuario. Para seleccionar en cada caso el protocolo a utilizar, se pulsarán los comandos <Setup Protocol> tanto para el caso en que se requieran unos parámetros definidos como para crear un nuevo protocolo. En la Tabla 6. Protocolos monitor RAD7 se muestran los protocolos existentes.

Tabla 6. Protocolos monitor RAD7(Fuente: DurrIDGE RAD7 Manual)

|         | Ciclo | Reciclado | Modo    | Torón     | Bomba   |
|---------|-------|-----------|---------|-----------|---------|
| Rastreo | 00:05 | 0         | Rastreo | Apagado   | Auto    |
| 1 día   | 00:30 | 48        | Auto    | Apagado   | Auto    |
| 2 días  | 01:00 | 48        | Auto    | Apagado   | Auto    |
| Semanas | 02:00 | 0         | Auto    | Apagado   | Auto    |
| Usuario | xxx   | xxx       | xxx     | xxx       | xxx     |
| Captura | 00:05 | 4         | Rastreo | Apagado   | Captura |
| Wat-40  | 00:05 | 4         | Wat-40  | Apagado   | Captura |
| Wat250  | 00:05 | 4         | Wat250  | Apagado   | Captura |
| Torón   | 00:05 | 0         | Rastreo | Encendido | Auto    |

Para cada protocolo, el ciclo indica la duración de cada una de las mediciones y el reciclado o reciclo, que son las veces que se repite una misma prueba.

Entre los protocolos ya definidos existe también la posibilidad de configurar uno propio por parte del usuario según sus necesidades. Se debe seleccionar para ello el tiempo que se requiere para la medición (ciclo) y el número de medidas a realizar (reciclo) mediante los comandos que aparecen en pantalla.

### **Configuración de la bomba**

Se dispone de una bomba de aire incorporada cuya velocidad de flujo nominal es de 1L/min, que presenta una velocidad de flujo de 8000 mL/min. En todos los casos y mediciones en los que se ha utilizado el detector de radón RAD7 durante la ejecución de este TFM, se ha mantenido la configuración AUTO. Mediante esta configuración, la bomba se enciende durante los 4 primeros minutos de cada uno de los nuevos ciclos para conseguir un buen muestreo.

### **Configuración del formato de impresión**

La configuración permitirá cambiar la forma en la que se imprimirán cada uno de los datos de las mediciones. Las cuatro configuraciones de formato son:

- Corto: el RAD7 imprime los resultados de las mediciones de forma abreviada incluyendo el número de serie/ciclo, la concentración de radón y su incertidumbre, fecha y hora, unidades y modo, y temperatura y humedad relativa.
- Media-larga: incluye, además de todo lo impreso en el formato corto, los recuentos totales, el período activo y los recuentos por minuto, valores a partir de los cuales se obtienen las concentraciones de radón.
- Largo: en este caso se incluye además el espectro de energía alfa.
- Apagado: en este caso, al final de cada ciclo no se imprimirá nada excepto un resumen y un espectro acumulativo al final de cada serie.

### **Configuración de las unidades de medida**

Se seleccionará >Configurar unidades, para el cambio de las unidades de medición tanto de la temperatura detectada como de la concentración de radón existente en cada punto medido.

Durante las mediciones realizadas en la ejecución de este Trabajo Final de Máster se ha seleccionado como unidad de temperatura, los °C, y como unidad de medición de concentración de radón, los Bq/m<sup>3</sup>.

### **Configuración de la impresora**

El detector de radón RAD7 utiliza una impresora con conexión de infrarrojos para imprimir cada una de las mediciones que se realizan de forma instantánea. La impresora se coloca sobre la placa frontal del detector RAD7. Una vez seleccionado el protocolo con el que se va a trabajar, se apagará el monitor RAD7 y se encenderá la impresora. Se esperará durante unos segundos y se procederá al encendido del monitor RAD7. Al iniciarse el RAD7, se imprimirá información de identificación como la que se muestra en la Figura 31.



**Figura 31. Información de identificación del RAD7**

Para cada una de las muestras de aire exhalado tomadas, se obtendrá no sólo la información de identificación del RAD7 sino también las mediciones para cada intervalo de tiempo y el espectro de energías alfas explicado en apartados anteriores, que permitirá conocer la concentración de gas radón existente en la muestra.

### **Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección RAD7**

#### **Protocolo de medida**

Existen diversos métodos de medición que se pueden llevar a cabo mediante el RAD7. El seleccionado en este caso es el protocolo GRAB, de tiempos cortos, que permite medir la concentración de gas radón aunque no se haya alcanzado el equilibrio. Es decir, se obtendrá un espectro de energías alfa en el cual sólo se cuantifica la cantidad de Po-218 presente en la muestra de aire medido. El protocolo GRAB permite así realizar lecturas rápidas (aproximadamente 30 minutos) con la menor cantidad de gas radón posible.

Para poder utilizar el protocolo GRAB, tal y como se indica en la ficha técnica del detector de radón RAD7, se debe realizar una purga de unos 10 minutos o más sin conectar la sonda. La unidad de secado se conectará al RAD7 y se purgará. La purga permitirá eliminar el posible radón que se haya quedado en el detector así como disminuir la humedad relativa del aire para un mejor análisis de la concentración de gas radón. Para comprobar que la humedad está por debajo del 10%, condición requerida en la ficha técnica del RAD7, se leerá una de las ventanas que presenta el RAD7.

A continuación, se seleccionará el protocolo Grab <Setup, Protocol, Grab, ENTER para cargar automáticamente el grupo de parámetros predeterminados. El protocolo GRAB consiste en 4 ciclos de 5 minutos cada uno.

Una vez seleccionado el protocolo, se apagará el detector de radón RAD7 y se conectarán los tubos de plástico a la sonda para cerrar el circuito. Se encenderá la pequeña impresora de la que dispone el RAD7 y se volverá a encender el RAD7. En este momento la impresora imprimirá el resumen de la configuración seleccionada: indicará la fecha y hora de la medición, el protocolo seleccionado así como las unidades de medida. Una vez comprobado que está todo correcto, se producirá el arranque de las mediciones, Test, ENTER. La bomba del RAD7 esperará unos 10 minutos a partir de los cuales empezará con los 4 ciclos de 5 minutos cada uno.

#### **Repetibilidad de las medidas**

Para poder realizar medidas alrededor de un mismo punto y analizar la repetibilidad de las mismas, en este TFM se ha desarrollado un nuevo dispositivo que permite la toma de muestras de aire exhalado en distintos puntos separados entre sí 50 cm (de extremo a extremo). La sonda se introducirá cada vez, en cada uno de los orificios situados a los extremos del dispositivo, que facilitará los cálculos de concentraciones de gas radón medios así como conocer de forma matemática la dispersión que presenta el mismo.

El dispositivo se muestra en la Figura 32:



**Figura 32. Dispositivo creado para la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo**

El procedimiento de medida de la concentración de gas radón se prolongará durante aproximadamente 3 horas, 30 min para cada medida. El dispositivo utilizado presenta la forma que se observa en la Figura 33.



**Figura 33. Configuración para la medición de exhalación de radón mediante la sonda de gas**

**Recuperación de los resultados**

Durante todo el proceso de medición, la impresora del RAD7 irá mostrando el análisis del gas radón para cada uno de los ciclos y además se irá guardando en el ordenador interno que dispone el propio RAD7. Una vez finalizado el proceso de medición, el detector de gas radón RAD7 ofrecerá un resumen de la medición que incluye la concentración promedio de radón, la desviación típica de las mediciones y el espectro de operación del mismo.

En la Tabla 7 se recoge, a modo de resumen, el procedimiento diario seguido en la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo.

**Tabla 7. Cuadro resumen: mediciones sonda de gas de suelo**

| <b>Día</b>   | <b>Instrumento de medición</b> | <b>Medida</b>         | <b>Procedimiento</b>                                     | <b>Duración total aproximada</b> |
|--|--------------------------------|-----------------------|--|----------------------------------|
| <b>1</b>   | <b>Sonda de gas de suelo</b>   | <b>Medida punto 1</b> | <b>Purga</b>   | <b>50 min</b>                    |
|  |                                |                       | Duración aprox.:15 min                                   |                                  |
|  |                                |                       | Objetivo: disminuir humedad por debajo del 10%           |                                  |
|  |                                |                       | <b>Captación radón exhalado y medida</b>                 |                                  |
|  |                                |                       | Duración aprox.: 30min                                   |                                  |
|  |                                |                       | Objetivo: medición de la concentración de radón exhalado |                                  |
|  |                                |                       | <b>Limpieza sonda</b>                                    |                                  |
|  |                                |                       | Duración: 5 min  |                                  |
| Objetivo: limpiar la sonda para mejorar la captación de radón exhalado |                                |                       |  |                                  |

Este mismo procedimiento con una duración aproximada de 50 minutos se repetirá un total de 6 veces siguiendo el dispositivo mostrado en la Figura 32.

### 6.3. Cámara de emisión superficial conectada al monitor de detección de radón RAD7

#### 6.3.1. Descripción de la técnica

El principio en el que se basa esta técnica para la medición de la concentración de radón en aire exhalado consiste en la acumulación del gas en una cámara limpia de radón que se sitúa sobre la superficie a analizar durante un periodo de tiempo determinado según UNE-EN ISO 11665-5. La cantidad de volumen de aire acumulado supone una muestra representativa de la cantidad de gas radón exhalado.

Al igual que sucedía con la sonda de gas de suelo, la cámara de emisión superficial está conectada al monitor de detección de radón RAD7, cuyo funcionamiento ya ha sido descrito en el apartado anterior. El procedimiento para el ajuste del protocolo de medición se detalla en el apartado de *Puesta a punto*.

En este caso se utiliza una cámara de emisiones, un dispositivo similar a una placa con borde de metal de 3 cm aproximadamente, que forma un sello hermético cuando se inserta en el suelo, y 24,5 cm de diámetro. En la cámara se producirá la acumulación de gas exhalado de la superficie terrestre. Esta cámara presenta dos orificios que se conectarán a la torre o unidad de secado, y al monitor RAD7 respectivamente. La cámara presenta una forma como la que se muestra en la Figura 34:



Figura 34. Cámara superficial de exhalación radón (Emission Chambers User Manual, 2012)

El circuito está sellado como se muestra en la Figura 35:

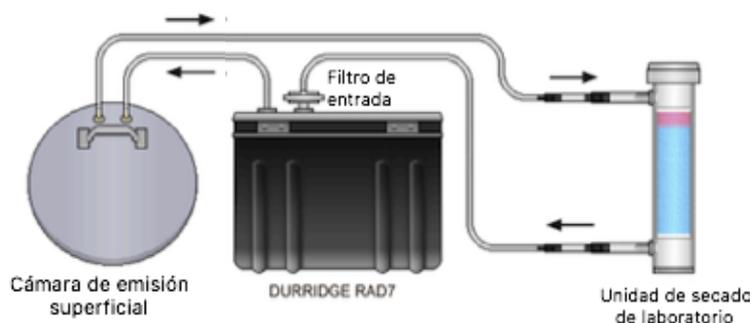


Figura 35. Circuito cámara de emisión superficial (Emission Chambers User Manual, 2012)

La configuración del sistema de circuito cerrado permite que se produzca la acumulación del radón en el interior de la cámara.

### 6.3.2. Puesta a punto

#### Protocolo de medida

De forma previa a la medición de la cantidad de radón exhalado, se realiza una purga del sistema. Para ello se seguirá el mismo procedimiento que en el caso de la sonda: se seleccionará el comando Menu, Test, Purge, ENTER. La purga permitirá eliminar el posible radón que se haya quedado en el detector así como disminuir la humedad del aire para un mejor análisis de gases. Para casos en los que la cantidad de radón exhalado sea elevada, el proceso de purga puede llegar a alcanzar los 30 minutos, mientras que en los casos en que las cantidades exhaladas sean menores, se ha observado que con 15 minutos es suficiente para conseguir purgar y bajar el grado de humedad del sistema hasta el 7-10%.

Una vez purgado el sistema, se sellará el circuito como se muestra en la Figura 36.



**Figura 36. Circuito de purga para la cámara de emisión superficial**

La cantidad de radón en el interior del circuito se controlará en el modo de aspiración mediante el protocolo NONE, definido por el usuario. Se seleccionará < Setup, Protocol, None, ENTER. CYCLE 15, RECYCLE 16. Esto significa que el detector de radón RAD7 realizará ciclos de 15 minutos durante 4 horas.

Una vez seleccionado el protocolo, se apagará el monitor de detección de radón RAD7 y se conectará el circuito. Se encenderá la impresora y de nuevo el monitor de detección RAD7. La impresora proporcionará un resumen de la configuración seleccionada.

Por último, se inician las mediciones, momento a partir del cual la bomba se pondrá en funcionamiento.

### Recuperación de los datos

Como se utiliza el mismo detector que para el caso anterior de la sonda de gas, los resultados se obtendrán de forma similar. A lo largo de las 4 horas de duración de las mediciones se obtendrán los valores de la concentración de gas radón exhalado. Se dispondrá también de un resumen final que contendrá los valores medios, la desviación típica, temperatura y resultado en cada medida, etc.

Los resultados obtenidos deberán presentar la forma que se observa en la Figura 37:

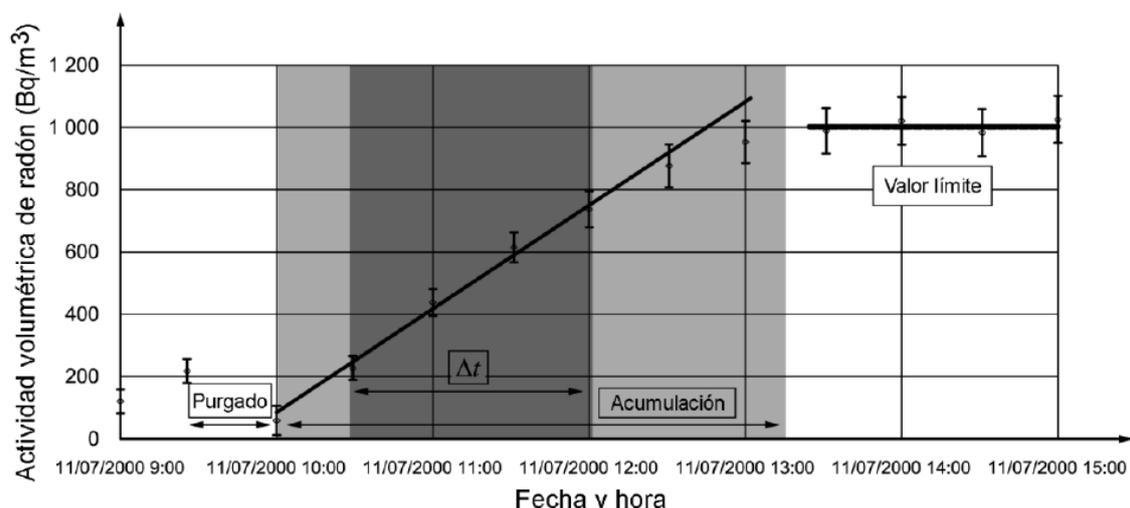


Figura 37. Ejemplo cámara de acumulación UNE EN ISO 11665-5

Tal y como se observa en la figura anterior, se produce una acumulación creciente de gas radón durante aproximadamente 70 minutos. A partir de ese momento, la concentración de gas radón presente en la cámara se satura y los valores permanecen constantes.

Según la pendiente obtenida en el tramo de acumulación de gas radón, según UNE-EN ISO 11665-5, y a partir de las dimensiones que presenta la cámara, se calcula la tasa de exhalación a partir de la Ec. 14:

$$\phi = pte \cdot \frac{V}{S} \quad \text{Ec. 14}$$

Siendo pte, la pendiente de la recta para el tramo de acumulación de radón, V el volumen de la cámara (m<sup>3</sup>) y S la superficie de la cámara (m<sup>2</sup>).

En la Tabla 8 se recoge a modo de resumen, el procedimiento diario seguido en la medición de exhalación de radón mediante la cámara de emisión superficial.

**Tabla 8. Cuadro resumen: mediciones cámara de emisión superficial**

| <b>Día</b> | <b>Instrumento de medición</b> | <b>Medida</b>   | <b>Procedimiento</b>   | <b>Duración total aproximada</b> |
|------------|--------------------------------|-----------------|--|----------------------------------|
| <b>1</b>   | <b>Cámara superficial</b>      | <b>Medida 1</b> | <b>Purga</b>   | <b>3 horas y 20 min</b>          |
|            |                                |                 | Duración aprox.:15 min   |                                  |
|            |                                |                 | Objetivo: disminuir humedad por debajo del 10%   |                                  |
|            |                                |                 | <b>Captación y medida</b>  |                                  |
|            |                                |                 | Duración aprox.: 3 horas   |                                  |
|            |                                |                 | Objetivo: medición de la concentración de radón exhalado a partir de la acumulación del mismo en la cámara |                                  |
|            |                                |                 | <b>Limpieza cámara</b>   |                                  |
|            |                                |                 | Duración: 5 min  |                                  |
|            |                                |                 | Objetivo: limpiar la cámara para mejorar la captación de radón exhalado                                    |                                  |

## 6.4. Cámara H conectada a un electrete

### 6.4.1. Descripción de la técnica

Según *Manual for Using E-PERM flux monitors for the measurement of radón concentration and radón flux from ground* (E-PERM Manual, 2012) un E-PERM RADON MONITOR consiste en un electrete insertado en una cámara hecha de un material conductor de electricidad. La cámara H presenta una ventana de difusión grande recubierta con carbono. Además dispone de un collar de acero inoxidable que facilita la inserción de la cámara en la tierra evitando la dispersión del gas contenido medido. La Figura 38 muestra la cámara H conectada al electrete:



Figura 38. Cámara H conectada al electrete

En esta técnica de medición el detector real de radón es el electrete, un disco de Teflón cargado que se utiliza como fuente de recolección de iones y también como sensor de ionización integrante. Durante todas las mediciones se han utilizado electretes *Short-Term* (S), aptos para mediciones de corta duración, como las realizadas en este Trabajo Fin de Máster, cuya imagen se muestra en la Figura 39:



Figura 39. Electrete Short-Term (S)

El gas radón se difunde a través del volumen de la cámara y las partículas alfa que emite el propio radón en su decaimiento ionizan las moléculas de aire. Cuando se deposita el monitor de flujo de radón (RFM) en una superficie de emanación de radón, éste se acumula en el interior de la cámara. El electrete está cargado positivamente por lo que los iones negativos que se producen en el proceso de decaimiento del radón, provocan una descarga del electrete.

La descarga del electrete (diferencia de potencial) medida después del tiempo de acumulación (entre 6 y 8 horas) se mide in-situ mediante el SPER-1 Reader VOLTAGE READER, que se muestra en la Figura 40:



Figura 40. Medidor de voltaje SPER-1 Voltage Reader

El voltaje inicial previo a la medición y el voltaje final, pasadas las 6 horas de medición, se anotan en una hoja de cálculo Excel junto con los niveles de fondo medidos en el momento. A partir de estos datos, se obtiene la concentración de radón medido por unidad de volumen de acuerdo a unas ecuaciones dadas por el fabricante.

#### 6.4.2. Puesta a punto de la cámara H

##### Protocolo de medida

Se elegirá un día sin precipitaciones y cuyas condiciones meteorológicas sean fácilmente imitables para posteriores medidas y se seleccionará una localización libre de vegetación y objetos que impidan la inserción de la cámara.

El monitor de flujo de radón se inserta mediante la zona del anillo de acero en la superficie del suelo a medir. La inserción debe hacerse presionando fuertemente para asegurar el completo contacto entre el suelo y el collar de acero.

Una vez introducido el RFM en el suelo, se extrae el electrete de prueba y se tapa de forma hermética para su posterior reutilización. Este electrete de prueba sirve para evitar que el polvo y demás restos penetren en el RFM.

Mediante el SPER-1 se mide el voltaje del electrete real de medida antes y después de cada periodo de análisis de exhalación de radón.

Para cada una de las pruebas previas a las mediciones, así como para las mediciones en las distintas ubicaciones, se cumplimentará una tabla como la que se muestra en la Tabla 9:

**Tabla 9. Cuadro resumen mediciones cámara H conectada a un electrete**

| Número de Prueba              |             |          |                     |                   |                             |
|-------------------------------|-------------|----------|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| Fecha                         | Hora inicio | Hora fin | Voltaje inicial (V) | Voltaje final (V) | Fondo ( $\mu\text{Sv/hr}$ ) |
|                               |             |          |                     |                   |                             |
| Número de serie del electrete |             |          |                     |                   |                             |

### Recuperación de los datos

Una vez hayan transcurrido entre 6 y 8 horas, preferiblemente 8, se retira el RFM de la tierra. Se desenrosca el electrete del monitor RFM y se enrosca en su "tapa". El electrete real de medida será sustituido por el de prueba para la cámara libre de impurezas.

Para evitar cualquier interferencia en la medida del voltaje del electrete, es importante no tocar la superficie del mismo.

Por último, se anotará la hora de finalización de la medida y se volverá a medir el voltaje del electrete mediante el SPER-1 Reader. El proveedor del monitor de flujo E-PERM ha aportado una hoja de cálculo Excel que calcula la concentración de radón expresada en  $\text{Bq/m}^3$  (ver Tabla 11) y posteriormente, a partir de dicho valor de concentración, calcula la tasa de exhalación (ver Tabla 11).

**Tabla 10. Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la concentración de gas radón (E-PERM Manual, 2015)**

| Electret |        |       |     |     |              |          |            |          |          |  |
|----------|--------|-------|-----|-----|--------------|----------|------------|----------|----------|--|
| Type     | S/N    | Hours | IV  | FV  | Gamma urem/h | CF       | Gamma uR/h | Rn pCi/L | Rn Bq/m3 |  |
| ST       | SAA123 | 8     | 367 | 293 | 6.1          | 8.71209  | 7          | 24.99183 | 924.6977 |  |
| ST       | SAA124 | 6     | 709 | 624 | 6.1          | 10.15668 | 7          | 32.98549 | 1220.463 |  |

**Tabla 11. Hoja de cálculo dada por el fabricante para la medición de la tasa de exhalación de gas radón (E-PERM Manual, 2015)**

|  | Bq/m3 | Decay constant | Hours | Bq/m2/day | Bq/m2/h | pCi/m2/h |
|--|-------|----------------|-------|-----------|---------|----------|
|  | 925   | 0.1814         | 8     | 288.0     | 12.00   | 323.9756 |
|  | 1220  | 0.1814         | 6     | 504.3     | 21.01   | 567.2922 |

En esta tabla se introducirán los valores del voltaje inicial y final (IV, FV), el tiempo de exposición (en horas) y la radiación de fondo medida (Gamma uR/hr). Los demás valores, están condicionados por el fabricante.

En la Tabla 12 se recoge, a modo de resumen, el procedimiento diario seguido en la medición de exhalación de radón mediante la cámara de emisión superficial:

**Tabla 12. Cuadro resumen: mediciones mediante cámara H conectada a un electrete**

| <b>Día</b> | <b>Instrumento de medición</b>     | <b>Medida</b> | <b>Procedimiento</b>   | <b>Duración total aproximada</b> |
|------------|------------------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| 1          | Cámara H conectada a electretes ST | Medida 1      | <b>Selección electretes</b>  | Entre 6 y 8 horas                |
|            |                                    |               | Duración aprox: 5 min  |                                  |
|            |                                    |               | Objetivo: medir el voltaje de diversos electretes para seleccionar uno de ellos                            |                                  |
|            |                                    |               | <b>Captación y medida</b>  |                                  |
|            |                                    |               | Duración: entre 6 y 8 horas  |                                  |
|            |                                    |               | Objetivo: medición de la concentración de radón exhalado a partir de la descarga del voltaje del electrete |                                  |

## 6.5. Cánister de carbón activado medido con un detector de centelleo de yoduro sódico

### 6.5.1. Descripción de la técnica

Los cánister de carbón activo se utilizan para medir la concentración de gas radón en el aire en viviendas o espacios abiertos. La captación de radón se basa en la adsorción pasiva del mismo en la superficie de los gránulos de carbón. Esta técnica proporciona resultados fiables en pocos días (3 días normalmente).

Para el caso de la ejecución del TFM, el cánister se ha cubierto con un recipiente de alta densidad no permeable al radón, para conseguir la acumulación en su interior durante el periodo determinado. La adsorción de radón se ve afectada tanto por la humedad como por la temperatura. Cuanto menor sea la humedad, mayor será el radón adsorbido en el carbón activado. De esta forma, el factor de calibración dependerá de la humedad y de la duración de la exposición al gas.

El cánister se analiza por espectrometría gamma, mediante la utilización de un detector de centelleo. El detector de centelleo está formado por una sustancia luminiscente, capaz de absorber la energía de la radiación y emitirla en forma de fotones y un fotomultiplicador, que transforma la señal luminosa en una señal eléctrica.

El esquema del detector se muestra en la Figura 41:

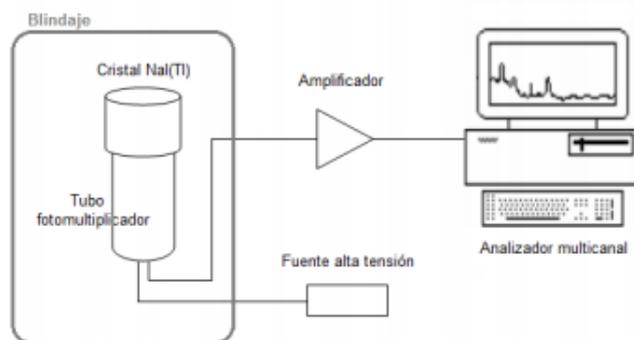


Figura 41. Esquema del detector de centelleo (Fuente,2016)

La concentración de gas radón se determina a partir de sus descendientes, el  $^{214}\text{Pb}$  y el  $^{214}\text{Bi}$ , cuyos picos gammas a 242, 294, 352 y 609 keV se obtienen colocando el recipiente sellado encima del detector de NaI. El espectro resultante se muestra en la Figura 42:

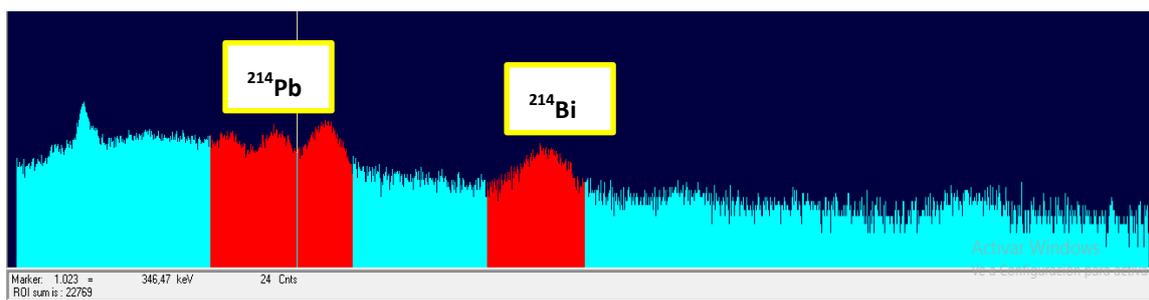


Figura 42. Espectro gamma (Software GammaVision)

Debido a de la superposición de los tres picos de baja energía, sólo son necesarias dos regiones de interés (ROI): desde 220 hasta 396 keV y desde 565 hasta 655 keV, aproximadamente.

### 6.5.2. Puesta a punto del cánister de carbón activo

#### Protocolo de medida

Siguiendo el estudio *Level of Radon Exhalation Rate from Soil in Some Sedimentary and Granite Areas in China* (Wang et al., 2009) se ha diseñado un dispositivo para la medición de la exhalación del radón como se muestra en la Figura 43:



Figura 43. Cánister de carbón activo y recipiente impermeable al radón

El dispositivo consiste en un recipiente de plástico de alta densidad con un diámetro de 12 cm de diámetro y 10 cm de altura. En el interior del recipiente de plástico, justo en el centro, se ha colocado un cánister, un contenedor de carbón que absorbe el gas de exhalación.

El cánister deberá pesarse en una báscula científica y se anotará su masa inicial. Cualquier cambio en el peso del cánister está asociado a la humedad adsorbida.

Para la medición de la exhalación de radón en las distintas ubicaciones, se elegirá también un día cuyas condiciones meteorológicas sean fácilmente imitables para posteriores medidas. La localización exacta de las medidas deberá estar libre de vegetación y residuos.

El cánister se situará sobre la superficie terrestre y se destapará quedando el carbón activo expuesto al aire tal y como se muestra en la Figura 44:



**Figura 44. Cánister de carbón activo expuesto al aire**

Inmediatamente después de ubicar el cánister, éste se cubrirá con un recipiente de PVC que permitirá la acumulación del radón exhalado por la superficie. El recipiente con el cánister en su interior se dejará midiendo durante 3 días.

Al tercer día, se procederá a la recogida del cánister y al sellado del mismo nada más se retire el recipiente que lo contiene. Una vez sellado, los descendientes del radón decaen con una vida media de 3,8 días por lo que para tener en cuenta las variaciones en la cantidad de decaimiento entre exposición y el momento de medida, las cuentas observadas son corregidas teniendo en cuenta el momento final de exposición.

#### **Recuperación de los datos**

El cánister una vez sellado se llevará al laboratorio del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear donde se medirá y se anotará de nuevo su masa, cuyo aumento es debido a la humedad adsorbida. Posteriormente, y sin que hayan transcurrido más de tres horas desde su recogida en el punto de medición, se introducirá el cánister en el detector de centello.

Mediante el software GammaVision, se configurarán las dos regiones de interés (ROI), 220-395 keV y 565-655 keV, aproximadamente. Se colocará un cánister sellado y que no haya sido expuesto a radiación en el detector para realizar un recuento de fondo de 15 minutos y se registrarán los resultados en una hoja de cálculo. El procedimiento se repetirá pero esta vez con el cánister expuesto a radiación durante 1000 segundos.

Se calcula la tasa neta de cuentas ( $N$ ) para el recipiente expuesto como la diferencia entre la tasa de fondo del cánister sin exponer y la tasa bruta de cuentas del cánister expuesto a radiación. La tasa neta inicial de cuentas viene dada por la Ec. 15:

$$N_0 = \frac{N}{e^{-\lambda t}} \quad \text{Ec. 15}$$

Siendo:

$N_0$ : tasa neta inicial de cuentas (cps)

$N$ : tasa neta final de cuentas (cps)

$t$ : tiempo transcurrido entre el final de la exposición y el momento de medida.

$\lambda$ : constante de semidesintegración (tiempo<sup>-1</sup>) según la Ec. 16:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{3,8 \text{ días}} \quad \text{Ec. 16}$$

La concentración media de radón medida se puede expresar según la Ec. 17:

$$C_{Rn} = \frac{N_0 - N_{fondo}}{E_f \cdot C_f} \cdot 1000 \quad \text{Ec. 17}$$

Siendo:

$C_{Rn}$ : Concentración media de radón en el aire (Bq/m<sup>3</sup>)

$E_f$ : Eficiencia del detector

$C_f$ : Factor de calibración que relaciona el volumen en función del tiempo de exposición y la masa de agua absorbida

La eficiencia del detector de NaI se determina por la medición del espectro gamma de un cánister de referencia según la Ec. 18:

$$E_f = \frac{ROI}{Actividad (Bq) \cdot tiempo medida (s)} \quad \text{Ec. 18}$$

El factor de calibración  $C_f$  se obtiene a partir de la siguiente Tabla 13 en función del tiempo de exposición de la muestra.

Tabla 13. Factor de calibración

**Ci VOLUMEN EFECTIVO MUESTREADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN Y ABSORCIÓN DE AGUA**

| Agua absorbida<br>(g) | Volumen efectivo muestreado (L) en función del tiempo de exposición y absorción de agua |        |        |
|-----------------------|---|--------|--------|
|                       | 1 día   | 2 días | 3 días |
| 0.500                 | 144   | 216    | 259    |
| 0.700                 | 143   | 213    | 255    |
| 1.000                 | 142   | 210    | 251    |
| 1.500                 | 140   | 204    | 246    |
| 1.700                 | 138   | 202    | 242    |
| 2.000                 | 137   | 199    | 238    |
| 2.500                 | 135   | 196    | 233    |
| 3.000                 | 132   | 190    | 229    |
| 3.500                 | 131   | 187    | 225    |
| 4.000                 | 130   | 184    | 220    |
| 4.500                 | 127   | 181    | 216    |
| 5.000                 | 125   | 179    | 207    |
| 6.000                 | 121   | 167    | 199    |
| 7.000                 | 118   | 161    | 190    |
| 8.000                 | 114   | 153    | 181    |
| 9.000                 | 109   | 144    | 173    |
| 10.000                | 105   | 135    | 164    |
| 11.000                | 101   | 127    | 156    |
| 12.000                | 096   | 121    | 151    |

En la Tabla 14 se recoge el procedimiento seguido en las mediciones realizadas mediante el cánister de carbón activo:

Tabla 14. Cuadro resumen: mediciones mediante cánister de carbón activo

| Día  | Instrumento de medición   | Medida   | Procedimiento  | Duración total aproximada   |
|--|---------------------------|----------|--|---|
| 1  | Cánister de carbón activo | Medida 1 | <b>Secado cánister</b>   | 3 días de captación y 30 min de cálculo de concentración por espectrometría gamma |
|  |                           |          | Duración: 8 horas  |   |
|  |                           |          | Objetivo: eliminar la humedad del cánister a partir de su secado en estufa                             |   |
|  |                           |          | <b>Captación</b>   |   |
|  |                           |          | Duración: 3 días   |   |
|  |                           |          | Objetivo: medir la concentración de gas radón exhalado acumulado en la cámara que contiene al canister |   |
|  |                           |          | <b>Medida</b>  |   |
|  |                           |          | Duración: 3 horas espera decaimiento + 600 segundos medición software <i>GammaVision</i>               |   |
| Objetivo: una vez transcurridas 3 horas desde que se retira el cánister del lugar de medición, se calculará la concentración de radón exhalado mediante espectrometría gamma |                           |          |  |   |

## 6.6. Consideraciones importantes a tener en cuenta

Durante el proceso de puesta a punto, se observaron pequeñas mejoras que se introdujeron a lo largo de las mediciones de campo. Para cada una de las técnicas, las consideraciones a tener en cuenta son:

### • *Sonda de gas de suelo*

La sonda de gas de suelo debe introducirse de forma totalmente recta y vertical para evitar crear un agujero mayor que su diámetro por donde pueda emigrar el radón.

Debe introducirse a la mayor profundidad posible, alrededor de unos 26 cm.

Después de cada una de las mediciones, conviene limpiar los pequeños orificios por donde se captura el aire que contiene radón. De esta forma se evitan posibles taponamientos y se mejora el rendimiento de la sonda.

### • *Cámara de emisión superficial*

La cámara debe colocarse lo más horizontal posible. La fina lámina de cuchilla debe insertarse de forma completa en el suelo.

Se debe procurar la hermeticidad del circuito. Cualquier posible incorporación de aire al sistema de la cámara puede alterar los resultados de las mediciones de radón.

La purga previa al inicio de las mediciones mediante la cámara de emisión superficial debe hacerse de forma rigurosa. Cuanto más bajo sea el nivel de humedad inicial, mejores resultados se obtendrán.

### • *Cámara H conectada a un electrete*

Debe estar bien insertada en la superficie terrestre. Durante todo el proceso de medición no debe tocarse.

La conexión y desconexión del electrete a la cámara debe hacerse con la mayor rapidez posible para evitar que se descargue con partículas del aire.

El RFM se puede cubrir con un bol de acero inoxidable que protegería el dispositivo ante precipitaciones, calor, aire o partículas de arena.

### • *Cánister de carbón activo en el interior de una cámara*

La cámara o depósito que cubre el cánister debe estar bien introducido en la superficie terrestre para conseguir simular una cámara hermética.

## 6.7. Programación de las mediciones

Este apartado surge a partir de la puesta a punto de las técnicas de medición de radón. Al haber identificado los tiempos de medida requeridos para cada una de ellas, y los condicionantes para llevar a cabo las mismas se hizo necesaria la realización de una programación diaria que permitiese la optimización de los tiempos empleados.

Los instrumentos de medida utilizados en los tres escenarios propuestos (fondo, concentraciones medias y altas concentraciones) fueron los mismos. Dos de los instrumentos de medida (cámara superficial y sonda de gas) se conectan al mismo monitor RAD7 por lo que las mediciones no se pueden realizar de forma simultánea. La cámara H conectada a un electrete requiere de tiempos de medición de entre 6 y 8 horas, mientras que el cánister, estará midiendo durante 3 días (más el tiempo de medición de las cuentas en el detector de NaI).

Debido a las diferencias en las duraciones de cada metodología empleada, fue necesario crear un plan de actuación que sirviera como planificación temporal en cada uno de los escenarios arriba mencionados. La planificación temporal diaria de las mediciones se detalla en la Tabla 15.

**Tabla 15. Planificación temporal diaria de las mediciones**

| <b>Planificación diaria de las mediciones realizadas</b> |   |  |
|--|---|--|
| <b>08:30-09:30</b>                                       | Inicio medición con cámara H conectada a un electrete           | Medida 1                                 |
| <b>09:30-10:30</b>                                       | Medición con la sonda de gas de suelo conectada al monitor RAD7 | Medida punto 1                           |
| <b>10:30-11:30</b>                                       |   | Medida punto 2                           |
| <b>11:30-12:30</b>                                       |   | Medida punto 3                           |
| <b>12:30-13:30</b>                                       |   | Medida punto 4                           |
| <b>13:30-14:30</b>                                       |   | Medida punto 5                           |
| <b>14:30-15:00</b>                                       |   | Retirar cámara H y preparar monitor RAD7 |
| <b>15:00-18:00</b>                                       | Mediciones con cámara superficial conectada al monitor RAD7     | Medida 1                                 |
| <b>18:00</b>   | Inicio mediciones con cánister. Se retirará 3 días después      | Medida 1                                 |

### 6.7.1. Programación de medidas de alta concentración

Las medidas en el escenario de alta concentración de gas radón se realizaron, al igual que las mediciones del nivel de fondo y de concentraciones medias, siguiendo de nuevo los procedimientos y tiempos de duración de las metodologías mostrada en la Tabla 15. Con esto se busca optimizar los tiempos y mejorar la eficacia a la hora de realizar las mediciones.

Las medidas de concentraciones altas de radón se realizaron en la Marjal de Peñíscola, Castellón. Por otros estudios, se conocía que en la zona existían diversos puntos cuyas concentraciones de radón alcanzaban niveles alrededor de 10.000 Bq/m<sup>3</sup>. De esta forma, se decidió que podría ser una buena ubicación para comprobar el funcionamiento de los diversos instrumentos de medición en condiciones variables. Esto suponía que las condiciones climatológicas como la humedad, el viento, o la temperatura variarían en cada una de las mediciones.

El tipo de suelo en una marjal está compuesto por zonas muy húmedas, en las proximidades del río y de las balsas de agua, y por zonas muy secas y áridas en los puntos más alejados. Como se ha detallado en el apartado de selección de las técnicas, es muy importante realizar las mediciones en lugares libres de rocas, vegetación, etc., por lo que conocer la mejor ubicación para realizar las mediciones era el primer paso a seguir.

Además, y debido a la elevada dispersión que presenta el gas radón, durante las primeras semanas se realizaron medidas usando la sonda de gas de suelo en diferentes puntos de la Marjal. Esto permitía aproximar los puntos en los que había mayores concentraciones de radón.

Una vez localizados los puntos que presentaban mayores niveles de concentración de gas radón, se realizaron las mediciones oportunas. En este caso, la organización temporal se vio ligeramente alterada: las mediciones solían empezar y acabar más tarde de lo habitual a causa del desplazamiento Valencia-Peñíscola. Debido a los 147 km que separan la UPV con la localidad castellanense, se procuraba hacer las mediciones en días consecutivos, llegando a pernoctar en la ciudad para así poder optimizar el tiempo y las escasas horas de sol y luz durante el periodo invernal.

En la Tabla 16 se muestra la organización llevada a cabo durante el periodo de mediciones en la Marjal de Peñíscola.

Tabla 16. Organización temporal de las mediciones realizadas en Peñíscola

|             | LUNES  | MARTES  | JUEVES  | VIERNES  | LUNES   |  |  |  |  |  |
|-------------|--|---|---|--|---|--|--|--|--|--|
| 08:00-09:00 | <b>Llegada a Peñíscola desde la UPV y puesta a punto de la instrumentación</b> |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 09:00-10:00 | <b>Sonda de gas de suelo conectada a monitor RAD7 (zona 1)</b>                 | <b>Cámara H conectada a electrete (zona 1)</b>                      | <b>Sonda de gas de suelo conectada a monitor RAD7 (zona 2)</b>      | <b>Cámara H conectada a electrete (zona2)</b>                          | <b>Sonda de gas de suelo conectada a monitor RAD7 (zona 3)</b>      | <b>Cámara H conectada a electrete (zona 3)</b> | <b>Sonda de gas de suelo conectada a monitor RAD7 (zona 4)</b> | <b>Cámara H conectada a electrete (zona 4)</b> | <b>Sonda de gas de suelo conectada a monitor RAD7 (zona 5)</b> | <b>Cámara H conectada a electrete (zona 5)</b> |
| 10:00-11:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 11:00-12:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 12:00-13:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 13:00-14:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 14:00-15:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 15:00-16:00 | <b>Limpieza instrument.</b>  | <b>Limpieza instrument.</b>   | <b>Limpieza instrument.</b>   | <b>Limpieza instrument.</b>  | <b>Limpieza instrument.</b>   |  |  |  |  |  |
| 16:00-16:30 | <b>Cámara emisión superficial conectada a monitor RAD7 (zona 1)</b>            | <b>Cámara emisión superficial conectada a monitor RAD7 (zona 2)</b> | <b>Cámara emisión superficial conectada a monitor RAD7 (zona 3)</b> | <b>Cámara emisión superficial conectada a monitor RAD7 (zona 4)</b>    | <b>Cámara emisión superficial conectada a monitor RAD7 (zona 5)</b> |  |  |  |  |  |
| 16:00-17:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
| 17:00-18:00 |  |   |   |  |   |  |  |  |  |  |
|             |  | <b>Inicio medición cánister 1 y 2</b>                               |   | <b>Inicio medición cánister 3 y 4 y retirada de los cánister 1 y 2</b> | <b>Retirada cánister 3 y 4</b>                                      |  |  |  |  |  |
| 18:00-19:00 | <b>Limpieza, recogida y vuelta a la UPV</b>                                    |   |   |  |   |  |  |  |  |  |

## **FASE 2: Análisis de los resultados**

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en las mediciones de la concentración de radón emanado y exhalado en los tres escenarios propuestos: fondo, concentraciones medias y altas concentraciones.

Para ello se van a presentar por una parte los resultados obtenidos en función de cada una de las técnicas, para poder comparar cada uno de los escenarios frente a una misma técnica. A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos en función de la localización para poder comparar así el funcionamiento de las técnicas en un mismo escenario y frente a las mismas condiciones.

Para el caso de la sonda de gas de suelo, se ha obtenido la concentración de radón emanado en  $\text{Bq/m}^3$ . Para la cámara de emisión superficial, la cámara H conectada a un electrete y el cánister de carbón activo se ha obtenido también la concentración de radón exhalado, a partir de la cual se ha calculado la tasa de exhalación de radón ( $\text{Bq/m}^2/\text{s}$ ).

### **6.9. Resultados obtenidos según la técnica seleccionada**

En los siguientes subapartados se muestran los resultados obtenidos para la sonda de gas de suelo, la cámara de emisión superficial, la cámara H conectada a un electrete y el cánister de carbón activo cubierto con una cámara impermeable al radón.

#### **6.9.1. Sonda de gas de suelo conectada al monitor de detección RAD7**

Para la sonda de gas de suelo, los resultados con los que se va a trabajar son aquellos obtenidos directamente del monitor de detección RAD7, es decir, la concentración de radón emanado en  $\text{Bq/m}^3$ .

Inicialmente se han representado todas las mediciones válidas realizadas durante la ejecución del presente TFM. Algunos valores se han tenido que descartar por ser erróneos en el rango de concentración esperado.

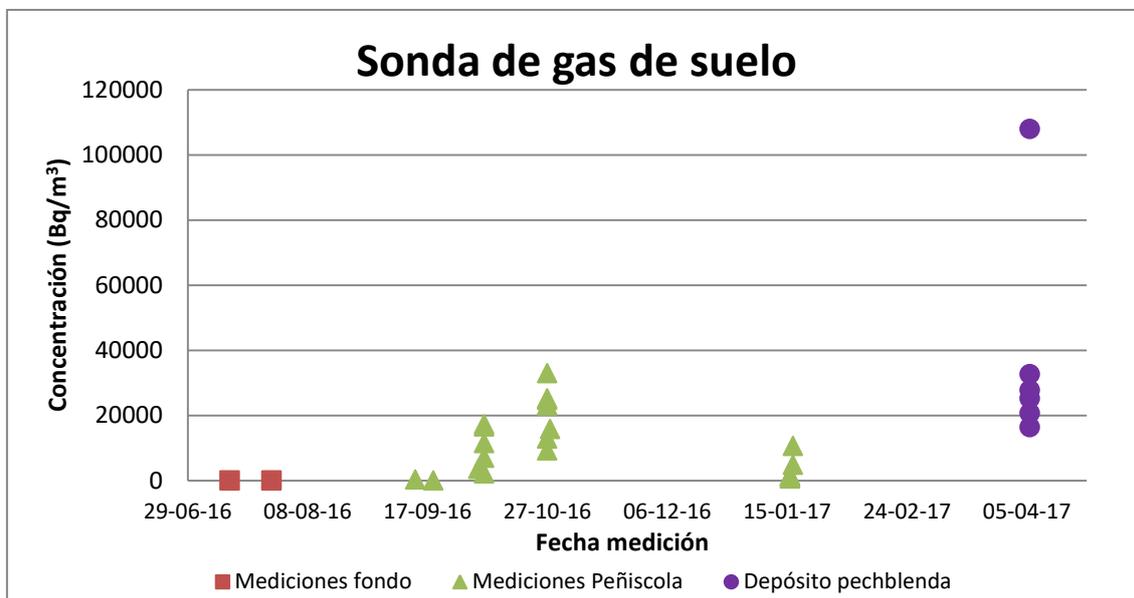
En la Tabla 17 se muestran todos los valores obtenidos en las mediciones de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo.

**Tabla 17: Resultados obtenidos en la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo**

| Mediciones de fondo      |                              | Mediciones Peñíscola     |                              | Mediciones depósito con piedra Pechblenda |                              |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
| <i>Fecha de medición</i> | <i>Concentración (Bq/m3)</i> | <i>Fecha de medición</i> | <i>Concentración (Bq/m3)</i> | <i>Fecha de medición</i>                  | <i>Concentración (Bq/m3)</i> |
| 13/07/2016               | 43.4 ± 3                     | 13/09/2016               | 394 ± 200                    | 06/04/2017                                | 108000 ± 2200                |
| 27/07/2016               | 69.6 ± 8                     | 19/09/2016               | 90.5 ± 90                    | 06/04/2017                                | 32700 ± 1200                 |
| 21/03/2016               | 134 ± 70                     | 04/10/2016               | 3570 ± 570                   | 06/04/2017                                | 27800 ± 1100                 |
| 21/03/2016               | 116 ± 89                     | 06/10/2016               | 7000 ± 800                   | 06/04/2017                                | 25200 ± 1000                 |
| 21/03/2016               | 178 ± 129                    | 06/10/2016               | 16600 ± 1200                 | 06/04/2017                                | 20700 900                    |
| 21/03/2016               | 269 ± 199                    | 06/10/2016               | 2260 ± 430                   | 06/04/2017                                | 16400 ± 800                  |
| 21/03/2016               | 150 ± 80                     | 06/10/2016               | 17300 ± 1200                 |   |                              |
| 21/03/2016               | 258 ± 100                    | 06/10/2016               | 11500 ± 1000                 |   |                              |
| 28/03/2016               | 50 ± 50                      | 27/10/2016               | 23100 ± 1500                 |   |                              |
| 28/03/2016               | 67.5 ± 51                    | 27/10/2016               | 12900 ± 1000                 |   |                              |
| 28/03/2016               | 201 ± 90                     | 27/10/2016               | 24800 ± 1500                 |   |                              |
| 28/03/2016               | 58 ± 47                      | 27/10/2016               | 9240 ± 900                   |   |                              |
| 28/03/2016               | 9.56 ± 19                    | 27/10/2016               | 33000 ± 1700                 |   |                              |
| 28/03/2016               | 19.2 ± 27                    | 27/10/2016               | 25200 ± 1500                 |   |                              |
| 30/03/2016               | 9.94 ± 2                     | 28/10/2016               | 15800 ± 1200                 |   |                              |
| 30/03/2016               | 58.1 ± 47                    | 16/01/2017               | 1540 ± 350                   |   |                              |
| 30/03/2016               | 87.5 ± 58                    | 16/01/2017               | 1380 ± 330                   |   |                              |
| 30/03/2016               | 85.8 ± 18                    | 16/01/2017               | 1150 ± 300                   |   |                              |
| 30/03/2016               | 18.8 ± 27                    | 16/01/2017               | 669 ± 230                    |   |                              |
| 30/03/2016               | 9.28 ± 19                    | 16/01/2017               | 1280 ± 320                   |   |                              |
|                          |                              | 16/01/2017               | 872 ± 260                    |   |                              |
|                          |                              | 17/01/2017               | 4860 ± 600                   |   |                              |
|                          |                              | 17/01/2017               | 10600 ± 900                  |   |                              |

*\*En todos los resultados se han incluido el valor de incertidumbre obtenido mediante el monitor de detección de radón RAD7.*

Los resultados obtenidos de concentración para la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo se han representado en la Figura 45.



**Figura 45. Resultados obtenidos en la medición de radón emanado mediante la sonda de gas de suelo para los tres escenarios propuestos**

Como se observa en la Figura 45, las mediciones de fondo presentan los resultados esperados según el mapa MARNA de la provincia de València. En ninguna de las muestras de radón emanado las concentraciones superan los 150 Bq/m<sup>3</sup> correspondientes a la Categoría 0. Estos resultados hacen pensar que la sonda de gas de suelo funciona correctamente para bajas concentraciones de radón emanado.

Las mediciones realizadas en la localidad de Peñíscola presentan resultados dispares. En todos los casos, excepto en una de las mediciones, no se superan los valores de concentración de la Categoría 0 según el mapa MARNA. En el resto de mediciones realizadas las concentraciones de radón son muy superiores, llegando a alcanzar los 33000 Bq/m<sup>3</sup>.

Para las mediciones realizadas en el depósito que contenía la piedra pechblenda, los niveles de concentración de radón son muy superiores a las mediciones fondo y similares a los valores obtenidos en Peñíscola. Cabe destacar que la sonda de gas de suelo se debe insertar alrededor de 26 cm, poniéndola casi en contacto directo con la piedra pechblenda, generándose así un escenario ficticio creado únicamente para la ejecución de este TFM, cuyos resultados de concentración no se pueden comparar con el mapa MARNA, pero sí pueden utilizarse para el objetivo del TFM de conocer la reproducibilidad de las técnicas. Existe un dato anómalo de 108000 Bq/m<sup>3</sup> que se puede asociar a la inserción excesiva de la sonda de gas de suelo en el depósito (podrían estar casi en contacto).

### 6.9.2. Cámara de emisión superficial conectada al monitor de detección RAD7

Mediante la cámara de emisión superficial se ha medido los valores de concentración de radón exhalado a la superficie ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Tal y como se ha detallado en la puesta a punto de este dispositivo de medición, la cámara permite la acumulación de gas en su interior. Esta acumulación creciente de la concentración permite obtener una pendiente a partir de la cual se obtendrá la tasa de exhalación de radón en  $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$  según la ecuación:

$$\phi = pte \cdot \frac{V}{S}$$

Recordar, que según normativa (ISO-FDIS, 2012) los valores de tasa de exhalación oscilan entre:

$$\text{Tasa exhalación} \equiv \left[ 3.6 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2} \sim 360 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2} \right] \frac{1}{\text{s}}$$

La pendiente de la recta para obtener la tasa de exhalación se ha obtenido según se muestra, a modo de ejemplo, en la Figura 46:

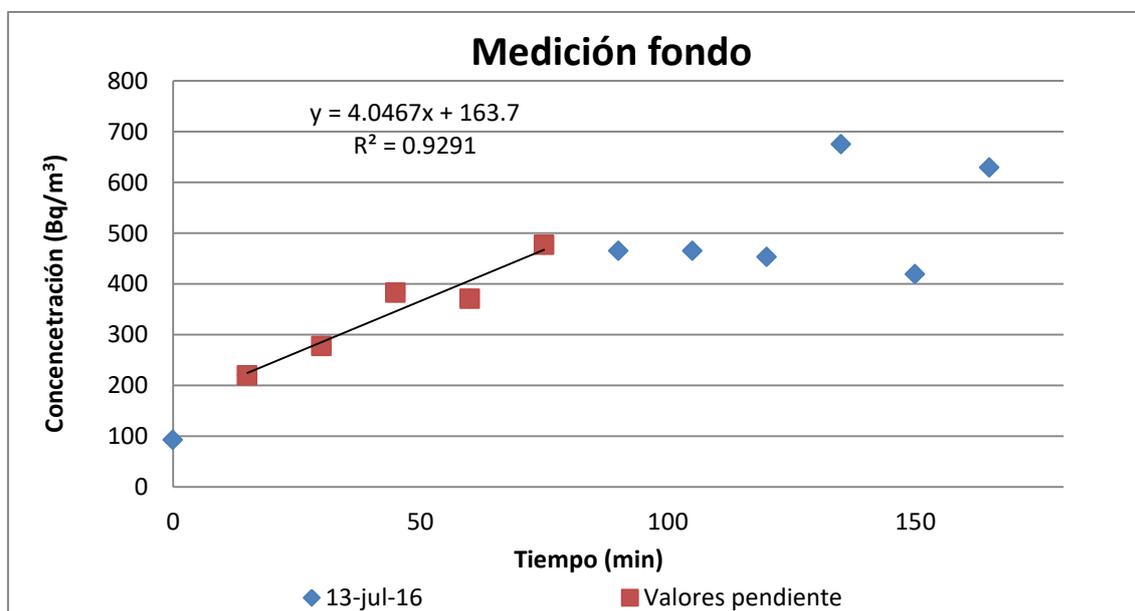


Figura 46. Ejemplo de obtención de la pendiente para la medición de fondo

Para la tasa de exhalación obtenida en Peñíscola y para el depósito que contiene la piedra pechblenda, el procedimiento realizado es el mismo.

Como ejemplo, se muestra también un ejemplo de los valores obtenidos en el depósito del laboratorio de la UPV, en la Figura 47:

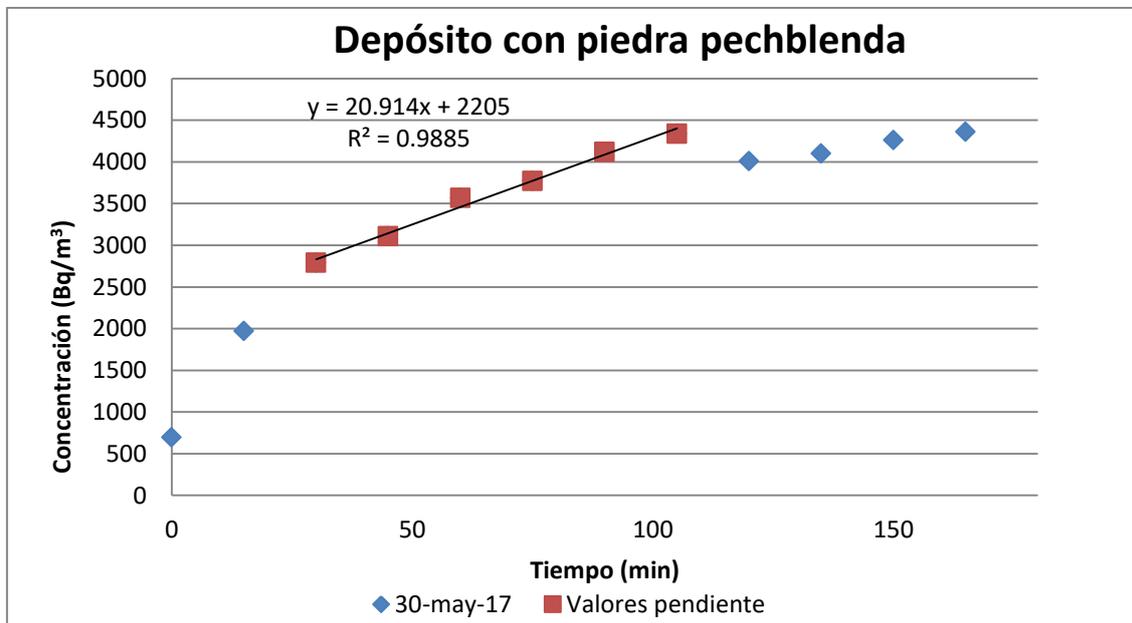


Figura 47. Ejemplo de obtención de la pendiente para el depósito que contiene una piedra pechblenda

Las dimensiones de la cámara de emisión superficial se emplean para el cálculo de la tasa de exhalación y se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18: Dimensiones de la cámara de emisión superficial

|                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| Diámetro (cm)                      | 21.6                  |
| Profundidad (cm)                   | 1.8                   |
| Volumen cilindro(cm <sup>3</sup> ) | 659.5836              |
| *Volumen final (cm <sup>3</sup> )  | 606.2336              |
| Volumen (m <sup>3</sup> )          | $6.062 \cdot 10^{-4}$ |
| Superficie (m <sup>2</sup> )       | $3.66 \cdot 10^{-2}$  |

*\*Para el cálculo del volumen final se ha restado una barra rectangular que hay en el interior de la cámara al volumen del cilindro que simula la cámara.*

En la Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 se muestran todos los valores de las mediciones realizadas mediante la cámara de emisión superficial para los tres escenarios planteados.

**Tabla 19. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo exhalado mediante la cámara de emisión superficial**

| <b>Mediciones de fondo</b> |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Fecha medición</b>      | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 13/07/2016                 | 410.65 ± 161.65                         | 4.370436 ± 0.0141                           |
| 27/07/2016                 | 430.85 ± 167.55                         | 3.34584 ± 0.01208                           |
| 21/03/2017                 | 56.71 ± 83.23                           | 0.499716 ± 0.00491                          |
| 28/03/2017                 | 133.47 ± 87.86                          | 2.523636 ± 0.0325                           |
| 30/03/2017                 | 40.36 ± 72.37                           | 1.128924 ± 0.00107                          |

**Tabla 20. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola exhalado mediante la cámara de emisión superficial**

| <b>Mediciones en Peñíscola</b> |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| <b>Fecha medición</b>          | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 13/09/2016                     | 190.86 ± 169                            | 1.223964 ± 0.01200                          |
| 16/01/2017                     | 107.41 ± 113                            | 1.871964 ± 0.01200                          |

**Tabla 21. Resultados obtenidos en la medición de radón exhalado en el depósito con una piedra pechblenda mediante la cámara de emisión superficial**

| <b>Mediciones depósito con piedra Pechblenda</b> |   |   |
|--|---|---|
| <b>Fecha</b>                                     | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 06/04/2017                                       | 1492 ± 312.5                            | 10.079964 ± 0.009                           |
| 11/04/2017                                       | 656.2 ± 198.6                           | 16.05636 ± 0.0336                           |
| 30/05/2017                                       | 3424.75 ± 418.25                        | 22.58712 ± 0.0410                           |
| 31/05/2017                                       | 4037.33 ± 418.25                        | 29.73564 ± 0.0234                           |

*\*En todos los resultados se han incluido el valor de incertidumbre obtenido mediante el monitor de detección de radón RAD7.*

Los resultados obtenidos para el cálculo de la tasa de exhalación ( $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ ) mediante la cámara de emisión superficial se representan en la Figura 48:

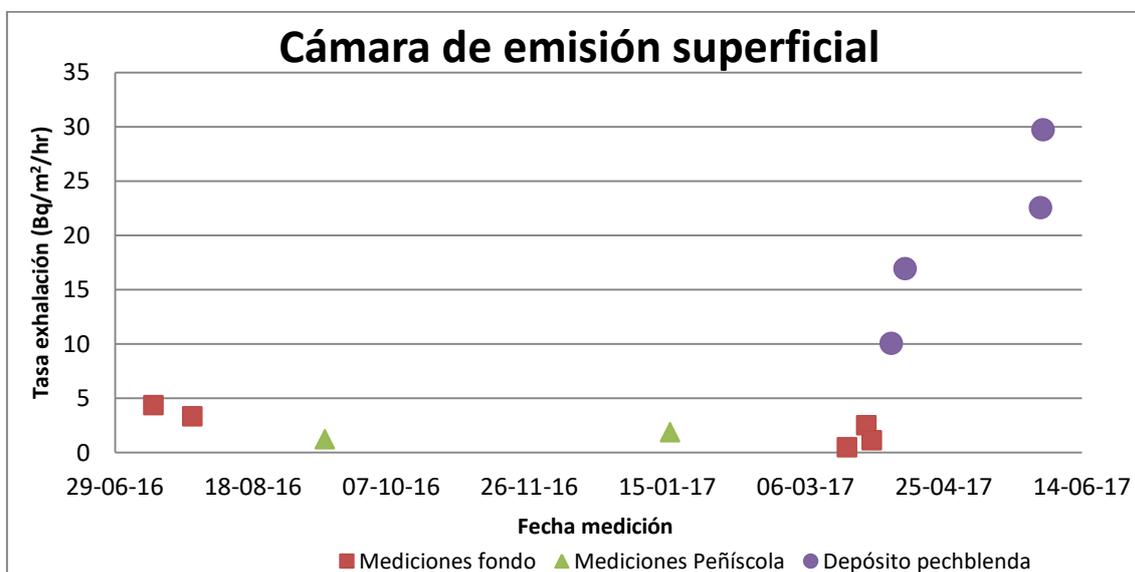


Figura 48. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante la cámara de emisión superficial

Como se observa en la Figura 48, la tasa de exhalación en las mediciones de fondo realizadas no supera los  $5 \text{ Bq}/\text{m}^2/\text{s}$  y por tanto, están en concordancia con el rango de valores dados por la normativa ISO.

Los valores de tasa de exhalación obtenidos a partir de las concentraciones de radón exhalado en Peñíscola, se sitúan en niveles muy bajos, incluso inferiores a las mediciones de fondo realizadas en la UPV. Esto es debido a la dificultad encontrada en las mediciones de campo a causa de las condiciones climatológicas y las características del terreno (suelo húmedo, mucha vegetación, etc.).

Para el caso de las concentraciones de radón y tasa de exhalación en el interior del depósito que contiene la piedra pechblenda, los niveles medidos son muy superiores a los niveles de fondo y Peñíscola. En apartados posteriores se detallarán estos resultados.

Destacar que, aunque la tasa de exhalación obtenida en Peñíscola no ha seguido el crecimiento esperado, la relación entre las mediciones de fondo y el depósito con la pechblenda (sobre todo las dos últimas mediciones) sigue la proporción esperada. Es decir, los valores en el depósito son más de 10 veces (en valor medio) superiores a los valores de tasa de exhalación de fondo.

### 6.9.3. Cámara H conectada a un electrete

Mediante la cámara H conectada a un electrete se han medido los valores de concentración de radón exhalado a la superficie ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Tal y como se ha detallado en la puesta a punto de este dispositivo de medición, la cámara H conectada a un electrete permite la descarga de voltaje a partir de la acumulación de gas en su interior. Esta diferencia de potencial permite obtener la concentración de radón exhalado (según hoja de cálculo del fabricante) a partir de la cual se obtendrá la tasa de exhalación de radón en  $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$  según la Ec. 19:

$$E = \frac{V \cdot \lambda \cdot (C_{Rn} - C_0^{-\lambda \cdot t})}{S \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t))} \quad \text{Ec. 19}$$

Siendo  $V$  el volumen de la cámara (en  $\text{m}^3$ ),  $\lambda'$  la constante de desintegración del radón ( $\text{hr}^{-1}$ ),  $C_{Rn}$  la concentración de radón final ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ),  $C_0$  la concentración inicial de radón ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ),  $S$  la superficie de la cámara ( $\text{m}^2$ ) y  $t$  el tiempo de medición (hr).

El valor de la concentración  $C_{Rn}$  se va a calcular como el doble de la concentración obtenida a partir de la descarga del electrete. Esto se debe a que en la ecuación se utiliza como concentración el valor final, mientras que la obtenida a través de la descargar del electrete, es la concentración media para el tiempo de medición. Según la Ec. 20:

$$C_{Rn} = 2 \cdot C_{Rn} \text{ dada por el fabricante} \quad \text{Ec. 20}$$

Las dimensiones de la cámara H son necesarias para el cálculo de la tasa de exhalación de la Ec. 19 y se muestran en la Tabla 22:

**Tabla 22. Dimensiones de la cámara H**

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Diámetro (m)                   | 0.153                  |
| V semiesfera( $\text{m}^3$ )   | $9.3765 \cdot 10^{-4}$ |
| Superficie ( $\text{m}^2$ )    | $1.8385 \cdot 10^{-2}$ |
| $\lambda$ ( $\text{hr}^{-1}$ ) | $7.6003 \cdot 10^{-3}$ |

En la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 se muestran todos los valores de las mediciones realizadas mediante la cámara H conectada a un electrete para los tres escenarios planteados.

Tabla 23. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo mediante la cámara H conectada a un electrete

| <b>Mediciones de fondo</b> |                                |   |   |
|----------------------------|--------------------------------|---|---|
| <b>Fecha medición</b>      | <b>Tiempo de medición (hr)</b> | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 13/07/2016                 | 8                              | 925 ± 50                                | 12.1559 ± 0.6570                            |
| 21/07/2016                 | 6                              | 1220 ± 50                               | 21.2164 ± 0.8695                            |
| 21/03/2017                 | 6                              | 1057 ± 50                               | 18.3818 ± 0.8695                            |
| 28/03/2017                 | 6                              | 863.68 ± 50                             | 15.0198 ± 0.8695                            |
| 30/03/2017                 | 6                              | 760.91 ± 50                             | 13.2326 ± 0.8695                            |

Tabla 24. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola mediante la cámara H conectada a un electrete

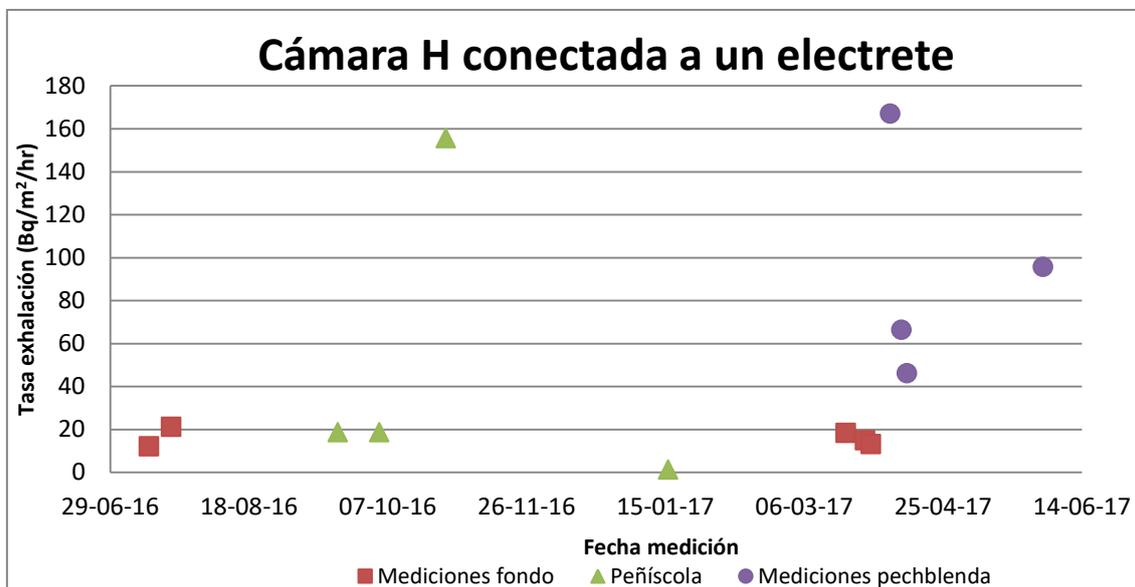
| <b>Mediciones en Peñíscola</b> |                                |   |   |
|--------------------------------|--------------------------------|---|---|
| <b>Fecha medición</b>          | <b>Tiempo de medición (hr)</b> | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 19/09/2016                     | 2.5                            | 454 ± 30                                | 18.6997 ± 1.2356                            |
| 04/10/2016                     | 6                              | 1077 ± 50                               | 18.7296 ± 0.8685                            |
| 28/10/2016                     | 6                              | 8944 ± 300                              | 155.5411 ± 5.2171                           |
| 16/01/2017                     | 6.5                            | 81 ± 5                                  | 1.3027 ± 0.0804                             |

Tabla 25. Resultados obtenidos en la medición de radón en un depósito que contiene una piedra pechblenda mediante la cámara H conectada a un electrete

| <b>Mediciones en depósito con piedra pechblenda</b> |                                |   |   |
|---|--------------------------------|---|---|
| <b>Fecha medición</b>                               | <b>Tiempo de medición (hr)</b> | <b>Concentración (Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tasa exhalación (Bq/m<sup>2</sup>/s)</b> |
| 06/04/2017  | 5                              | 8036.72 ± 300                           | 167.0839 ± 6.2370                           |
| 10/04/2017  | 6                              | 3822.44 ± 150                           | 66.4743 ± 2.6085                            |
| 12/04/2017  | 6                              | 2655 ± 130                              | 46.1719 ± 2.2607                            |
| 31/05/2017  | 6                              | 5504 ± 250                              | 95.7176 ± 4.3476                            |

\*El valor de la incertidumbre se ha obtenido a partir del cálculo de la raíz de la suma cuadrática de tres factores: la incertidumbre dada por el lector de voltaje, la asociada a las dimensiones de la cámara y la asociada a los niveles de fondo

Los resultados obtenidos para el cálculo de la tasa de exhalación ( $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ ) mediante la cámara H conectada a un electrete se muestran en la Figura 49:



**Figura 49. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante la cámara H**

Como se observa en la Figura 49, la tasa de exhalación calculada para los valores de fondo medidos en la UPV están dentro del rango dado por la normativa.

Las mediciones en Peñíscola ofrecen resultados similares a las mediciones de fondo realizadas exceptuando un único valor. Ese día, el punto en el que se realizaron las medidas fue uno de los puntos con mayores niveles de radón encontrados en toda la Marjal de Peñíscola como se detallará en el apartado 6.10.1.

En el depósito que contiene una piedra pechblenda, las concentraciones de radón y la tasa de exhalación calculada presentan valores muy superiores a los niveles de fondo como cabía esperar. En apartados posteriores se detallarán estos resultados.

De la misma manera que en el caso de la cámara superficial, se cumple, exceptuando Peñíscola, la proporción entre los resultados obtenidos a partir de las mediciones de fondo y los resultados obtenidos en la medición del depósito con la pechblenda.

#### .9.4. Cánister de carbón activo

Mediante el cánister de carbón activo introducido en un depósito impermeable al radón, se han medido los valores de concentración de radón exhalado a la superficie ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Tal y como se ha detallado en la puesta a punto de este dispositivo de medición, la cámara en la que se ha introducido el cánister permite la acumulación del radón durante los 3 días de exposición a la radiación. Mediante espectrometría gamma se obtendrán el número de cuentas del cánister para poder calcular la tasa de exhalación ( $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ ) en cada punto de medición según la Ec. 21:

$$E = \frac{V \cdot \lambda \cdot C_{max}}{S_{efectiva}} \quad \text{Ec. 21}$$

Siendo  $V$  el volumen de la cámara que contiene al cánister ( $\text{m}^3$ ),  $\lambda$  la constante de desintegración del radón ( $\text{hr}^{-1}$ ),  $C_{max}$ , la concentración máxima medida y  $S_{especifica}$ , la superficie a través de la cual está exhalando el gas radón ( $\text{m}^2$ ).

Se considera que la  $C_{max}$  es el valor de la última concentración medida, y se calcula a partir del valor de la concentración media  $C_{media}$  (Ec. 17). La concentración máxima es la concentración  $C$  para un tiempo determinado  $t$ , calculada a partir de la Ec. 22:

$$C = \frac{I}{1 - \exp(-\lambda * t)} \quad \text{Ec. 22}$$

Siendo  $I$ , el aporte de concentración ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ).

Como el cánister de carbón activo desorbe al mismo tiempo que adsorbe, la contribución total de la cantidad adsorbida al final del periodo es más importante que la del principio, el tiempo de exposición  $t$  se supone desde la mitad de la exposición hasta el inicio de la medición por espectrometría (Fuente, 2016).

De esta forma para el cálculo de tasa de exhalación mediante el cánister de carbón activo se utiliza finalmente la Ec. 23:

$$E = \frac{V \cdot \lambda \cdot 2 \cdot C_{media}}{S_{efectiva} / 0.24} \quad \text{Ec. 23}$$

La superficie específica se ha obtenido según Ec. 24 y representa el área a través de la cual el radón puede exhalar hacia el exterior.

$$S_{especifica} = S_{cámara} - S_{cánister} \quad \text{Ec. 24}$$

Las dimensiones de la cámara que contiene al cánister resultan necesarias para el cálculo de la tasa de exhalación siguiendo la Ec. 22. Son las que se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Dimensiones de la cámara que contiene al cánister

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Diámetro (m)                  | 0.122                  |
| V recipiente(m <sup>3</sup> ) | 0.001                  |
| Superficie (m <sup>2</sup> )  | 1.168·10 <sup>-2</sup> |

En la Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 29 se muestran todos los valores de las mediciones realizadas mediante la acumulación de radón en el interior de una cámara que contiene un cánister de carbón activo para los tres escenarios planteados.

Tabla 27. Resultados obtenidos en la medición de radón de fondo mediante el cánister de carbón activo

| Mediciones de fondo |                   |                                    |  |
|---------------------|-------------------|------------------------------------|--|
| Fecha medición      | Cuentas Netas (N) | Concentración (Bq/m <sup>3</sup> ) | Tasa exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s) |
| 28/07/2016          | 115               | 16.9493 ± 15.8841                  | 0.3008 ± 0.2819                        |
| 04/04/2017          | 1581              | 152.2782 ± 10.9890                 | 2.7029 ± 0.1950                        |
| 04/04/2017          | 2313              | 199.6705 ± 10.1221                 | 3.5441 ± 0.1796                        |

Tabla 28. Resultados obtenidos en la medición de radón en Peñíscola mediante el cánister de carbón activo

| Mediciones en Peñíscola |                   |                                    |  |
|-------------------------|-------------------|------------------------------------|--|
| Fecha medición          | Cuentas Netas (N) | Concentración (Bq/m <sup>3</sup> ) | Tasa exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s) |
| 06/09/2016              | 2607              | 471.1258 ± 26.0211                 | 8.3623 ± 0.4618                        |
| 07/09/2016              | 1389              | 207.8541 ± 20.5959                 | 3.6893 ± 0.3655                        |
| 14/10/2016              | 9950              | 941.3248 ± 16.1473                 | 16.7082 ± 0.2866                       |

Tabla 29. Resultados obtenidos en la medición de radón en un depósito que contiene una piedra pechblenda mediante la cámara H conectada a un electrete

| Mediciones en depósito con piedra pechblenda |                   |                                    |  |
|--|-------------------|------------------------------------|--|
| Fecha medición                               | Cuentas Netas (N) | Concentración (Bq/m <sup>3</sup> ) | Tasa exhalación (Bq/m <sup>2</sup> /s) |
| 08/04/2017                                   | 14187             | 1190.3537 ± 13.4307                | 21.1284 ± 0.2383                       |
| 08/04/2017                                   | 18076             | 1578.9675 ± 15.0061                | 28.0262 ± 0.26663                      |
| 30/05/2017                                   | 25218             | 1957.8435 ± 14.8637                | 34.7512 ± 0.2638                       |
| 30/05/2017                                   | 23721             | 1965.4971 ± 15.5362                | 34.8870 ± 0.2757                       |

\*La incertidumbre se calcula a partir de la raíz cuadrada del total de cuentas entre las cuentas netas multiplicado por la concentración

Los resultados obtenidos para el cálculo de la tasa de exhalación ( $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ ) mediante el cánister de carbón activo introducido en una cámara se muestran en la Figura 50.

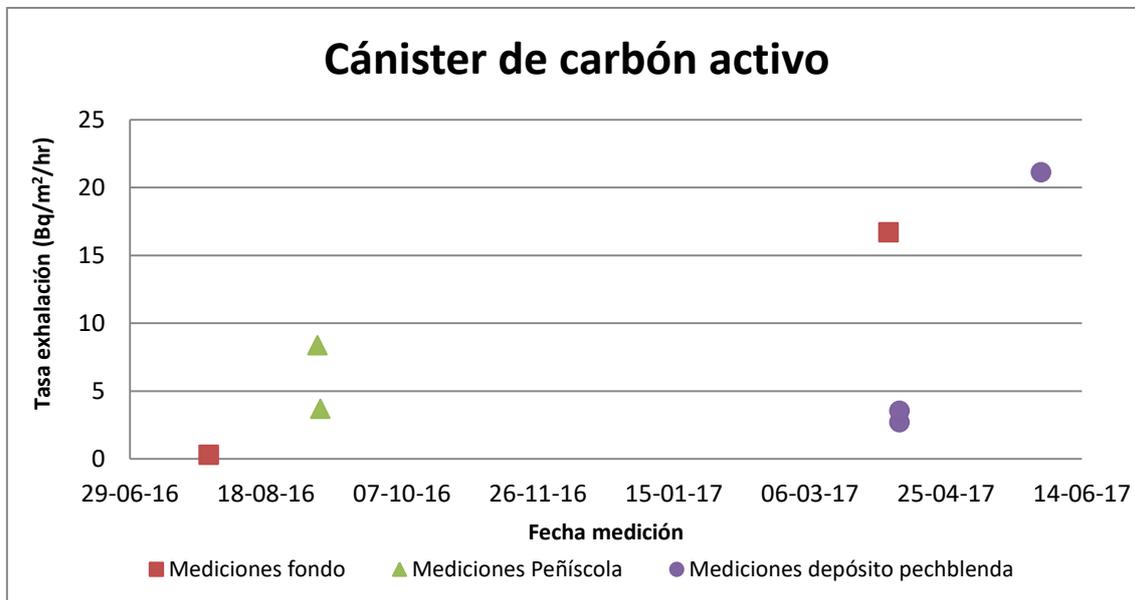


Figura 50. Resultados obtenidos de la medición de radón exhalado mediante el cánister de carbón activo

Tal y como se observa en la Figura 50, los resultados de tasa de exhalación obtenidos para las mediciones de fondo se encuentran en el rango de exhalación dado por la normativa. La media de ambos valores de fondo se sitúa en torno a  $10 \text{ Bq}/\text{m}^2/\text{hr}$ .

Las mediciones realizadas en Peñíscola, muestra resultados que se mantienen en el rango establecido por la norma para escenarios no irradiados. La media de ambas mediciones realizadas en Peñíscola no supera los  $10 \text{ Bq}/\text{m}^2/\text{hr}$ .

En el depósito que contenía la piedra pechblenda, las concentraciones, y por tanto la tasa de exhalación, muestran valores elevados que se aproximan a los esperados.

Las mediciones de radón exhalado mediante la acumulación en la cámara que contiene el cánister, siguen la misma progresión en los valores de los tres escenarios seleccionados.

## 6.10. Resultados obtenidos en función de la ubicación

En este apartado, se van a mostrar los resultados obtenidos para el cálculo de la tasa de exhalación en función de la ubicación seleccionada. En cada uno de los tres escenarios se detallan los valores obtenidos para cada uno de los métodos de medición mediante cámaras de acumulación. De igual forma que en el apartado anterior, las concentraciones medidas mediante la sonda de gas de suelo se muestran de forma separada.

### 6.10.1. Sonda de gas de suelo

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la medición de concentración de radón fondo en los jardines de la UPV. Cada uno de los colores de la gráfica muestra la medición realizada en función del día. El eje de las abscisas aparece numerado, del 1 al 6, la medición realizada en cada uno de los puntos de la estrella de seis puntas creada, tal y como se ha detallado en el apartado 6.2.2. Los valores de concentración de fondo medidos se observan en la Figura 51.

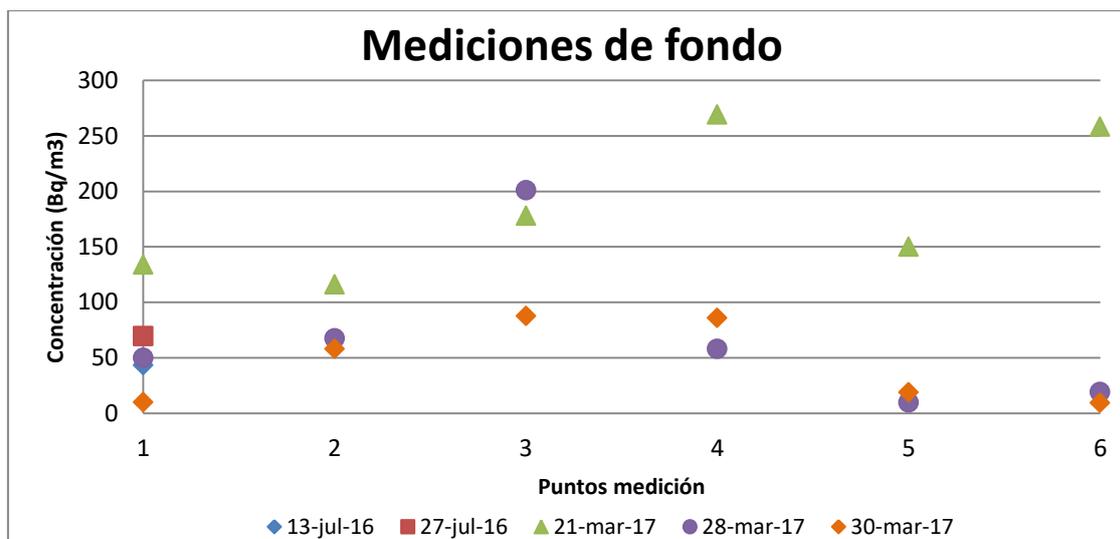


Figura 51. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones de fondo

Como se observa en la Figura 51, las dos primeras tomas de muestra, correspondientes al 13 y 27 de julio de 2016, solo presentan dos mediciones, una por día. Esto es porque durante los primeros días de puesta a punto se estuvo probando cómo se le podría dar una mayor utilidad y rigor a la técnica de medición y posteriormente, como se detallará en el escenario de Peñíscola, se decidió introducir como mejora el dispositivo en forma de estrella. Los días 28 y 30 de marzo, la pendiente seguida por ambas mediciones resulta similar. El 21 de marzo en cambio, los valores obtenidos en la medición de la concentración de radón son superiores.

Esto podría deberse a que el suelo presentaba una mayor humedad y por tanto, era más sencillo introducir la sonda a niveles más profundos sin que condiciones climatológicas, como el aire, afectasen.

Aunque el 21 de marzo las concentraciones de radón eran ligeramente superiores a la del resto de los días, la media de los valores de concentración no supera los límites legislativos ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), que se sitúan en dentro del rango de Categoría 0 del mapa MARNA de la provincia de València.

Para la localidad de Peñíscola, el procedimiento seguido fue similar al realizado para las mediciones de fondo. Debido a la elevada dispersión que presenta el gas radón, los primeros días de mediciones en la Marjal no se encontraron las elevadas concentraciones de gas que se esperaba. Es por esto que se decidió proceder a la búsqueda de los puntos más conflictivos mediante la sonda. En la Figura 52 se muestra el mapeo realizado:

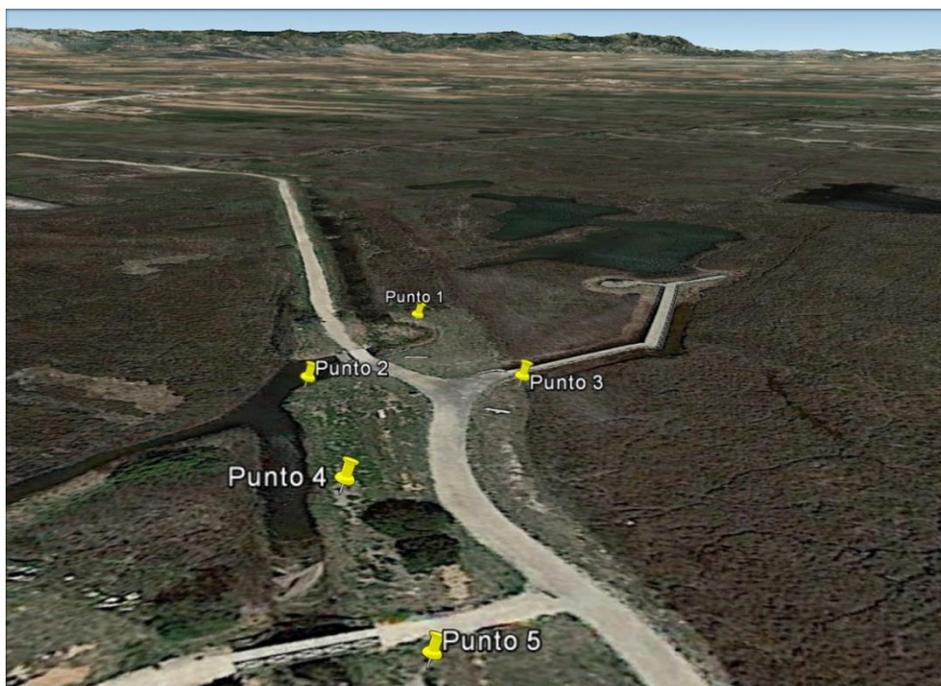


Figura 52. Puntos medición Peñíscola

En base a la figura anterior, las concentraciones de radón medidas en cada punto son las que se muestran en la Figura 53.

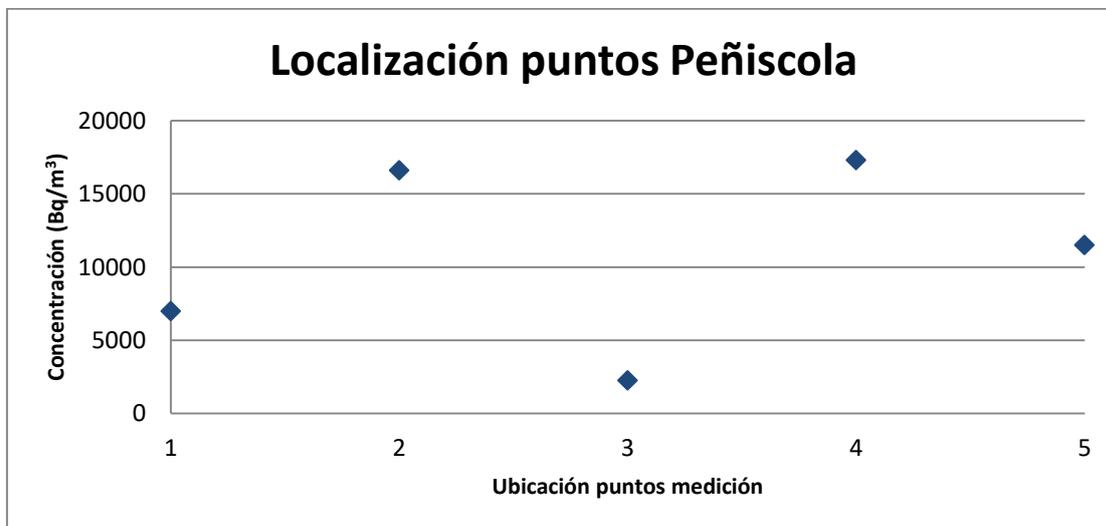


Figura 53. Localización de los puntos más conflictivos de la Marjal de Peñíscola

En función de la localización de los puntos más conflictivos, se seleccionaron la localización 4, como la que presentaba una mayor concentración, y la localización 3 como la de menor concentración de gas radón. De esta forma, las mediciones realizadas en Peñíscola se muestran en la Figura 54:

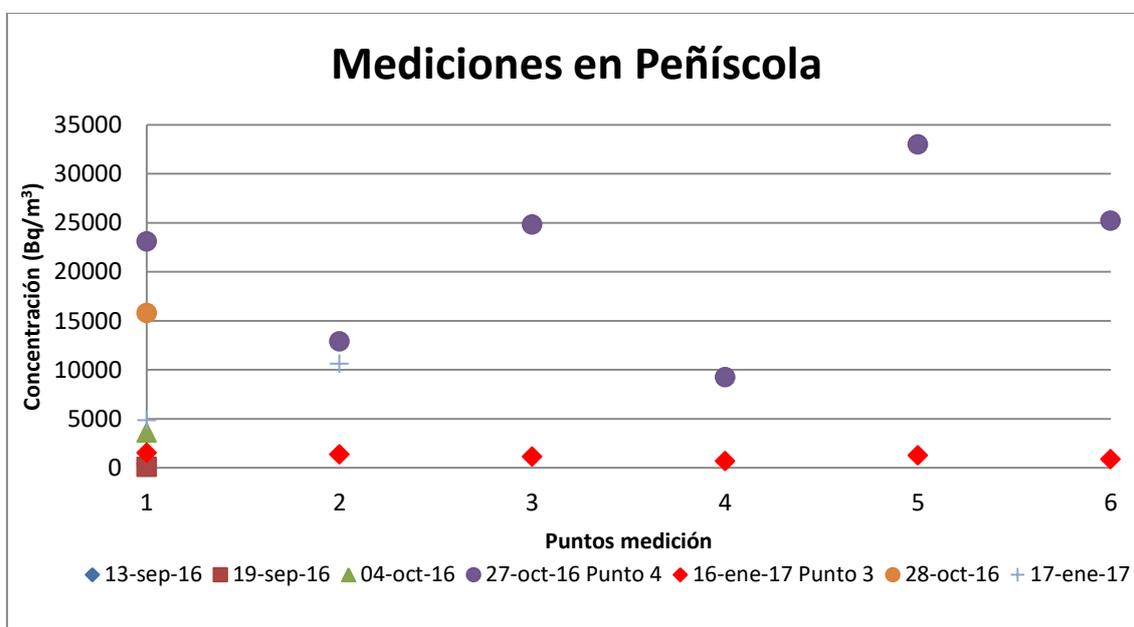


Figura 54. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones en Peñíscola

Tal y como se observa en la Figura 54, los primeros días de mediciones, 13 y 19 de septiembre y 4 de octubre, solo se tomó una muestra por punto. A partir de ese momento y viendo que cualquier aproximación estadística requería de más de un punto, se procedió al diseño del dispositivo en forma de estrella, que se utilizaría de ahí en adelante para todas las mediciones en cualquiera de los tres escenarios.

Todos los resultados obtenidos superan los límites legislativos, y suponen un riesgo elevado para la población. Cabe destacar los resultados obtenidos en el punto 4 (27 de octubre) cuyos valores de concentración son muy elevados y a la vez muy dispersos. Esto se debe en gran medida a la proximidad de las mediciones a la zona del río. En el punto 4, el viento y la humedad eran mayores que en el resto de puntos por lo que las mediciones se vieron muy afectadas por los cambios meteorológicos. El 16 de enero, las concentraciones, aún por encima del límite legislativo, presentan una pendiente mucho más suave y varían menos que en otros casos. Esto se debe a la localización de las mediciones, más alejada del río y más protegida del viento y de cambios bruscos en la climatología.

Durante el 17 de enero se tuvieron que detener las mediciones debido al temporal que provocó inundaciones, tormentas y fuertes vientos en prácticamente toda la península.

En cuanto a las mediciones realizadas en el depósito que contenía una piedra pechblenda, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 55:

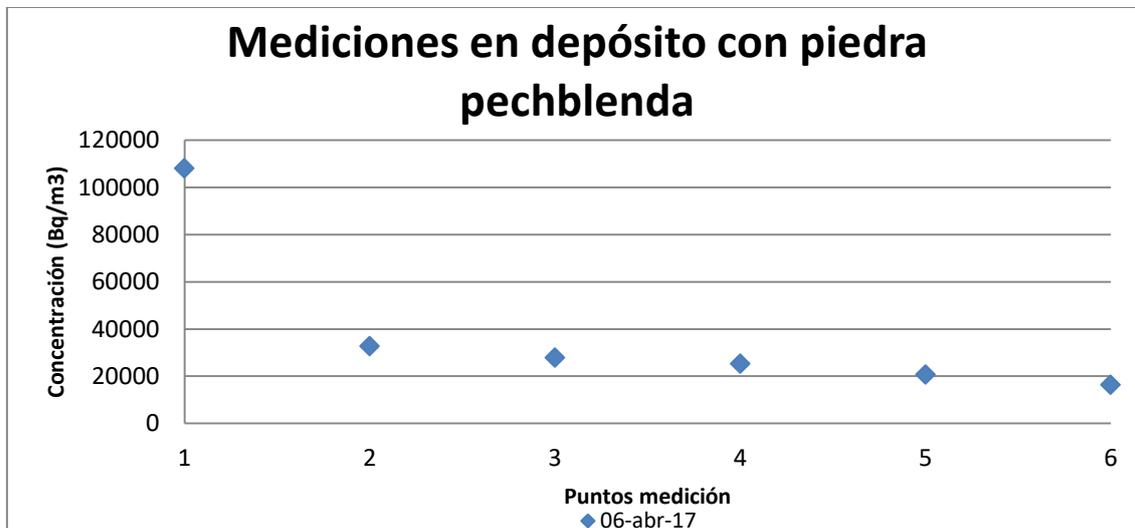


Figura 55. Resultados obtenidos en la medición de concentración de radón mediante la sonda de gas de suelo para las mediciones en el depósito que contenía una piedra pechblenda

Como se observa en la Figura 55, las concentraciones en el depósito están muy por encima de valores legislativos. No obstante, esto se trata de un escenario ficticio, creado para conocer el funcionamiento de las cámaras de acumulación cuando no existen factores externos como los meteorológicos que afecten a las mediciones. Es por esto que este escenario creado podría utilizarse, en vista de los resultados para reproducir nuevas técnicas y probar su reproducibilidad.

### 6.10.2. Mediciones de fondo

En este apartado se van a representar los valores de las tasas de exhalación obtenidas mediante las tres técnicas que permiten la acumulación en una cámara, para los niveles de fondo medidos en los jardines de la UPV. En la Figura 56 se muestran tasa de exhalación en función de la técnica seleccionada.

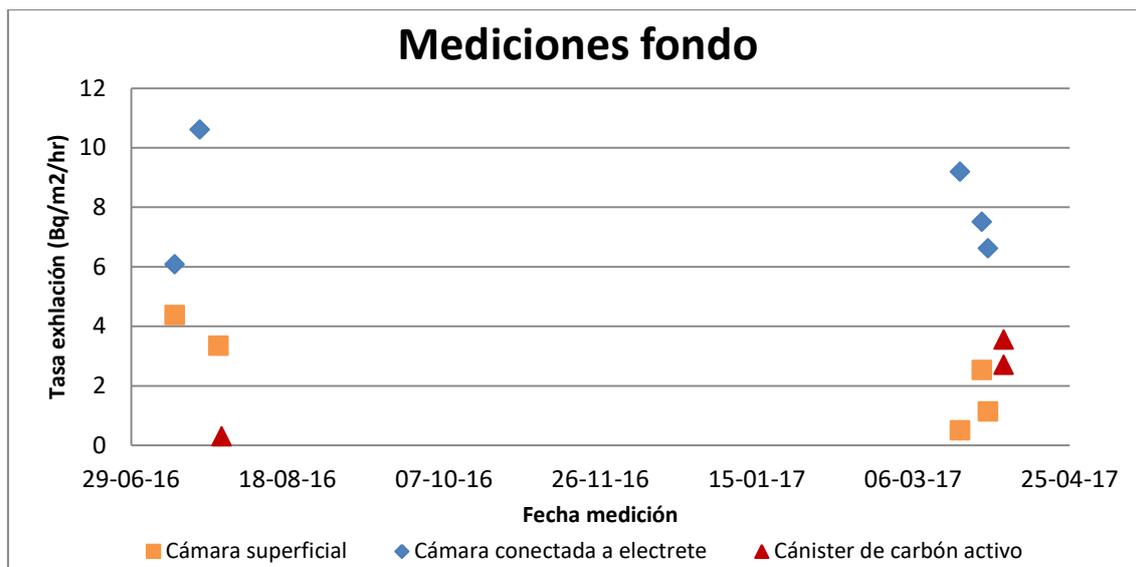


Figura 56. Resultados obtenidos en las mediciones de fondo

Como se observa, todos los valores de tasa de exhalación obtenidos tienen el mismo orden de magnitud y no superan los  $11 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$ .

Los valores de la cámara superficial oscilan entre  $0.5$  y  $4.3 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$  durante los dos periodos de mediciones, julio y finales de marzo; y el cánister presenta valores de entre  $0.3 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$  y  $3.54 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$ . Los resultados obtenidos a partir de las dos cámaras presentan, por tanto, resultados muy similares.

Si se observan los valores de tasa de exhalación medidos por la cámara H, los valores obtenidos se incrementan hasta alcanzar los  $10.6 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$ . Esto puede deberse a la propia geometría de la cámara H, mucho más robusta y de mejor inserción en el suelo que la cámara superficial y el depósito que contiene al cánister. Sin embargo, y como se acaba de mencionar, el orden de magnitud de la tasa de exhalación es similar en las tres técnicas empleadas.

### 6.10.3. Mediciones en Peñíscola

En cuanto a las mediciones realizadas en Peñíscola mediante las cámaras de acumulación, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 57:

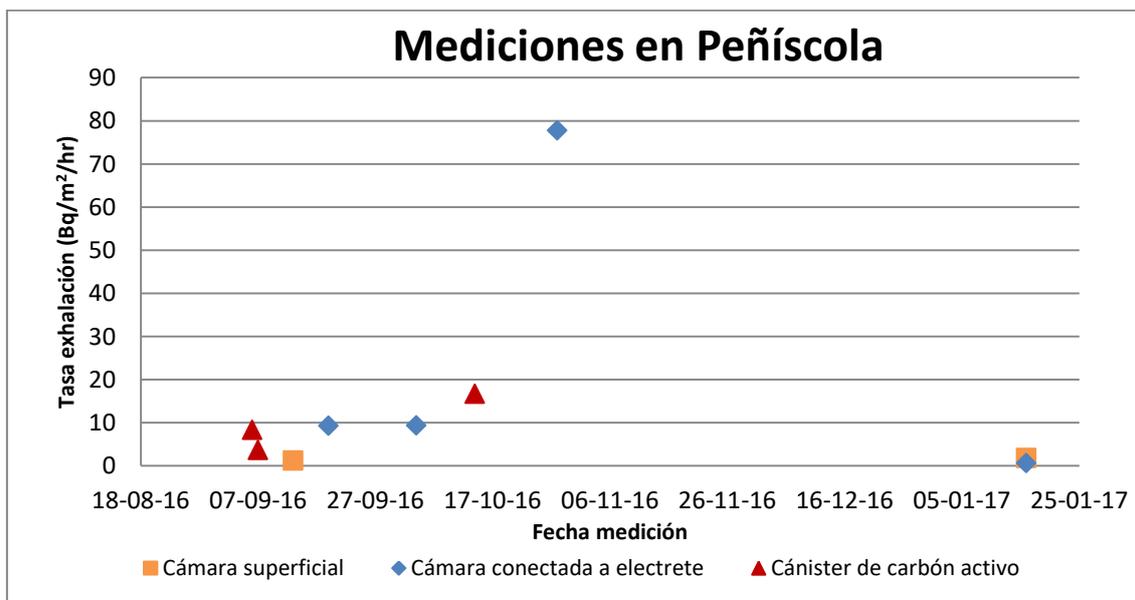


Figura 57. Resultados obtenidos en las mediciones realizadas en Peñíscola

Los resultados obtenidos en la Marjal de Peñíscola resultan dispares si se comparan las tres metodologías de medición de exhalación en suelo. La cámara superficial sigue obteniendo valores inferiores al resto de las cámaras, mientras que la cámara conectada al electrete muestra valores medidos mayores.

Las condiciones climatológicas en Peñíscola variaban mucho tanto en función del día como en función de la hora en que se midiese. Se ha de tener en cuenta que algunos de los periodos en los que se midió, las condiciones fueron adversas, dificultando así el trabajo de campo.

La cámara superficial presenta valores muy por debajo de lo esperado, en principio por la propia geometría de la cámara. La profundidad de la misma es de alrededor de 1.8 cm y está expuesta a cualquier modificación de la climatología. Conseguir un espacio estanco al aire libre resulta muy complicado.

En cuanto al cánister de carbón activo, las bajas tasa de exhalación se pueden deber a la difícil inserción del depósito-cámara que lo contiene. Crear un ambiente estanco requiere de una cámara de fácil inserción en el suelo.

La cámara H conectada al electrete presenta valores que se ajustan mejor a los resultados esperados. El punto con mayor tasa de exhalación corresponde al punto 4, donde ya se había medido mediante la sonda de gas de suelo la cantidad de radón que podría emanar hacia la superficie. Los resultados obtenidos del cálculo de tasa de exhalación mediante la Ec. 19, coinciden con los valores obtenidos mediante la hoja Excel proporcionada por el fabricante.

#### 6.10.4. Mediciones en el depósito que contiene una piedra pechblenda

Las mediciones realizadas en el depósito que contiene la piedra pechblenda y está cubierto de arena, se muestran en la Figura 58:

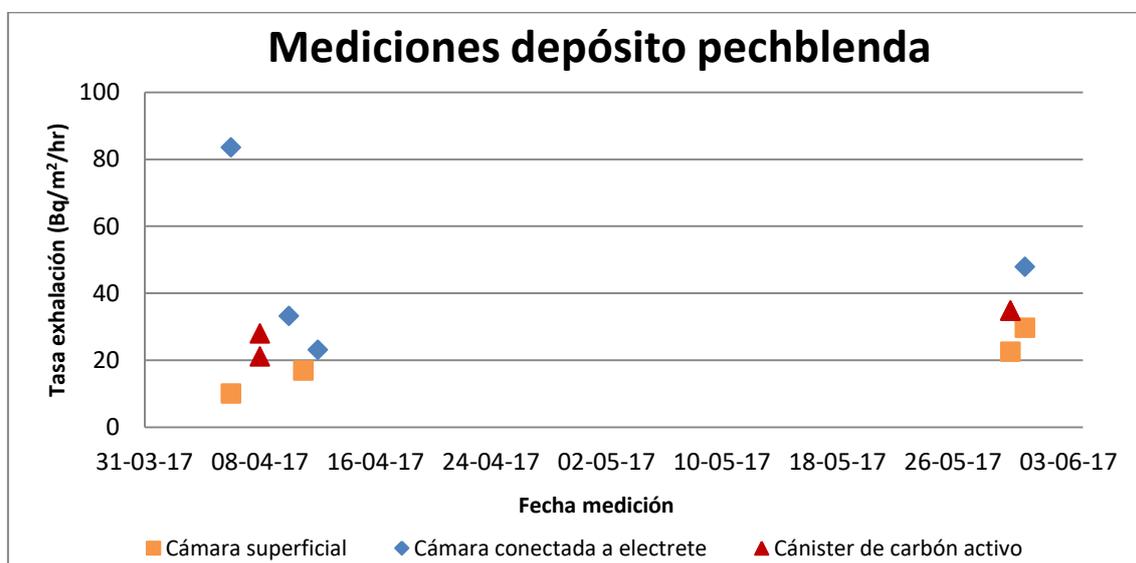


Figura 58. Resultados obtenidos en las mediciones realizadas en el depósito que contiene una piedra pechblenda

Los resultados obtenidos en la medición de la tasa de exhalación muestran resultados semejantes para las técnicas empleadas. La de emisión superficial sigue mostrando valores inferiores al resto de las técnicas, mientras que el cánister y la cámara H presentan, en algunos casos, valores similares.

Es importante observar que para valores de concentraciones muy similares,  $2600 \text{ Bq/m}^3$  frente a  $2000 \text{ Bq/m}^3$ , la tasa de exhalación obtenida mediante la cámara H conectada al electrete y la cámara que contiene al cánister, es también similar:  $23 \text{ Bq/m}^2/\text{hr}$  frente a  $34 \text{ Bq/m}^2/\text{hr}$ .

Esto supone un buen ajuste de las expresiones empleadas para el cálculo de las tasa de exhalación para ambos métodos de medición.

No obstante, cabe destacar que el hecho de tener la cámara de emisión superficial en el interior del depósito, sin factores climatológicos que modificasen o perjudicasen las mediciones, ha mejorado su rendimiento.

### 6.11. Propuestas de mejora

En vista de los resultados obtenidos en la medición de radón en función de la técnica y el escenario seleccionado, se proponen una serie de mejoras que, añadidas a las ya consideradas en el apartado 6.6, mejorarían el rendimiento de los instrumentos de medición:

- Se aconseja una planificación temporal y metodológica exacta, que permita la realización de las mediciones durante el mismo día y en similares condiciones atmosféricas.
- Se aconseja realizar más de una medición mediante la sonda de gas de suelo, para en caso de necesidad emplear conceptos estadísticos y conocer así, entre otras cosas, la dispersión de resultados.
- Se aconseja mejorar la hermeticidad de la cámara de emisión superficial, bien a través de la creación de una nueva cámara que la contenga o bien mediante la modificación de la propia geometría de la misma. La mejora en la hermeticidad impediría el escape de gas radón y su mezcla con el aire.
- Se aconseja mejorar la cámara que contiene al cánister. Su inserción mediante la cámara actual resulta compleja, sin la seguridad de crear un sistema estanco y hermético. Se propone también reducir los tiempos de medida, de tres días a un día, para evitar las variaciones a las que está sujeta la concentración de radón por mediciones prolongadas.



## 7. CONCLUSIONES

La Directiva 59/EURATOM debe ser incorporada a la legislación española en febrero de 2018, por lo que es necesario llevar a cabo el estudio y puesta a punto de técnicas y metodologías para la medición la exhalación del radón.

En función de las ubicaciones, se concluye que las mediciones de fondo realizadas se encuentran dentro del rango de valores establecido por el mapa MARNIA para la provincia de València. La localidad de Peñíscola, como se ha observado en el apartado de Resultados, presenta elevadas concentraciones de gas radón tanto en el proceso de emanación como en el proceso de exhalación. Aunque se trata de una zona protegida, no habitable, la elevada concentración de radón supone un riesgo para la población. En cuanto al depósito del laboratorio, el objetivo de simular un escenario en el cual las mediciones se viesen afectadas, en la menor medida posible, por factores externos, ha resultado satisfactorio. A partir de las mediciones en el depósito se ha podido comprobar cómo algunas de las técnicas mejoran su rendimiento en condiciones normales frente a las condiciones climatológicas adversas que presentaba la Marjal de Peñíscola.

De las técnicas estudiadas, la sonda de gas de suelo permite medir la emanación de gas antes de emigrar a la superficie. Es un método simple y rápido. Este dispositivo muestra en 30 minutos la concentración de radón en el suelo. Es aconsejable realizar más de una medición para poder obtener la concentración media de la zona debido a la elevada dispersión que presenta el gas radón.

La cámara de emisión superficial, la cámara H conectada a un electrete y el cánister de carbón activo permiten conocer la tasa de exhalación de radón. Los tiempos requeridos en las mediciones son 30 minutos, 3 horas y 3 días, respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos en la medición de radón exhalado mediante la cámara de emisión superficial se han observado problemas en la hermeticidad del sistema por lo que se propone como mejora para mediciones futuras la creación de una nueva cámara impermeable al radón que cubra la cámara superficial. Se podría además, mejorar la propia geometría de la cámara, a partir del incremento de su profundidad y del sistema de inserción en la superficie del suelo.

Para el uso de la cámara que contiene al cánister de carbón activo, se podrían mejorar los resultados obtenidos a partir de una mejora de la inserción en la superficie del suelo. En cuanto al propio cánister, su superficie apoyada sobre el suelo impide la exhalación en la cámara. Para nuevas mediciones se propone la creación de un soporte que permita mantener el cánister en posición hacia abajo y elevado de la superficie del suelo. Los tiempos de medición empleados, de 3 días, resultan elevados para la aplicación de la ecuación de cálculo de tasa de exhalación. El periodo de 3 días está sujeto a muchas variaciones de la concentración medida (en función de la hora del día, de las variaciones de temperatura, de presión, etc.). Cabría realizar nuevas mediciones con tiempos de exposición más cortos.

En cuanto al coste del material, suponiendo que no estuviese disponible, el instrumento que supone un menor gasto es el electrete, seguido del cánister y de la cámara de emisión superficial.

Todas las técnicas empleadas y las mejoras propuestas podrían servir de guía para su uso en futuras mediciones de radón frente a la inminente incorporación de la Directiva 59/EURATOM

Este Trabajo Final de Máster ha dado lugar a dos contribuciones a congresos internacionales:

- IRRMA X. 10th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications. Chicago, Illinois, USA  
*Experimental Radon Exhalation Measurement: Comparison of different techniques.* Noverques, A., Verdú, G., Juste, B., Sancho, M. (9-13 Julio, 2017)
- INAC 2017. International Nuclear Atlantic Conference. Belo Horizonte, MG, Brazil  
*Study and comparison of four different Radon Exhalation Techniques.* Noverques, A., Verdú, G., Juste, B., Sancho, M. (22-27 Octubre, 2017)

## 7.1. Líneas futuras

El presente TFM ha permitido abrir una nueva línea de investigación del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear en las mediciones de radón. Las técnicas de medición de exhalación de radón utilizadas se van a mejorar y optimizar teniendo en cuenta la inminente incorporación de la Directiva 59/EURATOM durante el próximo curso.

A partir de los conocimientos y destrezas adquiridas, también durante el próximo curso, se va a participar en el proceso de acreditación por parte del Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) junto con el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universitat Politècnica de València para la medición de radón en aire mediante detectores de trazas y electretes.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Bosew, P. (2003) "The radon emanation power of building materials, soils and rocks". Applied Radiation and Isotopes 59 389-392.

Carpio Brito, G. S. (2016). *Detección de las concentraciones de radio-226 y exhalación de radón-222 en algunos materiales de construcción de la ciudad de Cuenca, Ecuador* (Bachelor's thesis).

Consejo de Seguridad Nuclear. Radiaciones ionizantes. Consejo de Seguridad Nuclear. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de Consejo de Seguridad Nuclear: <https://www.csn.es/radiaciones-ionizantes>

Durrige Company Inc, 2000. RAD7, Electronic Radon Detector. User Manual (2015). Durrige Company, Bedford, MA 01730, EEUU.

Durrige Company Inc. 2000. Emission Chambers User Manual (2016). Durrige Company, Bedford, MA 01730, EEUU.

Durrige Company Inc. 2000. Soil Gas Probe (2016). Durrige Company, Bedford, MA 01730, EEUU.

Environmental Protection Agency, (1993). El radón: guía para su protección y la de su familia. Agencia de los Estados Unidos para la protección ambiental (EPA). Nº 402- K93-005.

Franco García, A. (2016) "La desintegración radioactiva." Recuperado el 4 de Mayo de 2017. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/desintegracion/radio.htm>.

Frutos Vázquez, B. (2009). Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones (Doctoral dissertation, Arquitectura).

Frutos Vázquez, B., Olaya Adán, M. (2010). Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. Colección Informes Técnicos 24.2010. Consejo de Seguridad Nuclear.

García-Talavera, M., Martín, J.L., Gil de Mingo, R., García J.P., Suárez, E. (2013). El mapa predictivo de exposición al radón en España. Colección Informes Técnicos 38.2013. Consejo de Seguridad Nuclear.

García-Vindas, R. (2003). Influencia de la precipitación en la concentración de radón en el subsuelo y su efecto en la exhalación de este hacia la atmósfera (ejemplos de tres zonas de Costa Rica). *Top. Meteor. Oceanog*, 10(2), 57-62.

Lentijo, J. C. (2011). IAEA Mission on the Programme for the rehabilitation of contaminated areas in Japan. *Alfa. Revista de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*, 15, 37-46.

Manual for using E-PERM Flux Monitor for the measurement of radon concentration and radon flux from ground (2015).

Martín Matarranz, J. L. (2008). La protección al radón en nuevos edificios. V Jornadas sobre Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental. Jaca (Huesca) 28-30 de mayo de 2008

Moreno, V. ( 2006). Niveles de radón en recintos cerrados de la zona volcánica de la Garrotja y la falla de Amer. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

Norma Española. UNE EN ISO 11665. (2016). AENOR.

Núñez, M. (2008). Efectos biológicos de las radiaciones – Dosimetría. Escuela Universitaria de Tecnología Médica UdelaR, Montevideo, Uruguay. Comité de Tecnólogos de ALASBIMN. Recuperado el 25 de Enero de 2017, de ALASBIMN: [http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Efectos\\_biologicos\\_de\\_las\\_radiaciones.pdf](http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Efectos_biologicos_de_las_radiaciones.pdf)

Quindós, L.S. (1995). *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa. Universidad de Cantabria*. Consejo de Seguridad Nuclear.

Quindós, L. S. (1980). *Desarrollo y puesta a punto de un nuevo metodo para la medida de la exhalacion de Radon* (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis, University of Santander, Spain).

Sahoo, B.K., Sapra, B.K., Gaware, J. J., Kanse, S. D. , y Mayya, Y. S. *A model to predict radon exhalation from walls to indoor air based on the exhalation from building material samples. Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 13, pp. 2635–2641, 2011.

Suárez, E., Fernández J.A., Baeza, A., Candelas, M., García D., Moreno del Pozo, J., Lanaja, J.M. (2000). Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. Colección de Informes Técnicos 5.2000. Consejo Seguridad Nuclear.

Wang, N., Xiao, L., Li, C., Mei, W., Hnag, Y., Liu, D. (2009). *Level of radon exhalation rate from soil in some sedimentary and granite areas in China. Journal of Nuclear Science and Technology*, 46:3, 303-309.

# DOCUMENTO II:

---

# PRESUPUESTO



## ÍNDICE PRESUPUESTO

|  |   |
|--|---|
| 1. CUADRO DE PRECIOS MATERIALES          | 5 |
| 2. CUADRO DE PRECIOS MANO DE OBRA        | 5 |
| 3. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS       | 6 |
| 4. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS           | 7 |
| 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL     | 8 |
| 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA | 9 |

---



## Índice de Tablas

|   |   |
|---|---|
| Tabla 1. Cuadro de precios materiales.....                    | 5 |
| Tabla 2. Cuadro de precios mano de obra .....                 | 5 |
| Tabla 3. Cuadro de precios descompuestos. ID09,ID10,ID11..... | 6 |
| Tabla 4. Cuadro de precios descompuestos. ID12 .....          | 6 |
| Tabla 5. Cuadro de precios unitarios .....                    | 7 |
| Tabla 6. Presupuesto de ejecución material .....              | 8 |



Un presupuesto es un plan de operaciones y recursos que se recoge en términos monetarios. En este caso, se ha planteado un presupuesto para la realización del Trabajo Final de Máster. Para la consecución del presupuesto de forma completa, éste se ha dividido en los siguientes cuadros de precios.

## 1. CUADRO DE PRECIOS MATERIALES

Tabla 1. Cuadro de precios materiales

| <b>Materiales</b> |                 |                                    |                   |
|-------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------|
| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                 | <b>Precio (€)</b> |
| TM1               | €/dia           | Monitor de detección DurrIDGE RAD7 | 33.65             |
| TM2               | €/dia           | Sonda de gas de suelo              | 7.5               |
| TM3               | €/dia           | Cámara de emisión superficial      | 2.615             |
| TM4               | €/dia           | Electrete                          | 12                |
| TM5               | €/dia           | Cámara H                           | 8                 |
| TM6               | €/dia           | Lector electrete E-PERM            | 11.5              |
| TM7               | €/dia           | Cánister de carbón activo          | 15                |
| TM8               | €/dia           | Cámara cánister                    | 10                |
|                   |                 | <i>Espectrómetro gamma</i>         |                   |
| TM9               | €/dia           | Detector NaI                       | 45                |
| TM10              | €/dia           | Fuente alimentación                | 15                |
| TM11              | €/dia           | Multicanal                         | 32.5              |
| TM12              | €/dia           | Software GammaVision               | 2.5               |
| TM13              | €/dia           | Blindaje                           | 10                |

## 2. CUADRO DE PRECIOS MANO DE OBRA

Tabla 2. Cuadro de precios mano de obra

| <b>Mano de obra directa</b> |                 |                                      |                   |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| <b>Uds</b>                  | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                   | <b>Precio (€)</b> |
| MO1                         | Horas           | Estudiante Máster Ingeniería Química | 20                |
| MO2                         | Horas           | Catedrático Ing. Industrial (Tutor)  | 70                |
| MO3                         | Horas           | Doctora Ing.Industrial (Co-tutora)   | 50                |
| MO4                         | Horas           | Ing. Industrial                      | 50                |

### 3. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Tabla 3. Cuadro de precios descompuestos. ID01-ID08

| Ids      | Unidades |   | Descripción   |            |          |             |
|----------|----------|---|---|------------|----------|-------------|
|          | Uds      | Tareas realizadas por la estudiante Máster Ingeniería Química para el TFM |   |            |          |             |
|          | Ids      | Unidades  | Descripción   | Precio (€) | Cantidad | Importe (€) |
| ID01     | MO1      | Horas   | Análisis bibliográfico                                  | 20         | 132      | 2640        |
| ID02     | MO1      | Horas   | Selección técnicas de medición                          | 20         | 62       | 1240        |
| ID03     | MO1      | Horas   | Puesta a punto de las técnicas seleccionadas            | 20         | 120      | 2400        |
| ID04     | MO1      | Horas   | Selección de la ubicación                               | 20         | 30       | 600         |
| ID05     | MO1      | Horas   | Mediciones de fondo                                     | 20         | 120      | 2400        |
| ID06     | MO1      | Horas   | Mediciones realizadas en depósito con piedra pechblenda | 20         | 80       | 1600        |
| ID07     | MO1      | Horas   | Mediciones realizadas en Peñíscola                      | 20         | 160      | 3200        |
| ID08     | MO1      | Horas   | Resultados y conclusiones                               | 20         | 96       | 1920        |
| TOTAL ID |          |   |   |            |          | 16000       |

Tabla 4. Cuadro de precios descompuestos. ID09,ID10,ID11

| Ids      | Unidades |  | Descripción   |            |          |             |
|----------|----------|--|---|------------|----------|-------------|
|          | Uds      | Desplazamientos estudiante Máster Ingeniería Química |   |            |          |             |
|          | Ids      | Unidades   | Descripción   | Precio (€) | Cantidad | Importe (€) |
| ID09     | MO1      | Días   | Desplazamientos València-Peñíscola, Peñíscola- Valencia | 80.7       | 20       | 1614        |
| ID10     | MO1      | Horas  | Duración desplazamientos                                | 20         | 56       | 1120        |
| ID11     | MO1      | Días   | Dietas Peñíscola  | 5          | 20       | 100         |
| TOTAL ID |          |  |   |            |          | 2834        |

Tabla 5. Cuadro de precios descompuestos. ID12

| Ids  | Unidades   |                  | Descripción                             |            |          |             |
|------|------------|------------------|---|------------|----------|-------------|
|      | Uds        | Tutorización TFM |   |            |          |             |
|      | Ids        | Unidades         | Descripción                             | Precio (€) | Cantidad | Importe (€) |
| ID12 | MO2        | Horas            | Catedrático Ing. Industrial (Tutor)     | 70         | 10       | 700         |
|      | MO3        | Horas            | Doctora Ing.Industrial (Co-Tutora)      | 50         | 30       | 1500        |
|      | MO4        | Horas            | Ing. Industrial, técnica de laboratorio | 50         | 40       | 2000        |
|      | TOTAL ID12 |                  |   |            |          |             |

#### 4. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

Tabla 6. Cuadro de precios unitarios

| Tarea | Unidades | Descripción   | Cantidad | Precio (€) |
|-------|----------|---|----------|------------|
| ID01  | Uds.     | Análisis bibliográfico                                      | 1        | 2640       |
| ID02  | Uds.     | Selección de las técnicas de medición                       | 1        | 1240       |
| ID03  | Uds.     | Puesta a punto de las técnicas de medición seleccionadas    | 1        | 2400       |
| ID04  | Uds.     | Selección de la ubicación                                   | 1        | 600        |
| ID05  | Uds.     | Mediciones de fondo   | 1        | 2400       |
| ID06  | Uds.     | Mediciones realizadas en depósito con piedra pechblenda     | 1        | 1600       |
| ID07  | Uds.     | Mediciones realizadas en Peñíscola                          | 1        | 3200       |
| ID08  | Uds.     | Resultados y conclusiones                                   | 1        | 100        |
| ID09  | Uds.     | Desplazamientos:<br>València-Peñíscola ~ Peñíscola Valencia | 1        | 1614       |
| ID10  | Uds.     | Duración desplazamientos                                    | 1        | 1120       |
| ID11  | Uds.     | Dietas Peñíscola  | 1        | 100        |
| ID12  | Uds.     | Tutorización  | 1        | 4200       |

## 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Tabla 7. Presupuesto de ejecución material

| <b>Presupuesto de ejecución material</b>        |                 |  |                 |                   |                          |
|---|-----------------|--|-----------------|-------------------|--------------------------|
| <b>Tarea</b>                                    | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                                       | <b>Cantidad</b> | <b>Precio (€)</b> | <b>Importe total (€)</b> |
| ID01  | Uds.            | Análisis bibliográfico                                   | 1               | 2640              | 2640                     |
| ID02  | Uds.            | Selección de las técnicas de medición                    | 1               | 1240              | 1240                     |
| ID03  | Uds.            | Puesta a punto de las técnicas de medición seleccionadas | 1               | 4400              | 4400                     |
| ID04  | Uds.            | Selección de la ubicación                                | 1               | 600               | 600                      |
| ID05  | Uds.            | Mediciones de fondo                                      | 1               | 2400              | 2400                     |
| ID06  | Uds.            | Mediciones realizadas en depósito con piedra pechblenda  | 1               | 1600              | 1600                     |
| ID07  | Uds.            | Mediciones realizadas en Peñíscola                       | 1               | 3200              | 3200                     |
| ID08  | Uds.            | Resultados y conclusiones                                | 1               | 100               | 100                      |
| ID09  | Uds.            | Desplazamientos Peñíscola                                | 20              | 80.7              | 1614                     |
| ID10  | Uds.            | Duración desplazamientos                                 | 56              | 20                | 1120                     |
| ID11  | Uds.            | Dietas Peñíscola   | 20              | 5                 | 100                      |
| ID12  | Uds.            | Tutorización   | 1               | 4200              | 4200                     |
| ID13  | Uds.            | Materiales utilizados                                    | 45              | 205.26            | 9236.92                  |
| <b>TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL (€)</b> |                 |  |                 |                   | <b>30450.93</b>          |

## 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| Presupuesto de ejecución material     | 30450.93 |
| 20% de gastos generales               | 6090.19  |
| 6% de costes indirectos               | 1827.06  |
| 10% de beneficio industrial           | 3045.09  |
| Suma                                  | 41413.26 |
| 21% IVA                               | 8696.78  |
| Presupuesto de ejecución por contrata | 50110.04 |

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata a la cantidad de CINCUENTA MIL CIENTO DIEZ CON CUATRO CÉNTIMOS.



# DOCUMENTO III:

---

# PLANOS

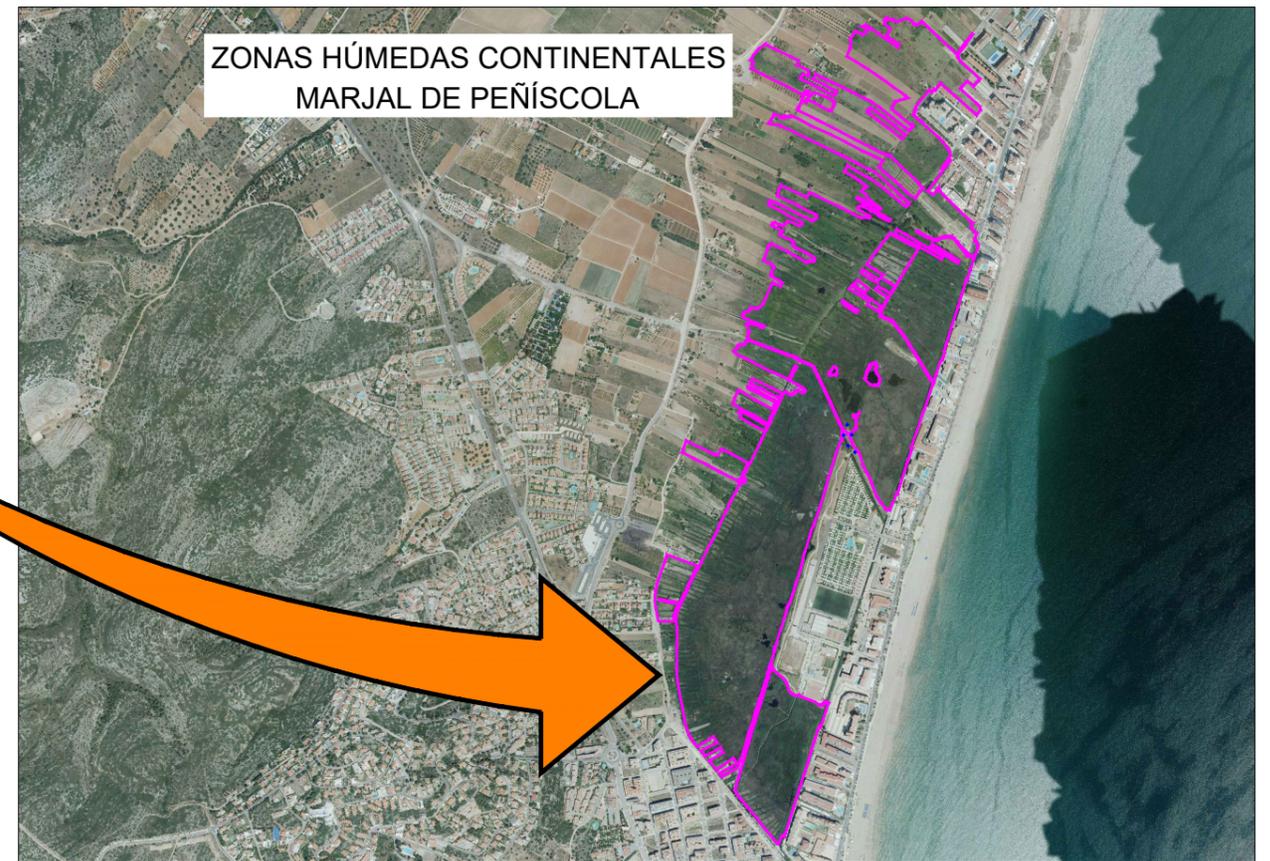
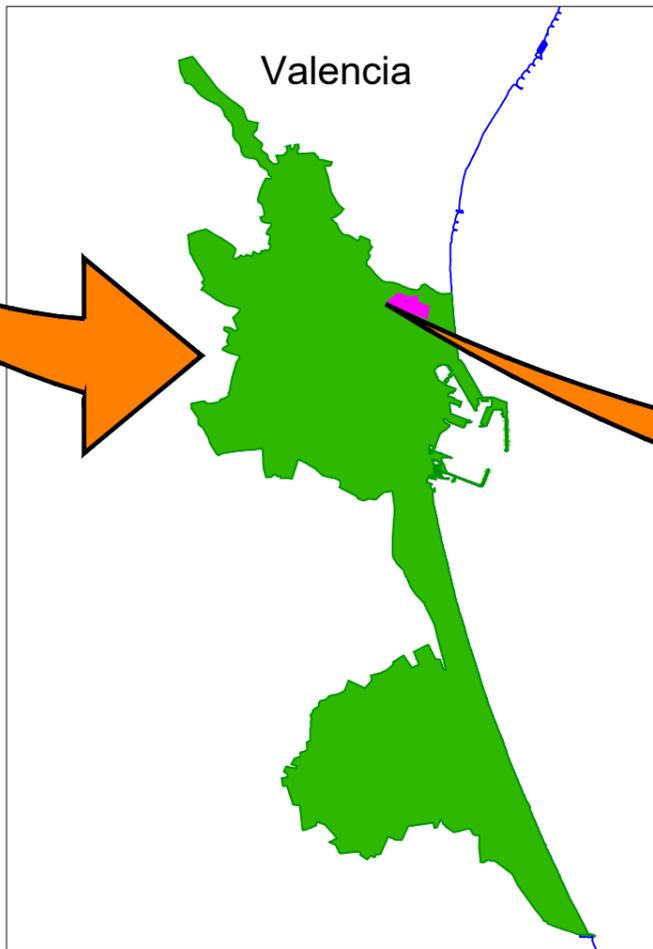
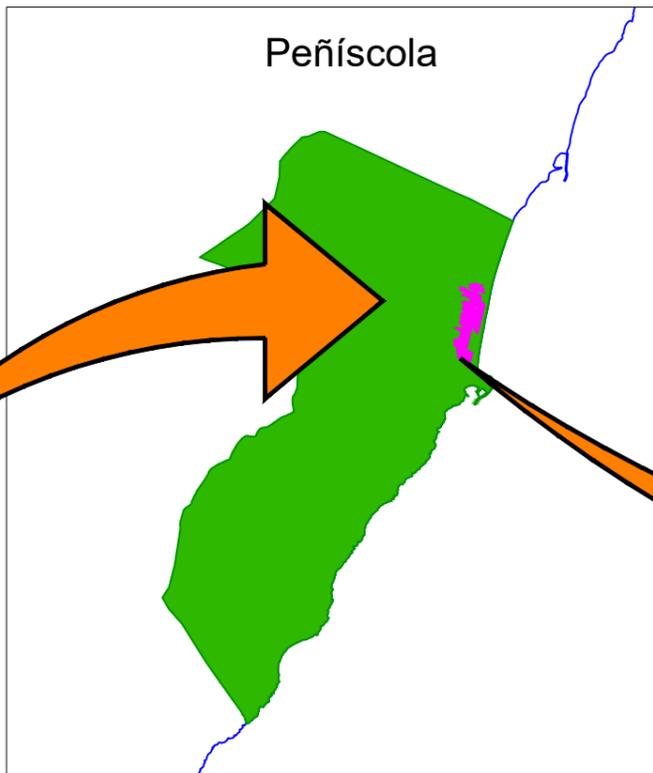
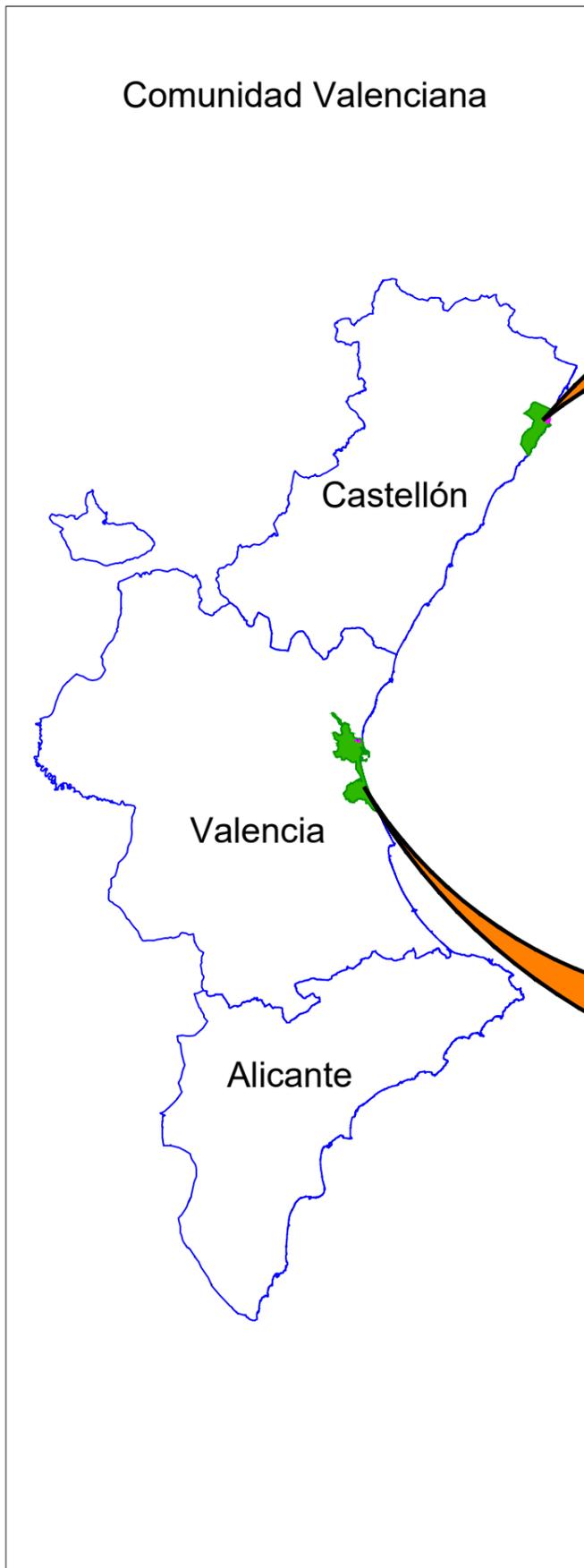


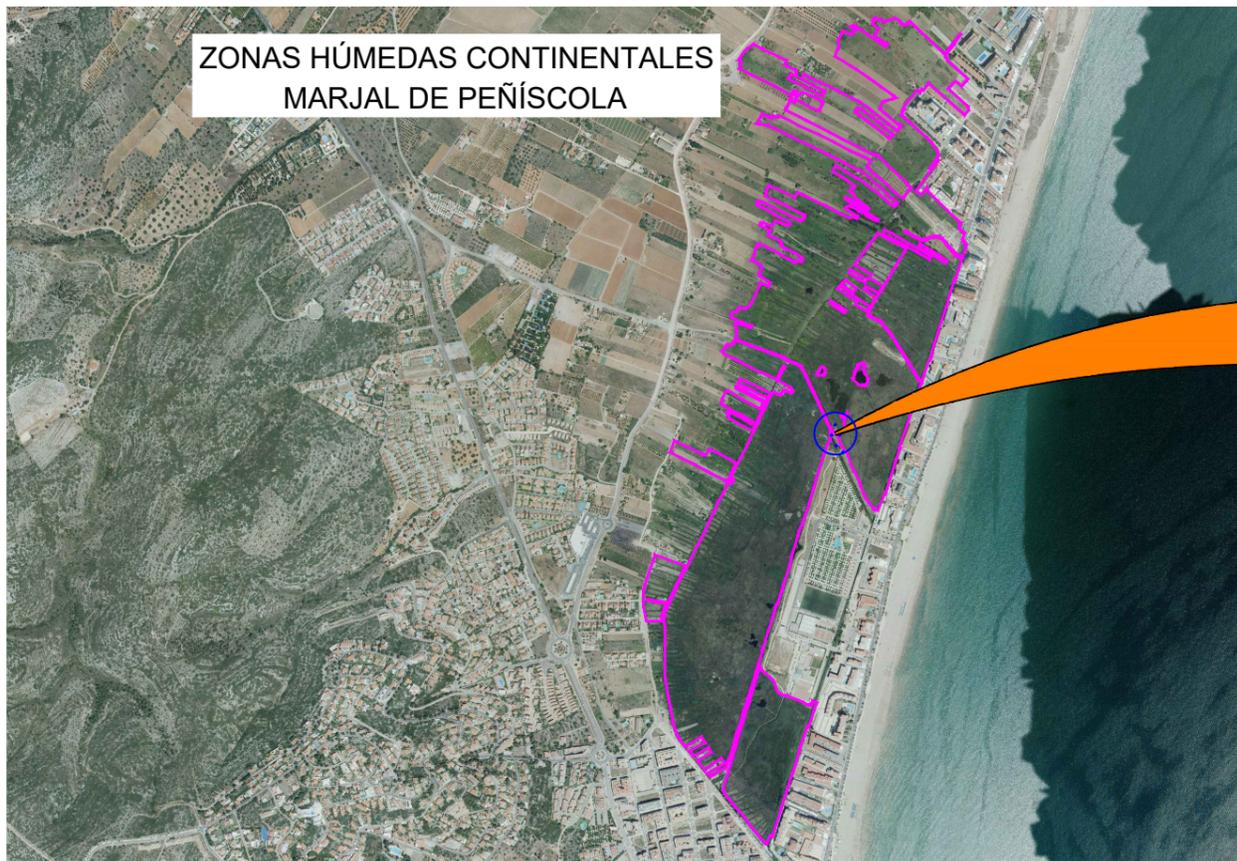
## ÍNDICE PLANOS

Plano 1: Situación

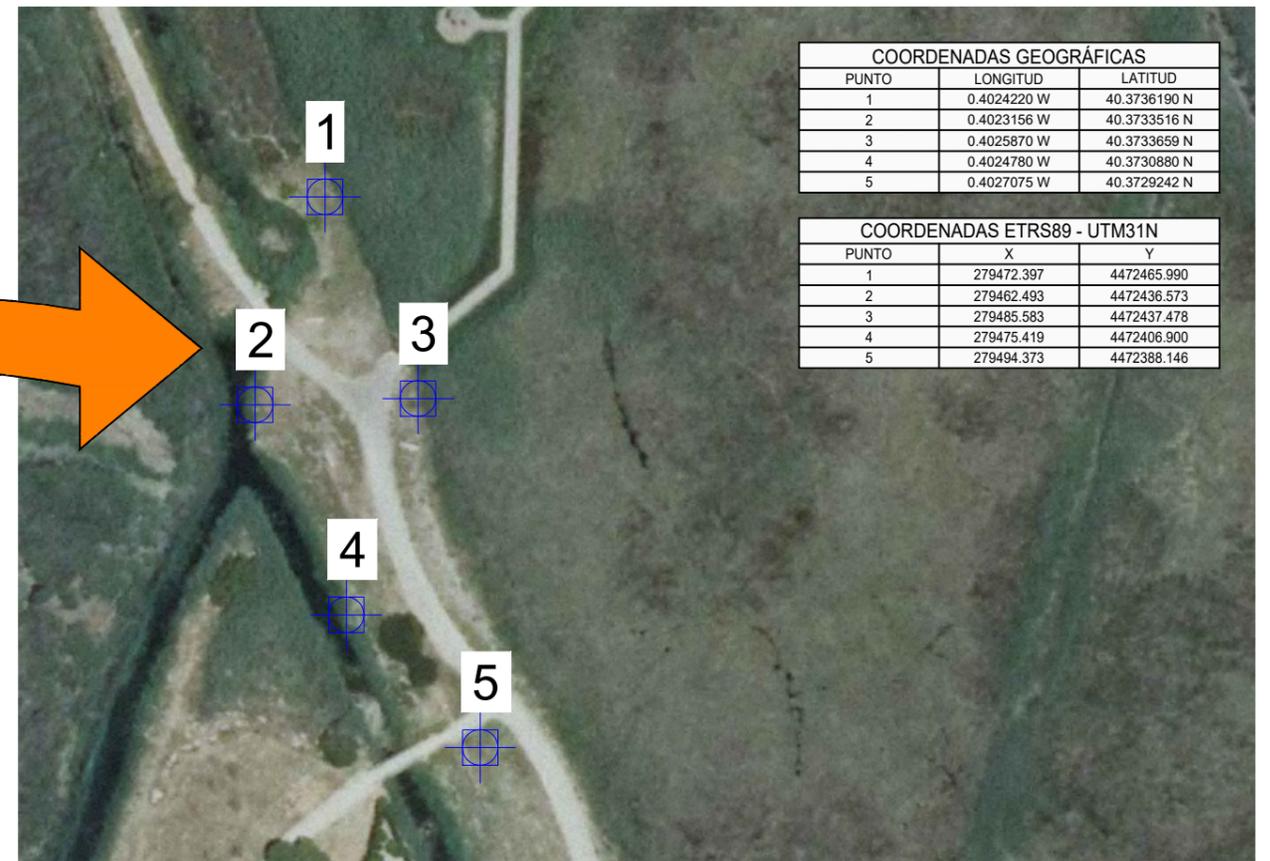
Plano 2: Puntos toma de datos







ZONAS HÚMEDAS CONTINENTALES  
MARJAL DE PEÑÍSCOLA

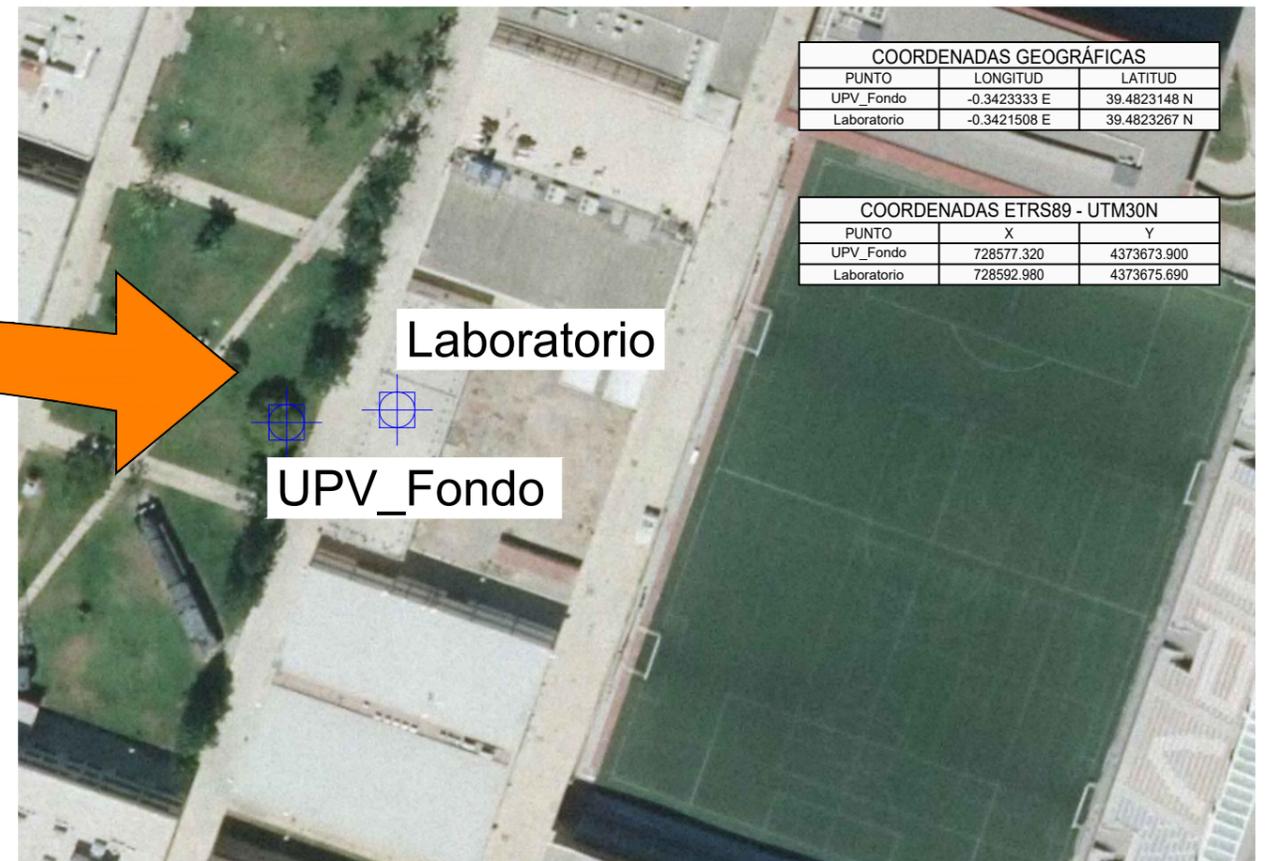


| COORDENADAS GEOGRÁFICAS |             |              |
|-------------------------|-------------|--------------|
| PUNTO                   | LONGITUD    | LATITUD      |
| 1                       | 0.4024220 W | 40.3736190 N |
| 2                       | 0.4023156 W | 40.3733516 N |
| 3                       | 0.4025870 W | 40.3733659 N |
| 4                       | 0.4024780 W | 40.3730880 N |
| 5                       | 0.4027075 W | 40.3729242 N |

| COORDENADAS ETRS89 - UTM31N |            |             |
|-----------------------------|------------|-------------|
| PUNTO                       | X          | Y           |
| 1                           | 279472.397 | 4472465.990 |
| 2                           | 279462.493 | 4472436.573 |
| 3                           | 279485.583 | 4472437.478 |
| 4                           | 279475.419 | 4472406.900 |
| 5                           | 279494.373 | 4472388.146 |



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



| COORDENADAS GEOGRÁFICAS |              |              |
|-------------------------|--------------|--------------|
| PUNTO                   | LONGITUD     | LATITUD      |
| UPV_Fondo               | -0.3423333 E | 39.4823148 N |
| Laboratorio             | -0.3421508 E | 39.4823267 N |

| COORDENADAS ETRS89 - UTM30N |            |             |
|-----------------------------|------------|-------------|
| PUNTO                       | X          | Y           |
| UPV_Fondo                   | 728577.320 | 4373673.900 |
| Laboratorio                 | 728592.980 | 4373675.690 |