Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación de factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Lázaro Benavides

DIRECTORES: Arturo González Gil

Lorena González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universidade Vigo

Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación de factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

La inmisión de gas radón en el interior de los edificios supone un efecto perjudicial para los habitantes que en él se encuentran. Su comprobada relación con el cáncer de pulmón ha dado lugar a una creciente preocupación social y científica, y ha promovido el desarrollo de normativas y medidas de mitigación para reducir al máximo sus efectos radioactivos.

En el presente Trabajo Fin de Grado se han investigado diferentes variables que pueden afectar a la concentración de radón en espacios cerrados, incluyendo factores geológicos, constructivos, meteorológicos y de mareas. Para ello, durante dos meses, se llevaron a cabo mediciones de los niveles de este gas en el edificio del Centro Universitario de la Defensa, situado en la Escuela Naval Militar, y se estudió su relación con cada uno de los factores anteriormente indicados.

Se concluye que las concentraciones de este gas están influenciadas por factores geológicos, así como meteorológicos donde para la zona estudiada, el más influyente es la presión atmosférica. Asimismo, se ha hallado una relación entre el radón y las mareas terrestres y oceánicas, siendo el efecto de las últimas especialmente relevante debido a la proximidad de la zona al mar.

PALABRAS CLAVE

Concentración de radón, correlación, factores meteorológicos, mareas terrestres y oceánicas, terreno

AGRADECIMIENTOS

Sirvan mis primeras palabras para agradecer a mi familia por todo su apoyo incondicional. Ellos siempre son y serán el mejor referente que puedo tener. Los valores de perseverancia y humildad que siempre me han inculcado, me han permitido llegar actualmente donde estoy, a escasos meses de conseguir el sueño que siempre he deseado. Por ello, gracias a mi madre por haberme educado de esta forma, por haber volcado toda su vida en mí y ser mi mejor referente tanto humano como profesional. También agradecer sin duda a mi padre, por inculcarme en mi comportamiento el valor de que pase lo que pase hay que sacar el lado positivo de los acontecimientos que nos ocurran y seguir siempre adelante. Sus consejos y su afán de superación han sido de gran utilidad en mi vida. Estos cinco años alejados de mi casa, me han permitido apreciar lo muy afortunado que soy de pertenecer a esta familia y lo mucho que admiro a ambos.

En segundo lugar, en lo que respecta a este TFG, quiero agradecer a mis tutores de este trabajo, Arturo y Lorena, por todo el tiempo dedicado y su incansable interés desarrollados durante el transcurso de este proyecto. Sus consejos han permitido despejar esas incógnitas que presentaban en el camino, y así de esta forma consolidar el presente trabajo que aquí se presenta. También agradecer a los conserjes del CUD por adecuar el lugar de estudio a las condiciones idóneas para su desarrollo.

A mis amigos más cercanos, que me han demostrado que la distancia no es más que una cifra, siempre han mostrado su interés por mí y me han ayudado en los momentos difíciles con sus consejos.

Agradecer a la Promoción 421-151, por todo su apoyo a lo largo de estos cinco años, llenos de buenos y malos momentos pero donde el apoyo entre unos y otros ha permitido superar esos momentos más arduos. Por último, quisiera hacer mención especial a mis compañeros Javier Hidalgo, Miguel Ángel Pardo, Elena de Castellvi, Pablo Sánchez, Sheila Pachón, Jorge Mateo, Carlos Roldán y Javier Vila por su ayuda y apoyo durante este largo embarque en la ENM que finaliza en pocos meses.

"La humildad conduce a la grandeza"

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 4
Índice de Tablas 10
1 Introducción y objetivos 11
1.1 Introducción a la importancia del radón en espacios interiores 11
1.1.1 El radón y su capacidad radioactiva 11
1.1.2 Factores determinantes en la acumulación de radón en espacios interiores 12
1.1.3 Efectos nocivos para la salud del ser humano 13
1.1.4 Concienciación social y normativa 14
1.2 Justificación 15
1.3 Objetivos 15
1.4 Metodología y planificación general 16
2 Estado del arte 17
2.1 Factores geológicos que afectan a la inmisión del radón en edificios 17
2.1.1 Composición del subsuelo 17
2.1.2 Permeabilidad del terreno 20
2.1.3 Saturación del agua en el terreno 22
2.2 Influencia de factores constructivos en la concentración de radón 22
2.2.1 Materiales de construcción 22
2.2.2 Vías de acceso del radón en los edificios 24
2.2.3 Arquitectura de los edificios 25
2.2.4 Soluciones arquitectónicas para reducir el radón en los edificios 28
2.2.5 Ventilación 31
2.3 Influencia de factores meteorológicos en la concentración de radón 33
2.3.1 Viento 33
2.3.2 Presión atmosférica 34
2.3.3 Temperatura 37
2.3.4 Precipitaciones 39
2.4 Variaciones cíclicas en la inmisión de radón 40
2.4.1 Ciclos de radón debido a variables meteorológicas 41
2.4.2 Influencia de las mareas terrestres en los ciclos de radón 43

3 Materiales y métodos 47
3.1 Descripción del recinto de estudio 47
3.1.1 Localización y descripción del edificio 47
3.1.2 Características del despacho 114 48
3.2 Equipos empleados en la medición 53
3.2.1 RadonEyeRD200 53
3.2.2 Sensores de temperatura y humedad 53
3.2.3 Obtención de datos meteorológicos, fases lunares y mareas 54
3.3 Descripción de la metodología y toma de datos experimentales 54
3.3.1 Normativa seguida en la toma de datos 54
3.3.2 Metodología empleada en la fase de toma de datos 55
3.3.3 Análisis de correlación de variables 60
4 Resultados 63
4.1 Influencia de factores constructivos 63
4.1.1 Distribución espacial de radón en despacho 114 63
4.1.2 Influencia de la ventilación mecánica sobre los niveles de radón 65
4.1.3 Distribución del gas radón entre dos espacios contiguos 67
4.1.4 Efecto de la ventilación del espacio contiguo (112) sobre despacho 114 69
4.2 Análisis de la geología de la zona de estudio 69
4.3 Influencia de los factores meteorológicos y su correlación con el radón 73
4.3.1 Viento 74
4.3.2 Presión atmosférica 78
4.3.3 Temperatura 84
4.3.4 Precipitaciones 94
4.3.5 Humedad interior 97
4.4 Influencia de las mareas terrestres y oceánicas 100
4.4.1 Mareas terrestres 100
4.4.2 Mareas oceánicas 104
5 Conclusiones y líneas futuras 111
5.1 Conclusiones 111
5.2 Líneas futuras 112
6 Bibliografía 114

Anexo I: GRÁFICAS DE LOS DISTINTOS MEDIDORES DE LA FASE DE MUESTREO 118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [2] 11
Figura 1-2 Cadena de desintegración del uranio [4] 12
Figura 1-3 La Región. 13 de febrero de 2020. Brais Iglesias [11] 14
Figura 1-4 La Voz de Galicia. 18 de febrero de 2020. César Quian [12] 14
Figura 1-5 Madrid Diario. 9 de marzo de 2020. Alba Cabareño Aina [13] 14
Figura 1-6 World nuclear news. 28 de septiembre de 2020 [14] 14
Figura 1-7 El Diario Extremadura. 21 de noviembre de 2020 [15] 14
Figura 1-8 Diario de León. 15 de diciembre de 2020. Saida Lara [16] 14
Figura 1-9 KTVZ news channel. 12 de enero de 2021. Barney Lerten [17] 14
Figura 2-1 Exhalación y emanación del gas [6] 18
Figura 2-2 Clasificación de las rocas ígneas [22] 19
Figura 2-3 Yacimientos de uranio en España [22] 19
Figura 2-4 Mapa geológico de España [22] 20
Figura 2-5 Zonas con potencial de radón >300 Bq/m^3 [29] 21
Figura 2-6 Capacidad de inmisión del radón según la saturación del agua en el terreno [30] 22
Figura 2-7 Principales vías de entrada del gas radón en edificios [6] 25
Figura 2-8 Influencia de la proporción de la envolvente en contacto con el terreno [30] 26
Figura 2-9 Influencia de la construcción de una cámara sanitaria [30] 27
Figura 2-10 Actuaciones para edificios de nueva obra [6] 28
Figura 2-11 Sistema de barrera antiradón [6] 29
Figura 2-12 Sistema de extracción natural [6] 30
Figura 2-13 Sistema de presurización [6] 30
Figura 2-14 Sistema de cámara de forjado sanitario [6] 31
Figura 2-15 Concentración de radón-Velocidad de viento Tesis Borja Frutos Vázquez [4] 34
Figura 2-16 Gráfico de dispersión de presión atmosférica-concentración de radón [39] 35
Figura 2-17 Curvas concentración de radón-presión atmosférica [6] 35
Figura 2-18 Concentración de radón- presión atmosférica Tesis Borja Frutos Vázquez [4] 37
Figura 2-19 Concentración de radón- Temperatura (Período 5 días) [4] 38
Figura 2-20 Gráfico de dispersión de temperatura exterior-concentración de radón [39] 38
Figura 2-21 Relación de concentración de radón-temperatura, presión (5 años) [41] 39
Figura 2-22 Precipitaciones-Presión atmosférica [4] 40

Figura 2-23 Gráfico de dispersión de humedad exterior-concentración de radón [39] 41
Figura 2-24 Relación estacional entre la concentración de radón y variables meteorológicas [42] 42
Figura 2-25 Relación mensual entre la concentración de radón y variables meteorológicas [42].....42
Figura 2-26 Concentración de radón-mareas terrestres-variación de nivel freático [44] 43
Figura 2-27 Relación entre la concentración de radón y las fases de la Luna [45] 44
Figura 3-1 Situación del edificio del CUD dentro de ENM Fuente: Google Earth 48
Figura 3-2 Localización despacho 114 en planta baja del CUD.....49
Figura 3-3 Falso techo de despacho 114 (vista interior y exterior) 50
Figura 3-4 Despacho 114 (vista desde ventana patio de aulas) 51
Figura 3-5 Despacho 114 (vista desde pasillo interior edificio CUD).....51
Figura 3-6 Sellado de filtraciones y cierre del conducto de ventilación 52
Figura 3-7 Sellado de filtraciones de aire a través de la ventana 52
Figura 3-8 RadonEyeRD200 y su aplicación móvil 53
Figura 3-9 Sensores de temperatura y humedad 54
Figura 3-10 Situación de los medidores #9 y #13 en el despacho 114 56
Figura 3-11 Situación de los medidores #5 y #9 en despacho 114 56
Figura 3-12 De izquierda a derecha medidores ventana, central alto y puerta 57
Figura 3-13 Nueva situación del medidor #5 a partir del 19 de enero.....58
Figura 3-14 Situación de los medidores de radón a partir del 19 de enero.....58
Figura 3-15 Situación aula 21 (simulador de navegación) 59
Figura 3-16 Rejilla de impulsión del Fancoil del despacho 112.....60
Figura 3-17 Aislamiento de fancoil despacho 112.....60
Figura 4-1 Gráfico combinando de medidores 22/12 a 19/01 64
Figura 4-2 Medidores falso techo y puerta 22/12 a 19/01 64
Figura 4-3 Medidores en la misma vertical 19/01-22/02.....65
Figura 4-4 Concentración de radón en el despacho 114 con condiciones de ventilación variables 66
Figura 4-5 Medidores falso techo despacho 112 y 114 9/2-22/2.....67
Figura 4-6 Principales vías de transmisión de gas radón entre dos despachos con diferentes concentraciones.....68
Figura 4-7 Gráfico combinado despachos 112 y 114 70
Figura 4-8 Medidores concentraciones más altas despacho 112 y 114 70
Figura 4-9 Medidores concentraciones más bajas despacho 112 y 114 71
Figura 4-10 Mapa geológico de Pontevedra Fuente: IGME [53] 71

Figura 4-11 Visor cartográfico IGME para la zona de la ENM [53] 72
Figura 4-12 Gráfico combinado Despacho 114 y aula 21 73
Figura 4-13 Concentración de radón-Viento medidor central alto 22/12-18/1 (2,3 m) 74
Figura 4-14 Concentración de radón-Viento medidor central alto 18/1-22/2 (2,3 m) 74
Figura 4-15 Correlación global radón-viento 75
Figura 4-16 Incremento de radón con el viento 27 diciembre medidor central alto (2,3 m) 75
Figura 4-17 Correlación radón-viento 27 diciembre 76
Figura 4-18 Incremento de radón con el viento 29/01-31/01 medidor central alto (2,3 m) 76
Figura 4-19 Correlación radón-viento 29 enero 77
Figura 4-20 Correlación radón-viento 5 enero 77
Figura 4-21 Correlación radón-viento 6 enero 78
Figura 4-22 Concentración de radón-Presión atmosférica medidor central alto 22/12-18/1 (2,3 m) 78
Figura 4-23 Concentración de radón-Presión atmosférica medidor central alto 18/1-22/2 (2,3 m) 79
Figura 4-24 Correlación global radón-presión atmosférica 79
Figura 4-25 Variación de radón con presión 26-28 diciembre medidor central alto (2,3 m) 80
Figura 4-26 Correlación radón-presión 28 diciembre 80
Figura 4-27 Correlación radón-presión 29 diciembre 81
Figura 4-28 Radón-Incremento de presión medidor centro alto (2,3 m) 27-29 dic 81
Figura 4-29 Radón-Aumento de presión día 30 de enero medidor centro alto (2,3 m) 82
Figura 4-30 Correlación radón-presión 30 de enero 82
Figura 4-31 Radón-Aumento de presión día 8 de febrero medidor centro alto (2,3 m) 83
Figura 4-32 Comportamientos de la presión con radón medidor centro alto (2,3 m) 28-30 enero 83
Figura 4-33 Incremento de radón con la presión 6-8 enero medidor centro alto (2,3 m) 84
Figura 4-34 Radón-Temperatura interior medidor central alto (2,3 m) 19/1-22/2 85
Figura 4-35 Correlación radón-temperatura interior 19/1-22/2 85
Figura 4-36 Desarrollo de temperatura interior con radón medidor central alto (2,3 m) 1 a 4 febrero ..86
Figura 4-37 Relación de temperatura interior con radón 6 a 8 febrero 86
Figura 4-38 Determinación radón-temperatura interior 6-8 febrero 87
Figura 4-39 Radón-Temperatura exterior medidor central alto (2,3 m) 22/12-18/1 87
Figura 4-40 Radón-Temperatura exterior medidor central alto (2,3 m) 18/1-22/2 88
Figura 4-41 Correlación radón-temperatura exterior 22/12-9/2 88
Figura 4-42 Radón-temperatura exterior 4-9 enero medidor central alto (2,3 m) 89
Figura 4-43 Correlación radón-presión atmosférica 4 enero 89

Figura 4-44 Radón-temperatura exterior 6-7 febrero medidor central alto (2,3 m).....90
Figura 4-45 Radón-Diferencia de temperatura medidor central alto (2,3 m) 90
Figura 4-46 Radón-Diferencia de temperatura medidor central alto (2,3 m) 91
Figura 4-47 Correlación radón-diferencia temperatura 22/12-9/2.....91
Figura 4-48 Correlación radón-diferencia de temperatura 27 diciembre.....92
Figura 4-49 Correlación radón-diferencia de temperatura 4 enero.....92
Figura 4-50 Correlación radón-diferencia de temperatura 6 febrero 93
Figura 4-51 Correlación radón-diferencia de temperatura 7 febrero 93
Figura 4-52 Radón-Precipitaciones medidor central alto (2,3 m) 22/12-18/01 94
Figura 4-53 Radón-Precipitaciones medidor central alto (2,3 m) 19/01-22/02 94
Figura 4-54 Correlación radón-precipitaciones 23 diciembre 95
Figura 4-55 Correlación radón-precipitaciones 7 febrero.....95
Figura 4-56 Descenso de radón con precipitaciones 30/01-31/01 96
Figura 4-57 Descenso de radón con precipitaciones 23 diciembre.....96
Figura 4-58 Radón-Humedad interior medidor central alto (2,3 m).....97
Figura 4-59 Radón-Humedad interior 6 a 8 febrero 98
Figura 4-60 Correlación radón-humedad interior 6-8 feb.....98
Figura 4-61 Radón-Humedad interior 1 a 2 febrero 99
Figura 4-62 Correlación radón-humedad interior 1 feb 99
Figura 4-63 Radón-Iluminación Luna 22/12-22/2 101
Figura 4-64 Relación entre concentración media diaria de radón-iluminación Luna (inicio 53 % iluminación) 101
Figura 4-65 Correlación radón-mareas terrestres 12-15 enero 102
Figura 4-66 Correlación radón-mareas terrestres 19-21 enero 102
Figura 4-67 Relación entre concentración media diaria de radón-iluminación Luna (inicio 100 % iluminación) 103
Figura 4-68 Correlación radón-mareas terrestres 21-27 enero 103
Figura 4-69 Radón-Mareas oceánicas 22/12-18/01 medidor central alto (2,3 m) 104
Figura 4-70 Radón-Mareas oceánicas 18/01-22/02 medidor central alto (2,3 m) 104
Figura 4-71 Radón-mareas oceánicas 24/12-2/1.....105
Figura 4-72 Correlación radón-mareas oceánicas 24 diciembre.....105
Figura 4-73 Correlación radón-mareas oceánicas 27 diciembre.....106
Figura 4-74 Correlación radón-mareas oceánicas 28 diciembre.....106

Figura 4-75 Correlación radón-mareas oceánicas 1 enero 107
Figura 4-76 Correlación radón-mareas oceánicas 2 enero 107
Figura 4-77 Radón-Mareas oceánicas 12-15 enero 108
Figura 4-78 Correlación radón-mareas oceánicas 12 enero 108
Figura 4-79 Radón-Mareas oceánicas 18-21 diciembre aula 21 109
Figura A1-0-1 Concentración de radón medidor ventana (0,8 m) 118
Figura A1-0-2 Radón-Presión atmosférica medidor ventana (0,8 m) 118
Figura A1-0-3 Radón-Viento medidor ventana (0,8 m) 119
Figura A1-0-4 Radón-Precipitaciones medidor ventana (0,8 m) 119
Figura A1-0-5 Radón-Temperatura exterior medidor ventana (0,8 m) 119
Figura A1-0-6 Radón-Temperatura interior medidor ventana (0,8 m) 120
Figura A1-0-7 Radón-Diferencia temperatura medidor ventana (0,8 m) 120
Figura A1-0-8 Radón-Humedad interior medidor ventana (0,8 m) 120
Figura A1-0-9 Radón-Mareas oceánicas medidor ventana (0,8 m) 121
Figura A1-0-10 Concentración de radón medidor puerta (1 m) 121
Figura A1-0-11 Radón-Presión atmosférica medidor puerta (1 m) 121
Figura A1-0-12 Radón-Viento medidor puerta (1 m) 122
Figura A1-0-13 Radón-Precipitaciones medidor puerta (1 m) 122
Figura A1-0-14 Radón-Temperatura exterior medidor puerta (1 m) 122
Figura A1-0-15 Concentración de radón medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m) 123
Figura A1-0-16 Concentración de radón medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m) 123
Figura A1-0-17 Radón-Presión atmosférica 22/12-18/01 medidor falso techo (3,75 m) 123
Figura A1-0-18 Radón-Presión atmosférica 19/01-22/02 medidor falso techo (3,75 m) 124
Figura A1-0-19 Radón-Viento medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m) 124
Figura A1-0-20 Radón-Viento medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m) 124
Figura A1-0-21 Radón-Precipitaciones medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m) 125
Figura A1-0-22 Radón-Precipitaciones medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m) 125
Figura A1-0-23 Radón-Temperatura exterior medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m) 125
Figura A1-0-24 Radón-Temperatura exterior medidor falso techo 18/01-22/02 (3,75 m) 126
Figura A1-0-25 Radón-Mareas oceánicas medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m) 126
Figura A1-0-26 Radón-Mareas oceánicas medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m) 126
Figura A1-0-27 Concentración de radón medidor central bajo (0,45 m) 127
Figura A1-0-28 Radón-Presión atmosférica medidor central bajo (0,45 m) 127

Figura A1-0-29 Radón-Viento medidor central bajo (0,45 m) 127
Figura A1-0-30 Radón-Precipitaciones medidor central bajo (0,45 m).....128
Figura A1-0-31 Radón-Temperatura exterior medidor central bajo (0,45 m) 128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen de concentración de uranio en minerales frecuentes [23] 17
Tabla 2-2 Peligro por radón en viviendas según la concentración en el suelo y la permeabilidad del terreno [28] 21
Tabla 2-3 Valores de concentración de Radio en materiales constructivos [28] 23
Tabla 2-4 Número de muestras obtenidas de distintos materiales en Europa [31] 23
Tabla 2-5 Muestras que emanan radón [31] 24
Tabla 2-6 Espesores necesarios para la estanqueidad al gas radón [32] 27
Tabla 2-7 Resultados obtenidos en la vivienda [36] 32
Tabla 3-1 Materiales empleados en la construcción de la ENM [46] 48
Tabla 3-2 Designación y ubicación inicial de los medidores de radón en el despacho 114 55
Tabla 3-3 Designación y ubicación de los medidores de radón en el despacho 114 a partir de 19 de enero 57
Tabla 3-4 Medidores de radón en el despacho 112 (elaboración propia) 59
Tabla 3-5 Niveles de correlación lineal 61
Tabla 4-1 Concentraciones medias obtenidas en distintos puntos del despacho 114, 22/12-18/01 63
Tabla 4-2 Evolución concentración de radón con ventilación apagada 69
Tabla 4-3 Concentraciones medias de medidores despacho 112 69
Tabla 4-4 Datos de temperaturas 27/12 y 4/1 91
Tabla 4-5 Datos de temperaturas 6/2 y 7/2 92
Tabla 4-6 Fechas de las fases de la Luna diciembre a febrero 100

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

"El radón está reconocido como la segunda causa de cáncer de pulmón en la población general después del tabaco" [1].

1.1 Introducción a la importancia del radón en espacios interiores

1.1.1 El radón y su capacidad radioactiva

El radón es un elemento químico perteneciente a la familia de los gases nobles que ocupan el grupo 18 dentro de la tabla periódica de los elementos (Figura 1-1). Al tratarse de un gas noble es inerte por lo tanto, presenta estabilidad química. Además, es un compuesto incoloro, inodoro, insípido, y altamente volátil a temperatura ambiente. Sin embargo, este elemento no muy conocido entre la sociedad en la actualidad, destaca por una característica más singular: es su propiedad radioactiva en la que nos centraremos, en especial, en el presente Trabajo Fin De Grado.

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [2]

El radón procede de una cadena de desintegración natural que tiene su origen en el uranio (Figura 1-2). Se presenta en la naturaleza en forma de tres isótopos (torio, actinio y radio) donde el Rn 222, del que ahora en adelante, nombraremos como radón, es el que presenta un mayor período de desintegración de los tres, con un tiempo de 3,8 días [3]. Por otro lado, este isótopo es el que mayor radioactividad desprende de todos y, por ello, las partículas que emite son las más perjudiciales. La radiación que genera este gas se considera de origen natural y, por tanto, el ser humano no ha sido partícipe en su creación.

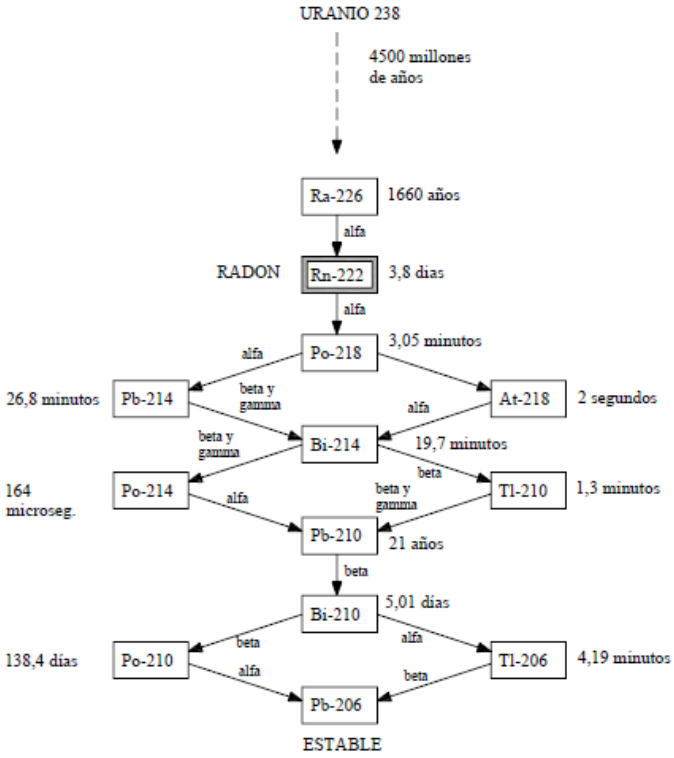


Figura 1-2 Cadena de desintegración del uranio [4]

La unidad empleada para medir la actividad radiológica es el Becquerel (Bq). Para el caso de este elemento, y más en concreto para medir su concentración en espacios cerrados, emplearemos los Becquerel por metro cúbico (Bq/m^3), es decir, unidades de radioactividad por unidad de volumen. Dicha unidad es la empleada para las distintas mediciones realizadas durante el transcurso del presente trabajo y manifiesta la desintegración de un átomo por segundo en m^3 de aire.

Este gas procede de diversas fuentes en la naturaleza, aunque se origina principalmente del uranio que encontramos en la corteza terrestre. Por otro lado, el radón es un gas con gran movilidad, es decir, es capaz de atravesar materiales. Además, su concentración en un espacio cerrado depende de factores como son la porosidad del suelo, los posibles orificios y/o fisuras en los elementos constructivos, así como diversos factores meteorológicos entre los que destacan la presión, el viento o la temperatura entre otros. Se sabe que, a un metro de profundidad en el subsuelo, es el lugar en el que se produce la mayor concentración de este elemento radioactivo [5]. Estos factores y otros que se desarrollarán en los siguientes apartados, favorecen la inmisión del radón en los edificios.

1.1.2 Factores determinantes en la acumulación de radón en espacios interiores

Como ya se ha expuesto anteriormente, el radón es un elemento que, por diversos factores que favorecen la exhalación del gas, se introduce en el interior de espacios cerrados incluyéndose al aire que respiran los individuos que se encuentren en su interior. Es en el interior de estos espacios donde la concentración de este elemento es mucho mayor, pudiéndose encontrar un rango de concentraciones que oscila entre los 10 Bq/m^3 y los 10000 Bq/m^3 [1] cifras que, en múltiples ocasiones, son más de las

permitidas por la normativa vigente para dichos países. A continuación, se nombrarán cuáles son estas fuentes y de qué forma se introduce este gas nocivo en el interior de las edificaciones.

En primer lugar, podemos destacar como fuente principal el terreno, es decir, la concentración de uranio que posee el subsuelo en el que se encuentra la edificación. Por tanto, la geología de la zona será un condicionante en la concentración.

De la misma manera, los materiales de construcción empleados en las edificaciones constituyen otra fuente. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) cree que, aproximadamente, el 20% de radón existente en una habitación es debido a la utilización de ciertos materiales constructivos [6].

Además, otras de las características importantes de este gas es su extrema movilidad. Este hecho se ve favorecido o dificultado por los materiales que encuentre en su camino para su exhalación. Podemos distinguir dos procesos de propagación: movimiento por convección y movimiento por difusión

Por otro lado, la inmisión del radón en espacios interiores se ve favorecida cuando existen juntas, grietas producidas en el suelo, etc. Por tanto, los muros de los sótanos, así como las soleras y conductos de saneamiento, constituyen múltiples vías de acceso. Debido a que el radón es mucho más pesado que el aire, hasta 9 veces, suele permanecer en las partes más bajas de las edificaciones y en los sótanos.

Asimismo, la concentración de radón depende de múltiples variables meteorológicas y geofísicas. En el presente trabajo analizaremos con profundidad la relación entre estos condicionantes y la cantidad de gas que produce la variación de las distintas variables. Entre ellas, podemos destacar:

- Viento
- Presión atmosférica
- Humedad ambiental y lluvias
- Temperatura

Por último, aunque no se consideran variables meteorológicas, pero guardan gran relación con ellas, son las estaciones del año y las mareas que también influyen en las variaciones de las concentraciones de radón.

1.1.3 Efectos nocivos para la salud del ser humano

Debido a su radioactividad, el gas presenta diversos efectos nocivos que dañan la salud del ser humano.

El principal de todos ellos es el cáncer de pulmón, que se genera como consecuencia de la radiación que se desprende durante la desintegración del radón y sus descendientes, que interacciona con los tejidos pulmonares que, a su vez, dañan su ADN. A nivel nacional, el gas radón es la principal causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras y la segunda, después del tabaco, en personas fumadoras como ya resaltó tanto Ileana Izverniceanu, Directora de Comunicación de OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) [7]. Actualmente, no se ha hallado que este gas provoque otros tipos de cánceres o produzca otros efectos sobre la salud. Sin embargo, tras su inhalación, puede dirigirse a otros órganos, aunque en niveles inferiores a los captados en los pulmones [8].

Además, de las diferentes fuentes naturales de radiación que el ser humano recibe, como puede ser la cósmica, el radón es la más importante de todas ellas [9]. A pesar de ello, es también la más controlable, pudiéndose analizar su concentración en distintos espacios y, en consecuencia, actuar para reducir estos niveles.

1.1.4 Concienciación social y normativa

El auge en la preocupación por el gas radón se ha producido en el último medio siglo. En al año 1990 aparece la primera recomendación de la Unión Europea sobre el gas radón como afirma José Miguel Rodríguez, Director del Instituto para la Salud Geoambiental [10].

A día de hoy, muchos medios de comunicación ponen de manifiesto la problemática de este gas. A continuación, observamos algunos ejemplos de esta creciente preocupación:

OURENSE

gas radón

Las medidas contra el radón serán obligatorias a partir de este verano

Figura 1-3 La Región. 13 de febrero de 2020. Brais Iglesias [11]

A CORUÑA

Exigen mediciones de gas radón en los edificios de la Xunta en A Coruña

Piden que sean más inmediatos en los edificios con espacios «soterrados ou semi soterrados»

Figura 1-4 La Voz de Galicia. 18 de febrero de 2020. César Quian [12]

El gas radón, vecino 'indeseable' que pone en riesgo la salud

Figura 1-5 Madrid Diario. 9 de marzo de 2020. Alba Cabareño Aina [13]

EU research project focuses on radon and NORM

Figura 1-6 World nuclear news. 28 de septiembre de 2020 [14]

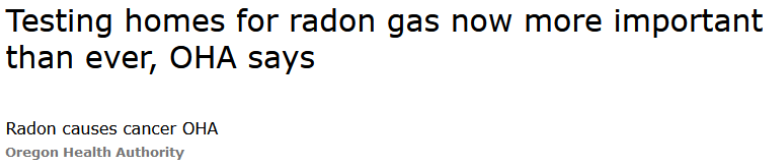
Una guía informa de los riesgos del gas radón en las viviendas, una de las principales causas del cáncer de pulmón

Es una hoja de ruta para reducir las radiaciones no solo en la nueva vivienda sino en edificios ya construidos

Figura 1-7 El Diario Extremadura. 21 de noviembre de 2020 [15]

Un plan para el gas radón

Figura 1-8 Diario de León. 15 de diciembre de 2020. Saida Lara [16]


Testing homes for radon gas now more important than ever, OHA says

Radon causes cancer OHA

Oregon Health Authority

Figura 1-9 KTVZ news channel. 12 de enero de 2021. Barney Lerten [17]

Podemos determinar por tanto, y gracias a las noticias reseñadas anteriormente del año 2020 y 2021, que hay una creciente preocupación a nivel tanto nacional como internacional de este problema ya que cada vez se identifican más territorios afectados y, en consecuencia, se sabe que una mayor parte de la población recibe sus nocivos y silenciosos efectos. Por tanto, hay que encontrar distintas soluciones efectivas que consigan mitigar las concentraciones de este gas en el interior de los edificios.

Además, a lo largo del pasado siglo se ha ido elaborando una serie de documentos normativos y de recomendaciones para controlar las concentraciones de radón que se producen en el interior de las edificaciones.

Actualmente, la normativa en vigor más reciente es la Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre de 2013. En particular, en el Artículo 54, "Radón en los lugares de trabajo" se especifica el máximo de radón en estos lugares, donde se impone un nivel de referencia para el promedio anual no superior a 300 Bq/m^3 de concentración de actividad en el aire [18], si bien deja libertad a los estados miembros de establecer límites inferiores, como en el caso de Estados Unidos que estable el nivel en 148 Bq/m^3.

En España, la trasposición a esta normativa se ha realizado recientemente al incluirse la Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón en el Código Técnico de la Edificación [19]. Cabe resaltar, que esta adaptación de la normativa se ha producido fuera de los plazos que establecía la Unión Europea (6 de Febrero de 2018) y que finalmente se ha establecido el límite de concentración media anual en 300 Bq/m^3, un valor mucho menos restrictivo que el recomendado por la OMS de 100 Bq/m^3.

1.2 Justificación

De acuerdo con la información anteriormente mencionada, queda expuesto que el radón es un problema a nivel mundial y que su comportamiento es en gran medida impredecible, pues depende de múltiples factores que modifican su concentración.

Sin embargo, aunque se conoce que distintos factores influyen de alguna forma en la concentración de radón son pocos los estudios que han analizado su relación y por tanto sus efectos sobre la concentración de radón no están claros.

Es necesario, por tanto, un estudio en profundidad de los distintos factores que afectan a la concentración de este gas en las edificaciones y poder determinar así las medidas de mitigación más efectivas. De esta forma, conseguiremos reducir que, desgraciadamente no hacer desaparecer, la cantidad de este gas que se infiltra en muchas viviendas.

En el lugar en el que se centra el desarrollo de este TFG, ya se han detectado con anterioridad elevadas concentraciones de este gas [20] [21]. En ambos casos, además se sugiere que los factores meteorológicos influyen en los niveles de este gas. Sin embargo, no se obtuvieron conclusiones definitivas sobre estos factores, debido a que las mediciones se realizaron durante el uso cotidiano de los edificios y espacios cortos de tiempo. Por tanto, es necesario realizar mediciones en condiciones más controladas que permitan determinar con mayor precisión no sólo la relación con los distintos factores meteorológicos, sino también la distribución de este gas en el interior de los edificios, la influencia de la geología en la que estas edificaciones se asientan, así como la correlación con otros factores menos comunes.

1.3 Objetivos

El estudio de los distintos factores que afectan a la concentración de radón en el interior del despacho 114 del edificio del Centro Universitario de la Defensa será el principal fin de estudio en el presente Trabajo Fin de Grado. Para lograrlo, se fijan los siguientes objetivos de forma concreta:

- Revisión de documentos científicos y técnicos sobre la influencia de diferentes factores como son los geológicos, constructivos y meteorológicos en las concentraciones de gas radón, buscando además la posible relación con otros factores, a priori, menos conocidos.
- Descripción en detalle del lugar de estudio mediante la recopilación de sus características constructivas y dimensionales.
- Determinación de las características geológicas de la zona de estudio y su relación con la concentración de radón.
- Evaluar la influencia de los factores constructivos del recinto estudiado: espacios colindantes, ventilación y materiales de construcción.
- Analizar la influencia de las variables meteorológicas (viento, presión atmosférica, temperatura, precipitaciones y humedad interior) sobre la concentración de radón en el espacio examinado.
- Investigar el posible efecto de otros factores en la concentración de radón.

Por tanto, la finalidad última del presente trabajo consiste en contribuir al conocimiento del comportamiento del gas radón en el interior de los edificios para, en pasos posteriores de esta línea de investigación, ser capaces de diseñar y emplear estrategias óptimas de mitigación. Al mismo tiempo se pretende sensibilizar sobre el importante problema que implica este gas actualmente.

1.4 Metodología y planificación general

En este apartado se pretende exponer, de forma general, la estructura que se ha empleado para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, se ha realizado una búsqueda bibliográfica en profundidad de diferentes estudios e investigaciones relacionadas con el gas radón en fuentes como Scopus, Science Direct, Google Scholar, y otras páginas web de carácter técnico-profesional. Esta información queda reflejada en el Capítulo 2.

En segundo lugar, se ha recopilado la información disponible acerca de las características constructivas del despacho 114 del edificio del CUD. Para ayudar en su descripción, se ha elaborado un modelo CAD empleando el software Siemens NX. En el Capítulo 3 queda reflejado el análisis de dicho recinto.

Por otra parte, en el Capítulo 3 también se lleva a cabo una descripción de los equipos y las metodologías empleadas para la toma de datos experimentales.

Seguidamente, se ha realizado la toma de datos, los cuales han sido analizados mediante correlaciones de variables durante 2 meses tal y como se refleja en el Capítulo 4.

A partir de estos resultados, en el Capítulo 5, se han obtenido conclusiones sobre los distintos factores estudiados y se han propuesto diferentes líneas futuras para continuar esta investigación.

Por último, en el Capítulo 6 se dispone de la bibliografía empleada para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, se incluye un anexo que suplementa la información de este TFG.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Factores geológicos que afectan a la inmisión del radón en edificios

2.1.1 Composición del subsuelo

Entre los distintos factores geológicos, la composición del terreno en el que se asienta la edificación es el más importante de todos [22]. El suelo suele representar al menos el 80 % de la inmisión de radón en las edificaciones [4].

El radón se genera a partir del radio, pero si nos remontamos al origen de esta cadena, encontramos que es el uranio el origen de este proceso. Este elemento se encuentra en la corteza terrestre y, por lo tanto, la cantidad de uranio que se encuentre en el suelo es un factor que determina la capacidad de generar gas radón. Sin embargo, no todos los suelos comparten la misma cantidad de uranio si no que dependen del mineral en los que se encuentra (Véase Tabla 2-1).

Minerales frecuentes	Valores medios de Uranio (ppm)[1]
Cuarzo	1,7
Feldespatos	2,7
Biotita	8,1
Moscovita	11,8
Epidota	43
Monacita	3000
Esfena	280
Zircón	1330

Tabla 2-1 Resumen de concentración de uranio en minerales frecuentes [23]

Por tanto, es en aquellas rocas en las que encontramos uranio el lugar en el que se desarrollan los átomos de radio. Sin embargo, ambos elementos, tanto el uranio como el radio, se encuentran en estado

[1] ppm: partes por millón

sólido y no tienen la capacidad de desplazarse. El radón, al encontrarse en estado gaseoso, aprovechará las fracturas y poros del suelo para propagarse en altura y alcanzar de esta manera la superficie del suelo.

Para determinar la cantidad de gas que emana de las rocas se emplea el concepto *exhalación*. Por otro lado, para analizar el movimiento del gas entre las fracturas y poros del terreno se utiliza el parámetro *emanación* (Figura 2-1).

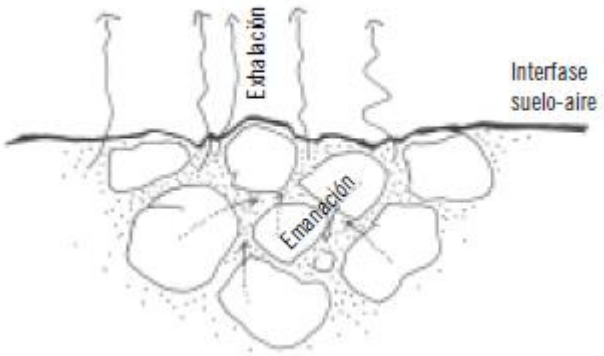


Figura 2-1 Exhalación y emanación del gas [6]

Además, otros dos factores que serán analizados más adelante y que determinan la capacidad de exhalación del radón son la porosidad y la permeabilidad [24]. Está demostrado que los suelos arcillosos tienen una cantidad alta de uranio por lo que se considerarían fuentes de radón, pero la cantidad de gas que se exhala es reducida debido a las características impermeables de las arcillas. Por otro lado, los suelos que contienen rocas calcáreas tienen menor concentración de uranio pero, sin embargo, son permeables y presentan múltiples fracturas, por lo que el radón se libera de una forma más sencilla hacia la superficie y la cantidad que llega es mucho mayor [25].

Por consiguiente, es necesario el estudio del origen de las fuentes de uranio, las rocas. Podemos clasificar las rocas, según su origen, en:

- Rocas sedimentarias: se producen a partir de acumulación de restos orgánicos o de la compactación y cementación de otras rocas. El uranio en este tipo de rocas varía como consecuencia de factores como pueden ser el origen de sus elementos radioactivos o la actividad radioactiva que desarrollan [26]. Además, este tipo de rocas suelen tener menos uranio que las rocas de la que procedían, disminuyendo así la cantidad de elementos radioactivos. Sin embargo, las rocas sedimentarias suelen ser rocas muy porosas por lo que favorecen la difusión del radón. Las calizas son las rocas sedimentarias con mayor concentración en uranio. En España podemos encontrar este tipo de rocas en depósitos de arenisca principalmente [27].
- Rocas ígneas: representan la mayor proporción en la corteza terrestre, siendo más de un 90% del volumen de esta capa sólida [22]. El uranio en este tipo de rocas se relaciona según la cantidad de óxido de sílice que contienen. Esta relación se debe a que se ha observado que hay un incremento de la radiactividad a mayor contenido de sílice. Además, hay que tener en cuenta, que el sílice está presente en gran cantidad en este tipo de rocas. A continuación, en la Figura 2-2 podemos observar la clasificación de las rocas ígneas según el porcentaje de este compuesto. Pertenecen a este tipo de rocas, los granitos, que tienen el mayor nivel de uranio de las rocas ígneas. A nivel nacional, tanto en el Sistema Central (Sierra de Guadarrama), así como en diversas zonas de Galicia en las que se concentra el granito, encontramos rocas ígneas [27].

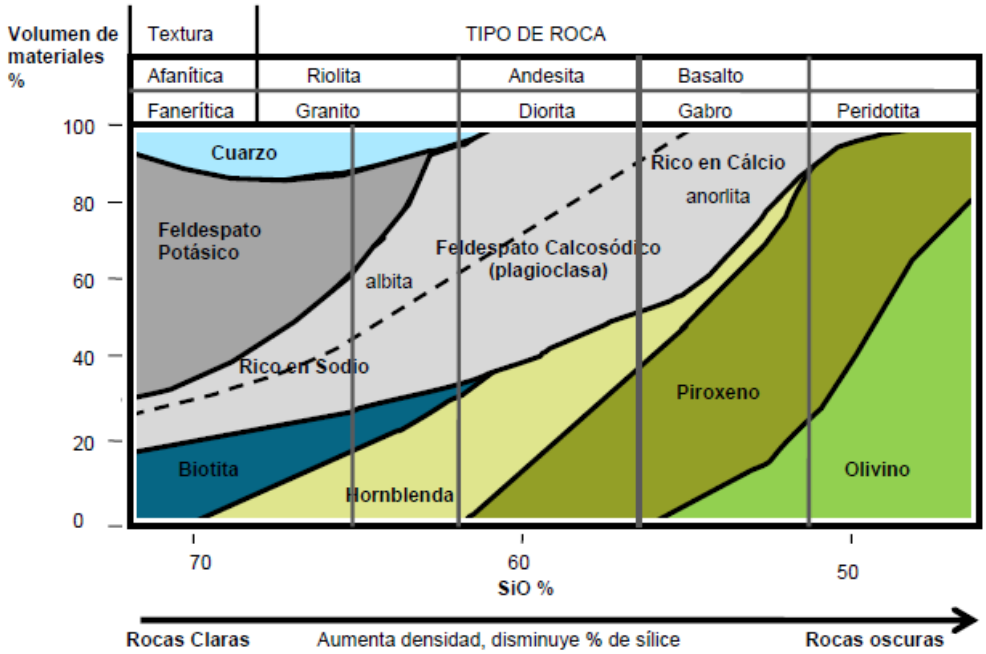


Figura 2-2 Clasificación de las rocas ígneas [22]

- Rocas metamórficas: surgen a partir de rocas que han sido sometidas a cambios tanto de temperatura como de presión. Entre este tipo de rocas encontramos las pizarras y esquistos que son las que mayores concentraciones de uranio contienen en esta categoría de rocas. En Salamanca, Badajoz o Cáceres hallamos los más importantes yacimientos de estos elementos [27].

Centrándonos una vez más en el territorio nacional, a modo de resumen, se presentan las zonas donde hay yacimientos de uranio (Figura 2-3) y un mapa de todo el territorio con los principales dominios geológicos (Figura 2-4).

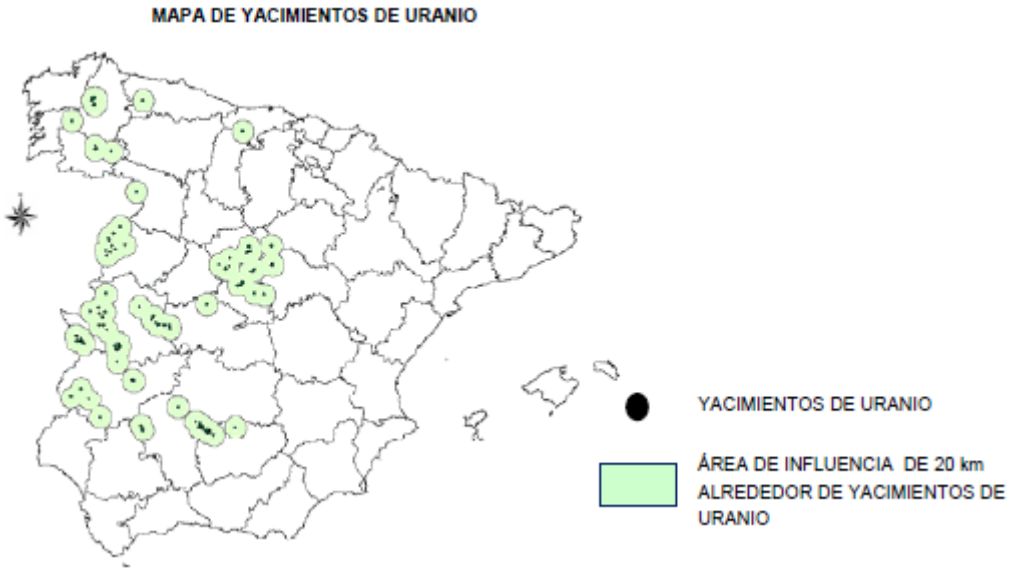


Figura 2-3 Yacimientos de uranio en España [22]

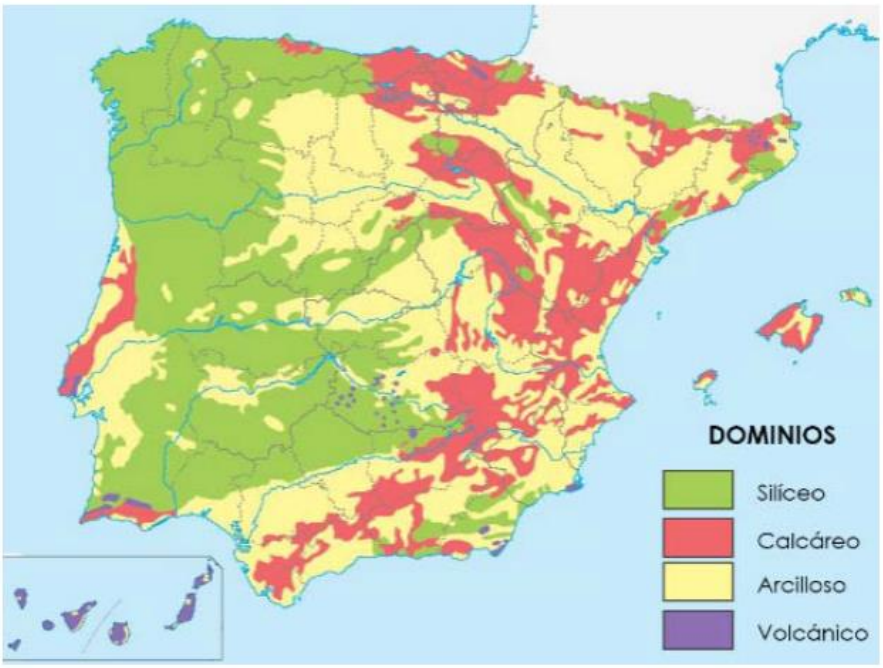


Figura 2-4 Mapa geológico de España [22]

2.1.2 Permeabilidad del terreno

Como ya concretamos anteriormente, el gas radón presenta gran movilidad. Sus principales mecanismos son los movimientos por difusión y por convección. La permeabilidad del suelo nos permite hallar la correlación entre la velocidad del gas radón a través de los poros presentes en el suelo o terreno con las presiones que existen en la zona. Cabe destacar la influencia de la permeabilidad en el movimiento por convección. Cuando se produce un gradiente de presiones entre el interior del edificio y el terreno, la cantidad de radón liberado será mayor cuanto más alto sea el valor de la permeabilidad del terreno.

En la permeabilidad intervienen las conexiones que hay entre los espacios de los distintos poros del terreno. Se suelen distinguir dos tipos de porosidad. Por un lado, la que producen los espacios entre los minerales que forman la roca denominada *porosidad intergranular*. Por otro lado, la generada por fracturas y discontinuidades recibe el nombre de *porosidad por fisuración*. A su vez, la permeabilidad depende de la humedad del suelo, así como de las variaciones del nivel freático.

En España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) emplea un criterio desarrollado en la República Checa [28] para clasificar los terrenos según su permeabilidad (véase Tabla 2-2) donde se indican concentraciones de radón en Bq/m^3 que se obtienen en una vivienda. Además, también se indica el potencial de exposición al radón en los edificios. Por ejemplo, si se posee unos valores de 40000 Bq/m^3 con un suelo de permeabilidad baja, la exposición al radón se considera media. En cambio, si el terreno posee una permeabilidad alta, para la misma concentración, la exposición al gas radón sería alta.

Concentración de Rn222 en terreno (Bq/m^3)

Exposición potencial al radón (EDIFICIOS)	**Permeabilidad baja*** (< 4.10^{-13} m^2)	**Permeabilidad media*** (4.10^{-13}-4.10^{-12} m^2)	**Permeabilidad alta*[2]** (> 4.10^{-12} m^2)
Baja <200 Bq/m^3	<30000	<20000	<10000
Media 200-400 Bq/m^3	30000-100000	20000-70000	10000-30000
Alta >400 Bq/m^3	>100000	>70000	>30000

Tabla 2-2 Peligro por radón en viviendas según la concentración en el suelo y la permeabilidad del terreno [28]

Por tanto, en los terrenos permeables, es decir aquellos que contengan una mayor cantidad de poros, el gas tiene mayor capacidad para desplazarse por el terreno de una forma más sencilla, alcanzando así la superficie.

El CSN ha desarrollado un mapa de toda la geografía nacional en el que se indica las zonas de acción prioritaria debido al potencial de radón que se produce en dichos lugares (Figura 2-5). En total constituye un 17 % del territorio nacional y poseen un potencial de más de 300 Bq/m^3 de este gas. Comparado con la Figura 2-4, la mayoría de la zona afectada (color naranja) posee un suelo silíceo, si bien hay que tener también en cuenta que, como acabamos de ver, la permeabilidad del terreno también influye en la determinación del potencial de radón. Por otro lado, las zonas claras contienen suelos arcillosos con muy baja permeabilidad y por lo tanto no muestran peligro potencial de radón.

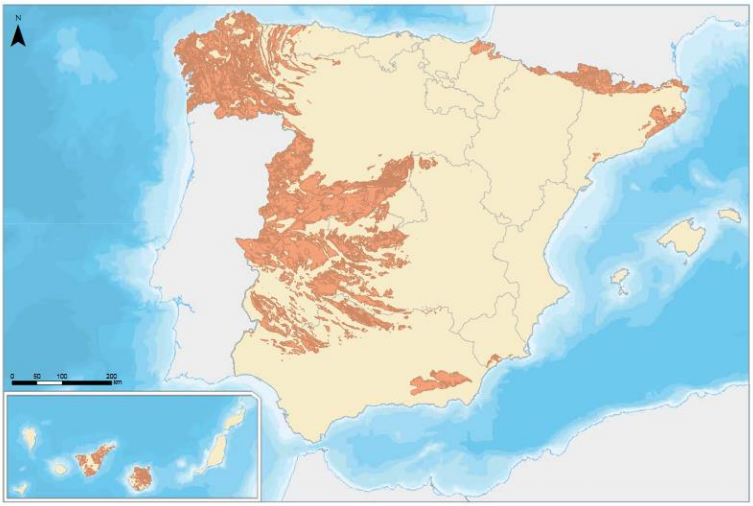


Figura 2-5 Zonas con potencial de radón >300 Bq/m^3 [29]

En conclusión, la permeabilidad del terreno constituye un factor muy influyente en la concentración de radón en las edificaciones ya que, aunque el terreno contenga alto contenido en radón, si su permeabilidad es baja, quedará recluido en el subsuelo.

[2] (*) Permeabilidad intrínseca: Propiedad de un medio o terreno que admite la circulación de gases o líquidos a través de él debido a la presión y la gravedad. Sus unidades proviene de la ley de Darcy y miden la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.

2.1.3 Saturación del agua en el terreno

La cantidad de agua contenida en el terreno condiciona la permeabilidad del suelo y, por tanto, la cantidad de radón exhalado se modifica según este factor. Si el grado de saturación del agua en el terreno es elevado, es más difícil que se produzca movimiento debido a que el agua presente en el suelo tiene un coeficiente de difusión menor al del aire y, por consiguiente, impide que se disuelvan los gases.

Por otro lado, cuando la saturación que se encuentra en el terreno en el que está la edificación mantiene el mismo valor en toda la zona, produce una acción favorable para evitar que el radón se exhale. Pero si este coeficiente es variable en el terreno, se produce el efecto contrario, debido a que la superficie del suelo contiene una alta cantidad de agua principalmente por las precipitaciones que se producen en la zona. Sin embargo, si en el lugar en el que se encuentra la edificación, el terreno está seco y, por tanto presenta mayor permeabilidad, se favorece la exhalación del radón a la atmósfera a través del propio edificio [30].

Cabe destacar, que si el terreno aumenta su impermeabilidad, se debería reducir la cantidad de este gas. Sin embargo, al encontrarse seco el suelo de la vivienda, el radón lo emplea como principal vía para introducirse en el interior de los edificios (Figura 2-6).

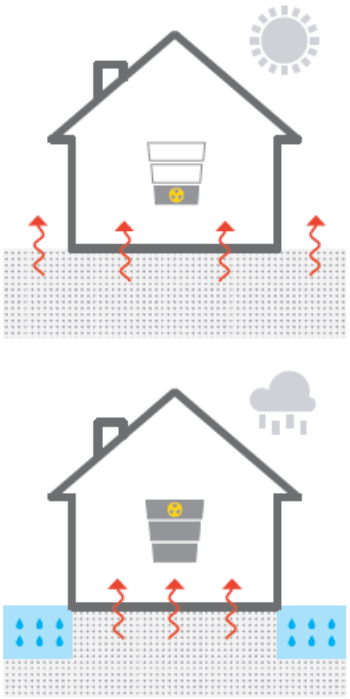


Figura 2-6 Capacidad de inmisión del radón según la saturación del agua en el terreno [30]

2.2 Influencia de factores constructivos en la concentración de radón

2.2.1 Materiales de construcción

La composición de algunos de los elementos constructivos que conforman una vivienda son, en muchas ocasiones, fuentes de exhalación del gas radón. Algunos estudios científicos determinan que los materiales de construcción pueden añadir una cantidad de entre 5 Bq/m^3 y 20 Bq/m^3 [6].

La gran parte de los elementos que se usan en la construcción de las edificaciones poseen unos valores de exhalación de radón mínimos, de menos de 10 $Bq/m^2 \cdot h$ [25]. En cambio, el uso de cenizas volátiles procedente de lugares como centrales térmicas al igual que de residuos procedentes de fertilizantes, que se añaden a la composición de los materiales constructivos, poseen altos valores de radiactividad.

Por otro lado, existen materiales de origen natural como pueden ser los granitos que, como ya se expuso anteriormente en el apartado 2.1.1, constituyen uno de los materiales de construcción con mayor concentración en radón. El contenido de uranio de estos elementos depende de su composición que a su vez está influenciado por el lugar de procedencia. Por ello, los materiales empleados en la construcción con un considerado nivel de radio como son los ladrillos cerámicos, yesos y cementos poseen diferentes concentraciones en base a su lugar de origen. A continuación, en la Tabla 2-3 podemos observar los valores registrados por un estudio de *"The National Radiation Protection Institute"* en la República Checa [28].

Materiales de construcción	Mínimo (Bq/kg)	Máximo (Bq/kg)
Ladrillos	45,2	143
Hormigón	21,1	192
Arena	13,3	41
Arcilla	40,9	199
Cemento	36,5	88
Cenizas volantes	75,5	363
Limos	12,5	94
Yesos	12,1	86

Tabla 2-3 Valores de concentración de Radio en materiales constructivos [28]

Asimismo, un estudio realizado en diversos países de Europa [31] recoge muestras de distintos materiales constructivos y mide distintas variables en relación con el radón. En Tabla 2-4, se describen los datos obtenidos expresados en el número de ejemplos empleados según los materiales. Cabe destacar, que estas tablas presentan un resumen del número de muestras totales empleadas en el experimento.

País	Ladrillos	Hormigón	Cemento	Agregados	Losas	Total
Bélgica	4	-	-	-	-	4
Dinamarca	1	8	1	2	-	12
Francia	8	14	-	-	25	47
Alemania	203	238	9	25	-	475
Italia	67	18	80	32	-	197
Polonia	6	-	4	-	-	10
Portugal	10	11	7	43	-	71
Reino Unido	14	3	-	-	-	17
Total	313	292	101	102	25	833

Tabla 2-4 Número de muestras obtenidas de distintos materiales en Europa [31]

En la Tabla 2-4 podemos encontrar un resumen de algunas muestras que se utilizaron durante el estudio. Se emplearon en total 1929 muestras procedentes de diversos puntos de Europa. De este total número de muestras, 1549 presentaban concentración de radón y por último, de las muestras que presentaban concentraciones de radón, 1174 emanaban este gas (véase Tabla 2-5 con un resumen de las principales muestras).

Material de construcción	**Nº de muestras**	**Emanación de radón (%)**	
		Media	**Rango**
Ladrillos	337	3,6	0,1-67
Hormigón	260	19	1,0-85
Cemento	122	12	0,7-56
Agregados	98	14	0,4-63
Losas	32	15	8,0-50

Tabla 2-5 Muestras que emanan radón [31]

El estudio concluye que, a pesar del gran número de muestras estudiadas, no se puede analizar con profundidad la cantidad de radón que cada material aporta al interior de los edificios. Esto se debe a múltiples aspectos como las técnicas empleadas para medir la concentración, la forma y tamaño de cada una de las muestras entre otros. Por consiguiente, se necesita desarrollar un protocolo que permita tener en cuenta todos estos factores, para así poder obtener mayores datos de los materiales y de su aportación de radón.

Se concluye por tanto que, aunque se reconoce que los materiales de construcción son la segunda fuente de radón [25], después del terreno, no se puede determinar con certeza en qué medida afectan en la concentración de radón en edificios.

2.2.2 Vías de acceso del radón en los edificios

En los terrenos sobre los que se encuentran los edificios, se produce una diferencia de presiones. Esta variación de presión entre los espacios cerrados de las edificaciones y los poros del terreno, generan un flujo de radón desde el suelo hacia estos edificios. Además, si añadimos la alta movilidad que posee este gas, se consiguen altas concentraciones en los espacios cerrados, lo que supone un peligro para los habitantes que se encuentran en él. En el documento *Protección frente a la inmisión de gas radón en los edificios* [6] se presentan varios posibles caminos de acceso del radón en los edificios.

Hay muchas vías por las que el radón se introduce en los edificios (Figura 2-7). Entre las más comunes, se encuentran:

- Soleras en sótanos: estos elementos están compuestos principalmente de hormigón armado. Se suelen usar láminas impermeables para reducir la humedad. En los puntos de intersección con paredes verticales, se emplean juntas, elementos indispensables para la construcción de un edificio. Son por estas, donde se producen los flujos de radón. Por otro lado, los poros del propio hormigón o las fisuras de la solera también contribuyen a que este gas se introduzca en la vivienda.
- Muros de sótano: los muros que se encuentran en contacto con el terreno constituyen otra posible vía de acceso debido a que generalmente son permeables al flujo de gas radón.
- Conductos de saneamiento: las tuberías verticales que unen los baños, cocinas y aseos con los depósitos o arquetas horizontales que se encuentran en las soleras de los sótanos,

constituyen otra vía de acceso para el radón. Debido a que las arquetas poseen poca estanqueidad, el radón penetra y asciende hacia los distintos espacios del edificio. Aunque las cantidades más altas de radón se encuentran en las plantas más cercanas al suelo, se han hallado elevados valores también en las plantas más altas.

- Cámaras de aire de muros: se emplean para aislar y proteger frente a la humedad principalmente. En algunos casos, las chimeneas conectan distintos pisos a distintas alturas, o incluso conectan con el sótano o con las cámaras de aire, de tal forma que el gas radón puede ascender a través de ellas y llegar a los pisos más altos.
- Forjados sanitarios: en las cámaras de aire que se encuentran debajo de estos forjados, se acumula el gas que viene del suelo. Si no están ventilados, el radón atravesará el forjado y penetrará en el edificio.

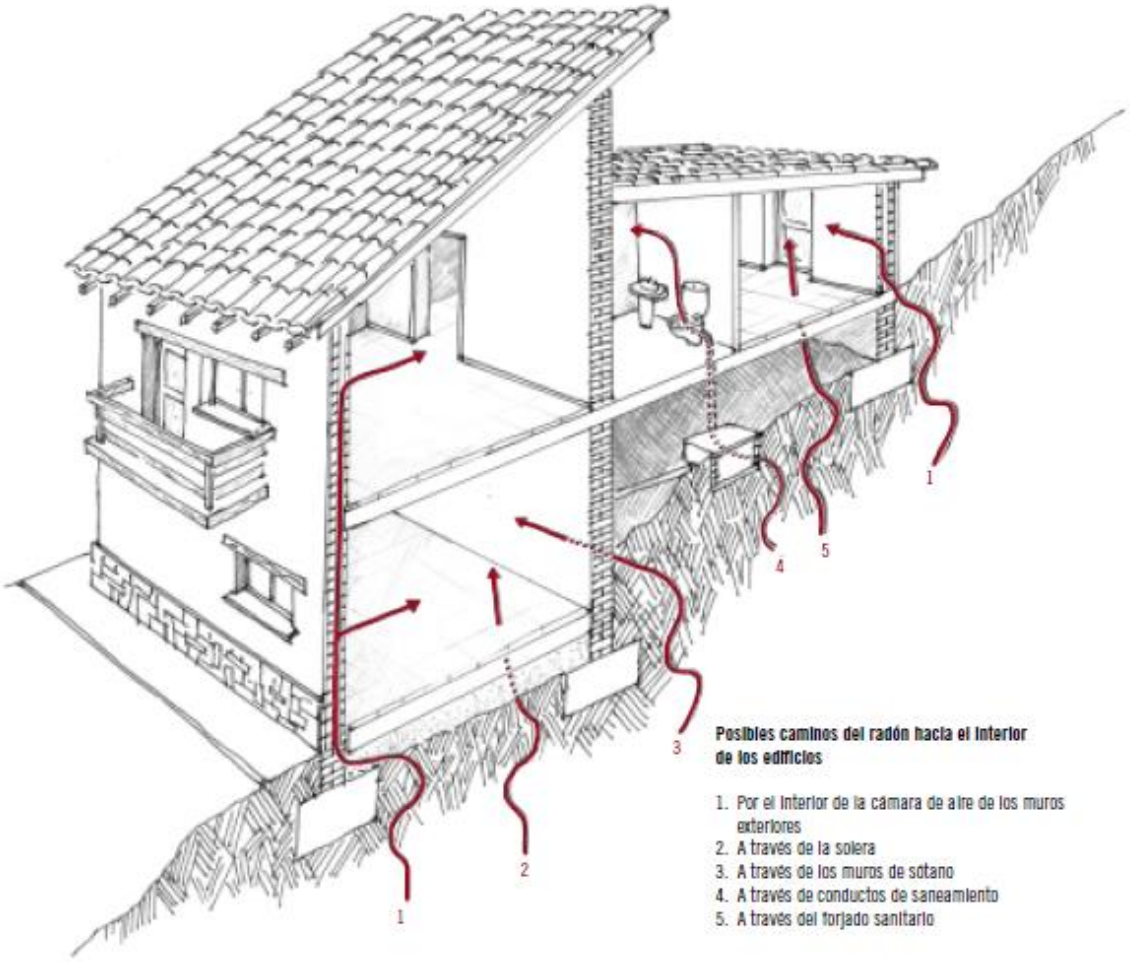


Figura 2-7 Principales vías de entrada del gas radón en edificios [6]

2.2.3 Arquitectura de los edificios

El diseño de los edificios es un factor que afecta en el nivel de radón. A continuación, se describen las características que tienen una mayor influencia:

- Comunicación entre sótanos y las plantas habitables: el gas se desplaza desde las zonas más cercanas al suelo hacia las zonas habitables más altas. Para reducir este efecto, se emplean puertas estancas.
- Proporción de la envolvente del edificio en contacto con el terreno: cuanta más superficie en contacto con el terreno, mayor es la probabilidad de que el radón se inserte en los edificios.

Las viviendas que poseen sótano tienen un mayor contacto. Por otro lado, un edificio que tenga su planta baja abierta sobre pilotes tiene un riesgo muy bajo ya que sólo está en contacto en los puntos de acceso (Figura 2-8).

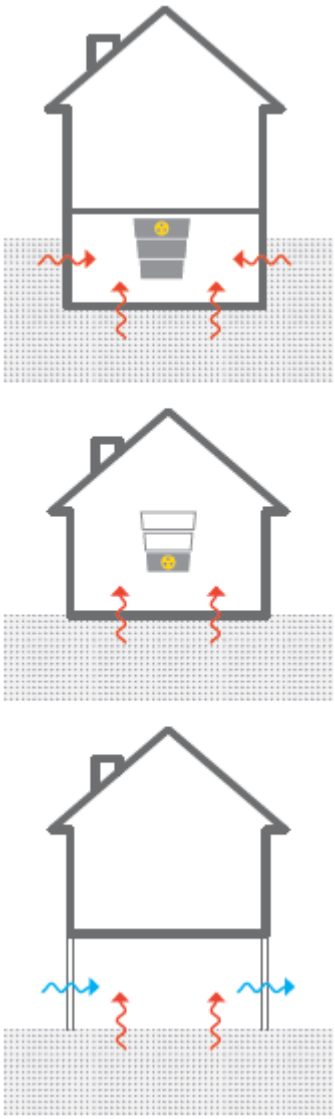


Figura 2-8 Influencia de la proporción de la envolvente en contacto con el terreno [30]

- Instalaciones u otros elementos que pasen a través de la envolvente: elementos como una bajante que atraviese la solera rompen la homogeneidad. De esta forma se permite el transporte del gas al interior.
- Tipo de solución constructiva: si hay un mayor número de obstáculos en la vía de entrada del gas radón, más dificultades tendrá para introducirse en la vivienda. Un ejemplo de obstáculo son los edificios que cuentan con cámaras sanitarias (Figura 2-9).

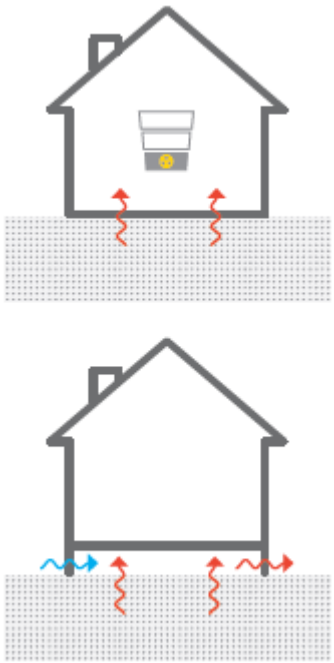


Figura 2-9 Influencia de la construcción de una cámara sanitaria [30]

- Permeabilidad a los gases de la envolvente: si el cerramiento posee fisuras o grietas o porque está compuesto de un forjado de madera será más permeable. Por tanto, será más fácil que el radón penetre en el edificio.

En relación a este factor, un estudio llevado a cabo en Bélgica por *CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction)* [32], expresa los espesores necesarios para conseguir la estanqueidad frente al radón para algunos materiales típicamente empleados en muros. Se debe tener en cuenta que los espesores mostrados a continuación se refieren a condiciones ideales, es decir sin ningún tipo de fisura ni errores de ejecución en las soleras o láminas (Tabla 2-6).

Materiales de construcción	Espesor necesario para la estanqueidad del gas
Hormigón	> 180 mm
Láminas bituminosas	> 2 mm
Láminas de Polietileno	> 0,9 mm
Yeso	> 0,55 mm
Gres	> 0,5 mm
Resina de poliuretano	> 1,5 mm
Resina epoxi	> 0,3 mm

Tabla 2-6 Espesores necesarios para la estanqueidad al gas radón [32]

2.2.4 Soluciones arquitectónicas para reducir el radón en los edificios

En España, el CSN[3]en sus publicaciones *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios* [6] y *Guía de rehabilitación frente al radón* [30] desarrollan las principales técnicas constructivas empleadas para minimizar la concentración de radón en el interior de los edificios.

Para los edificios en construcción, el CSN ha desarrollado un organigrama en el que clasifica los edificios según categorías en función de la exposición al radón (Figura 2-10). Para realizar esta clasificación, cuyas categorías se describen a continuación, se deben realizar antes mediciones en el terreno de tanto la concentración de radón como de permeabilidad.

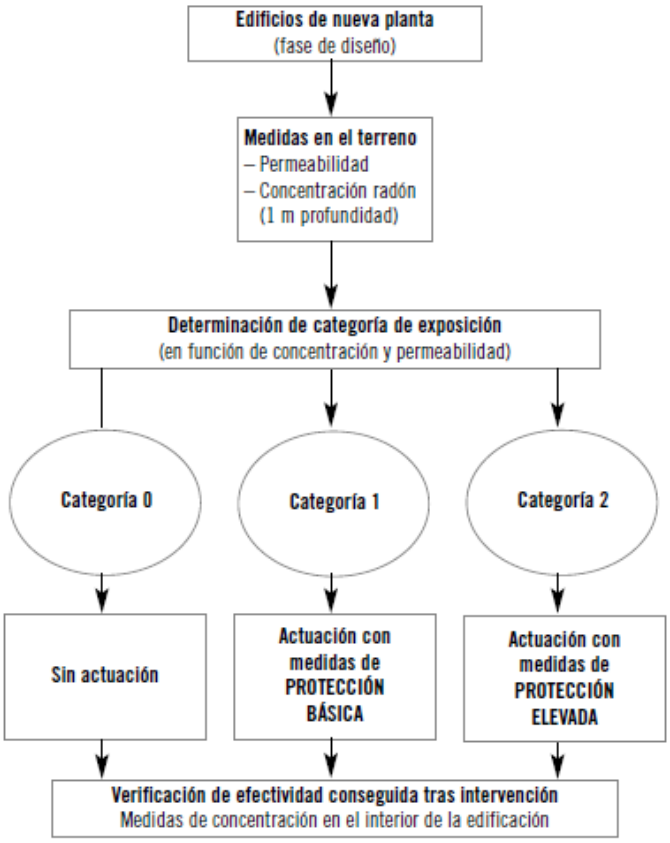


Figura 2-10 Actuaciones para edificios de nueva obra [6]

- Categoría 0: incluye las zonas que tienen bajos valores de exhalación de radón, ya sea una baja permeabilidad del suelo o por presencia escasa de uranio o radio. Para los edificios que se encuentren en esta categoría, no se necesitan técnicas de protección en el proyecto arquitectónico inicial.
- Categoría 1: los valores de nivel radón son más altos. Por tanto, es aconsejable emplear técnicas que protejan la vivienda de forma básica y efectiva.
- Categoría 2: Se obtienen los valores más elevados de concentración de radón. Las medidas empleadas para reducir el radón, deben ser muy efectivas. Normalmente, se emplean técnicas de presurización o extracción donde se usan extractores mecánicos. Además, se utilizan barreras antiradón para aumentar la efectividad.

Para los edificios existentes, las medidas de protección son parecidas a las que se emplean en los edificios de nueva obra.

[3] CSN: Consejo de Seguridad Nuclear

Para reducir la exposición al radón, según las categorías anteriormente mencionadas, se emplean las siguientes medidas:

Categoría 1: protección básica: Entre los principales sistemas, destacan:

- Sistemas de barreras antiradón: Se emplean para evitar que el radón presente en el terreno se introduzca en los edificios. Por ello, es necesario colocarlo en toda la superficie en contacto con el suelo.

  La membrana (normalmente constituida de polietileno o caucho) puede emplearse tanto por la cara exterior del elemento a proteger, como por la interior (Figura 2-11).

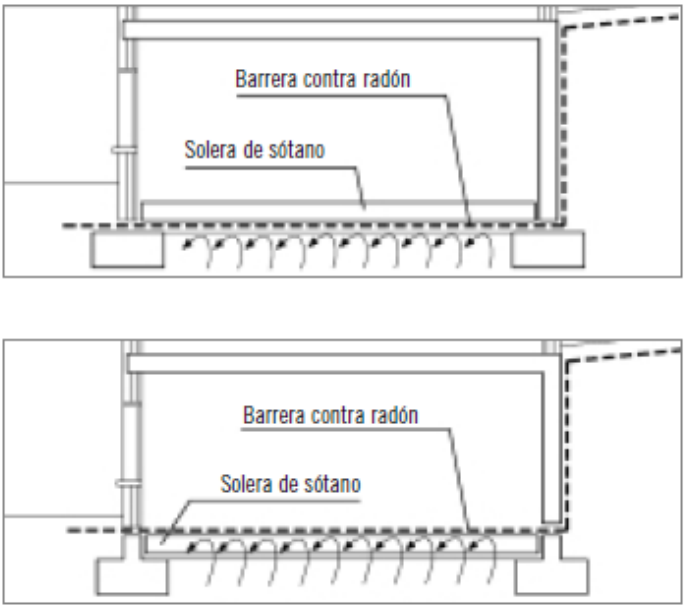


Figura 2-11 Sistema de barrera antiradón [6]

- Sistema de extracción natural: Expulsan el aire que contiene radón procedente del terreno sobre el que se encuentra la vivienda. Además, se expulsa al exterior y así se evita que entre en el interior del edificio.

  En este tipo de sistemas, la permeabilidad del suelo influye en el funcionamiento. Si este valor es alto, se conseguirá mayor efectividad ya que el radón se desplazará entre los poros hacia el punto de captación. Por el contrario, si la permeabilidad es baja, se puede rellenar con grava el área de contacto del edificio con el suelo.

  Este sistema se compone de los siguientes elementos (Figura 2-12):

  - Punto de captación: Espacio bajo la vivienda que permite el paso de los gases del terreno a su interior.
  - Conducto de evacuación: Dirige los gases desde el punto de captación hasta el exterior de la edificación. Se suelen utilizar tuberías de plástico de diámetro 110 a 125 mm [6].

  Los sistemas de extracción natural son empleados en Galicia en edificios de nueva construcción [33].

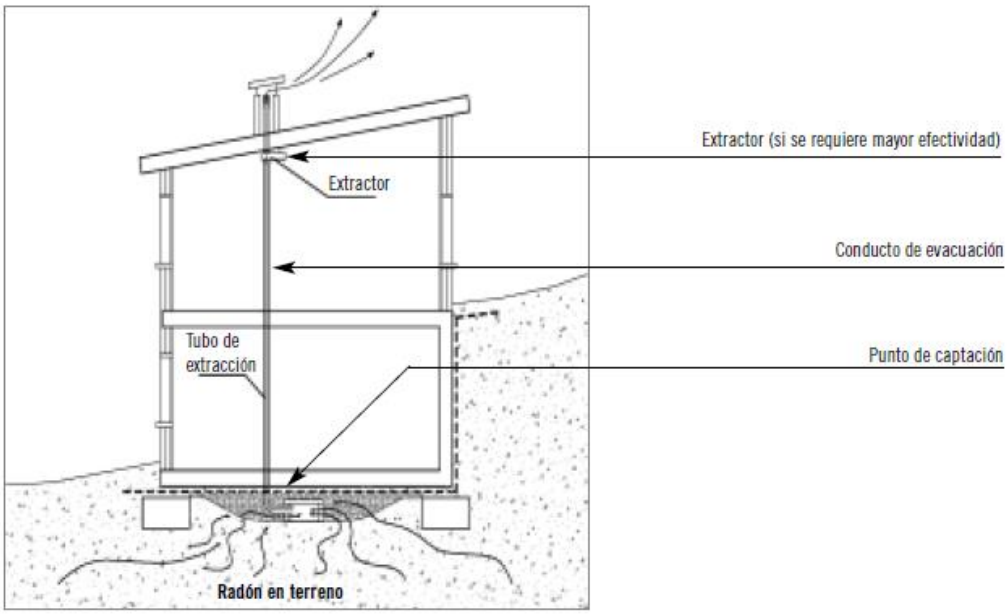


Figura 2-12 Sistema de extracción natural [6]

Categoría 2: protección elevada:

Sistemas de extracción forzada: estos conjuntos describen un funcionamiento similar a los sistemas de extracción natural. Además, utilizan un extractor para mejorar el tiro de evacuación. Ciertos factores influyen en su efectividad como son la concentración de radón en el suelo o la permeabilidad del terreno.

- Sistema de presurización: el flujo de aire del extractor se invierte para introducirlo en el punto de captación. De esta forma, se generan presiones alrededor de este punto que obligan al gas a encontrar otras vías hacia la atmósfera (véase Figura 2-13).

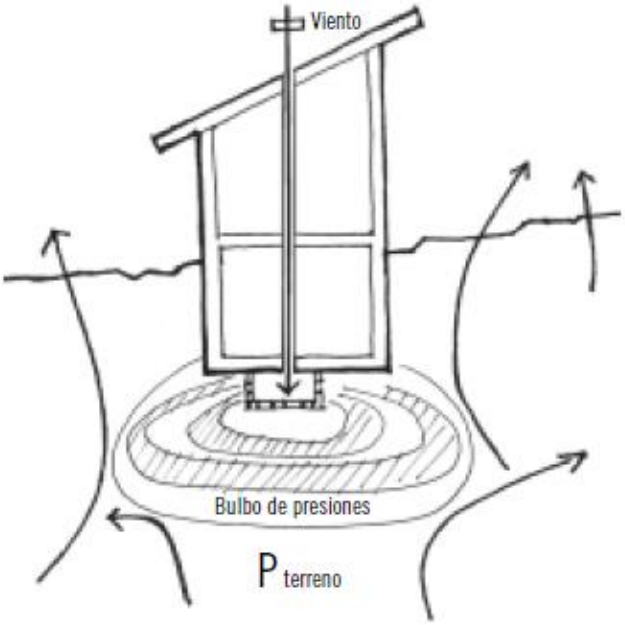


Figura 2-13 Sistema de presurización [6]

- Sistema de ventilación de cámara de forjado sanitario: para evitar problemas de humedad, se crea un forjado sanitario, es decir, un forjado elevado sobre el terreno, en vez de apoyar

una solera de hormigón en contacto con el terreno. La cámara de aire que queda (Figura 2-14) se emplea como espacio de captación de radón. Con muretes de apoyo puede evacuarse el gas hacia el exterior.

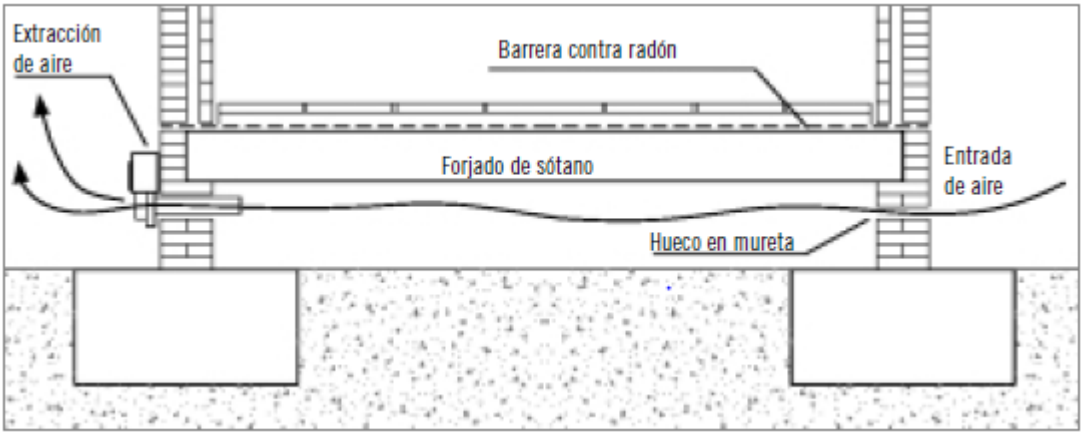


Figura 2-14 Sistema de cámara de forjado sanitario [6]

- Complemento a los sistemas de extracción forzada con barreras antiradón: Se combinan las barreras antiradón con los sistemas de extracción forzada. Se emplean en aquellos elementos de cerramiento en contacto con el suelo.

2.2.5 Ventilación

Cabe pensar que si un edificio se ventila de forma natural, es decir, sin usar extractores que mejoren la ventilación, se produce una reducción en la concentración de radón. Este hecho se debe a que se produce un intercambio de aire con el exterior, donde hay una menor concentración de radón que en el aire del interior [6]. Sin embargo, cuando se introduce aire desde fuera de un espacio habitado, las condiciones térmicas en el interior del edificio se ven mermadas y por tanto es necesario la instalación de equipos de frío o calor, lo que supone un mayor consumo energético. En este tipo de casos, la ventilación no es una técnica que se recomiende. Además, la ventilación interior es una técnica recomendada exclusivamente en lugares con baja concentración de radón según las recomendaciones de la Xunta de Galicia [33].

En cambio, si sólo se expulsa aire del edificio, o si el aire nuevo que se introduce procedente del exterior es menor a lo que se expulsa, se puede desarrollar una depresión interior que incremente la succión del radón procedente del suelo. De esta forma, aumentan los niveles de concentración de radón en el interior del edificio. Además, un estudio desarrollado en un módulo, mantenido la mayor parte del tiempo cerrado, sin ventilación natural y que únicamente se abrió para mantenimiento en ciertos días, enuncia que este efecto se puede producir en mayor medida en aquellos recintos donde la extracción de aire se produce a través de ventanas o chimeneas [4].

Por otro lado, en la actualidad los edificios y viviendas poseen diferentes tipos de sistemas de ventilación. Cada uno tiene distintas características que pueden afectar a la concentración de radón que se encuentra en el interior [34]. Los principales sistemas de ventilación son:

- Sistema de ventilación natural: este sistema induce entradas y salidas de aire natural tanto en posiciones bajas y altas de la fachada para habitaciones húmedas.
- Sistema de ventilación por extracción mecánica: el aire entra de forma natural en los dormitorios a través de entradas de aire naturales. Este aire se traslada por la vivienda antes de ser extraído de forma mecánica en las zonas húmedas de la casa como baños o la cocina.

- Sistema de ventilación mecánico equilibrado: el aire entra y sale en la vivienda en ambos casos de forma mecánica.
- Sistema de ventilación de suministro mecánico: El aire se introduce de forma mecánica en las zonas de estar y luego se extrae a través de salidas naturales en las habitaciones húmedas de la vivienda (baños).

Cabe destacar, que los sistemas de ventilación naturales se basan en la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior y en el viento que genera ventilación. Por este motivo, estos sistemas se emplean en lugares con baja contaminación ya que es más complejo introducir sistemas que controlen la contaminación si sólo hay ventilación pasiva [35].

Además, la concentración de radón interior depende de la cantidad de aire que se introduce y del nivel de despresurización que se produce en el interior de la vivienda. Se ha observado que el sistema de ventilación por extracción mecánica genera una mayor despresurización que el sistema de ventilación de suministro mecánico. Debido a este factor, se ha observado que a lo largo del tiempo la tasa de entrada de radón en el interior del edificio es mayor en el sistema de extracción mecánica que en el de suministro mecánico. Por tanto, los sistemas de suministro mecánico son más efectivos en la protección contra el radón.

A pesar de ello, para todos los tipos de ventilación, cuando la vivienda se vuelve más hermética, la concentración de radón tiende a aumentar. Este aumento se produce debido a una disminución de la capacidad de paso del aire al interior de la vivienda que genera un impacto inicial en una disminución de la tasa de intercambio de aire de la vivienda, especialmente en los edificios sin sistema de ventilación o con sistema de ventilación natural. Además, una disminución de esta capacidad podría hacer aumentar la despresurización del interior de la vivienda y, como consecuencia, aumentar la tasa de entrada de radón. En cambio, si se emplea un sistema de ventilación eficiente se puede reducir este aumento debido a que el radón se diluye gracias al intercambio de aire que estos sistemas generan. En conclusión, cuando se lleve a cabo un reacondicionamiento térmico en un edificio, se debe emplear un sistema de ventilación eficiente para reducir la exposición de sus ocupantes al radón.

Por último, se ha demostrado que si la tasa de intercambio de aire en una vivienda es bajo, los niveles de radón aumentan en la edificación. Este efecto se ve acentuado en invierno debido a que la mayoría de las ventanas están cerradas y los periodos de ventilación cuando se abren las ventanas son menor duración [36]. Además, si las puertas que se encuentran dentro de la vivienda están cerradas, reducen este flujo de aire que, si estuvieran abiertas, se transmitiría por la vivienda Para ilustrar este fenómeno, la Tabla 2-7 muestra los resultados obtenidos en una vivienda en la que se probaron tres escenarios de ventilación.

Nº del experimento	Condiciones del experimento	Tasa de intercambio de aire (h^{-1})	Concentración de radón interior (Bq/m^3)
1	Todas las puertas interiores abiertas y aire acondicionado activado	0,41	193
2	Todas las puertas interiores abiertas y aire acondicionado desactivado	0,49	176
3	Todas las puertas interiores cerradas y aire acondicionado activado	0,22	246

Tabla 2-7 Resultados obtenidos en la vivienda [36]

Como se puede observar la diferencia entre el experimento 1 y 2 es mínimo por lo que el aire acondicionado no parece modificar la tasa de ventilación. Sin embargo, en el experimento 3, cuando se encuentran todas las puertas interiores cerradas, la tasa de intercambio de aire es mucho menor respecto a los otros casos. Además, se observa que la concentración interior de radón aumenta motivado principalmente por la escasa ventilación que se produce en el interior, al no circular el aire entre los distintos espacios de la casa.

En conclusión queda demostrado que si la cantidad de aire que se introduce es menor que la de aire expulsado, se desarrolla una depresión interior y que por tanto, se genera un mayor aporte de aire del suelo con contenido en radón aumentando así la concentración interior. Este fenómeno se ve acentuado si la vivienda carece de sistema de ventilación o este no es eficiente. Del mismo modo ocurre si las puertas interiores de la casa se encuentran cerradas.

2.3 Influencia de factores meteorológicos en la concentración de radón

En este apartado se resumen los resultados de diferentes estudios sobre la influencia de diferentes variables meteorológicas con la concentración de gas radón en el interior de los edificios.

2.3.1 Viento

El CSN, en su documento *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios* [6] detalla que el viento puede presentar distintas correlaciones con la concentración de radón. En concreto, indica que se pueden producir dos efectos opuestos en la concentración.

Por un lado, el viento facilita el intercambio de aire entre el interior y el exterior. Esto se produce gracias a las filtraciones a través de ventanas y puertas. Por consiguiente, un mayor flujo de aire exterior, con baja concentración de radón, produciría una disminución del nivel de radón en el interior.

Asimismo, el viento produce succiones y presiones en las fachadas de los edificios, pudiendo llegar a generar un gradiente de presiones considerable entre el exterior y el interior, que es proporcional al cuadrado de su velocidad. Por este motivo, el radón podría entrar con mayor facilidad en los edificios cuando la velocidad del viento es elevada.

Por otra parte, en el documento de CIEMAT[4], *Influencia de las Condiciones Meteorológicas en la Variación Anual de la Actividad de Rn Ambiental* [37].

En este documento se indica que el viento influye en la concentración de radón debido a dos características principales:

- La velocidad. Cuando el grado de turbulencia es alto, las concentraciones son bajas mientras que cuando la turbulencia es mínima, se obtienen las máximas concentraciones.
- La dirección. Esta empieza a considerarse importante cuando la velocidad del viento adquiere valores elevados. En el caso de que el viento proceda de lugares con altos valores de exhalación del terreno, la concentración aumentará ya que el viento facilitará la exhalación desde el terreno. Sin embargo, si proviene de zonas con bajas tasas, el nivel de radón será menor ya al ser las concentraciones en el suelo menores, se exhalará menor cantidad.

En la tesis doctoral del Dr. Borja Frutos (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja –Consejo Superior de Investigaciones Científicas) [4] se comprueban experimentalmente los dos comportamientos mencionados anteriormente.

Cuando el viento genera un efecto de succión, produce una depresión en el interior del edificio. Esta depresión supone que la vivienda succione aire para regular sus presiones. El aire puede proceder o del

[4] CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

terreno con radón o del exterior. Por consiguiente, si cogiera aire del terreno, la concentración de radón se eleva.

Para el desarrollo del estudio, se construyó un módulo de vivienda (caseta) con sótano y planta baja para estudiar la efectividad de las medidas anti-radón. Se observó que en los días en los que se produjeron valores máximos de viento (Figura 2-15) se relacionaban con un aumento en los niveles de radón en el interior del edificio. Por tanto, el efecto de succión que produce el viento es más importante que el intercambio de aire.

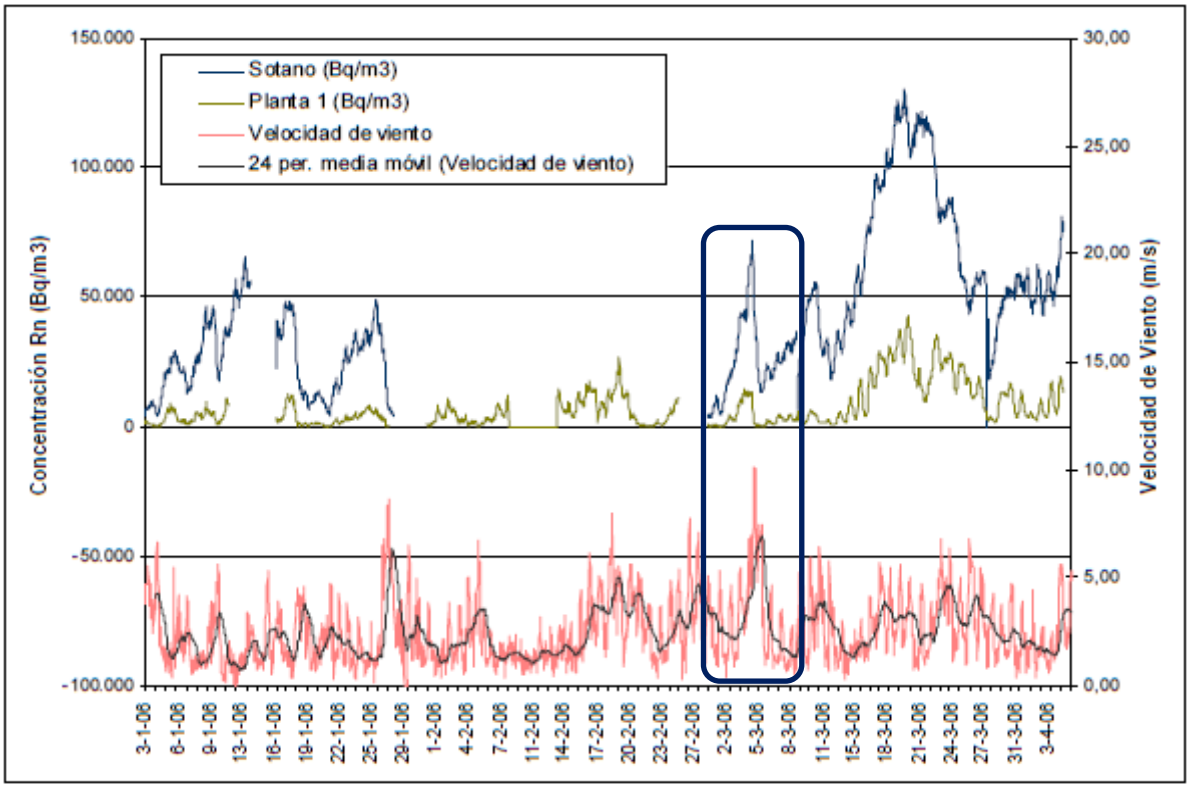


Figura 2-15 Concentración de radón-Velocidad de viento Tesis Borja Frutos Vázquez [4]

En este estudio se concluye que no hay una relación entre las diferencias de presión generadas por el viento y las concentraciones de radón en el interior de la vivienda. En la gráfica se observa, que por ejemplo en la semana del 18 al 24 de marzo, no hay fuertes valores de viento y, sin embargo, las concentraciones de radón adquieren los valores más altos. Por tanto, la presión de viento, no es suficiente para generar un mayor un flujo de radón en los edificios. Sin embargo, el viento suele estar relacionado con cambios en la presión atmosférica, que como estudiaremos a continuación, sí constituye un factor que modifica en flujo de radón.

Como se ha observado, los distintos estudios ofrecen distintas conclusiones pero no permiten obtener una conclusión común. Esta variable depende de varios factores, entre ellos el lugar en que se desarrolla el estudio, la intensidad del viento, aislamiento de los edificios. Por tanto, a día de hoy no hay una decisión clara de la forma en que afecta esta variable en la concentración de radón.

2.3.2 Presión atmosférica

La presión atmosférica es probablemente el factor meteorológico que más afecta en la concentración de radón.

Cuando se produce un descenso de presión, en general se puede apreciar un aumento en la concentración [6]. Numerosos estudios han determinado que este incremento puede guardar relación con la permeabilidad del suelo [37], [38]. Se debe a que cuando se producen alteraciones en la presión atmosférica, la presión existente en el interior del edificio se iguala de forma inmediata a este cambio.

Sin embargo, la presión que hay en el terreno no lo hará de la misma manera. Es necesario que transcurra un tiempo, que depende de la permeabilidad del suelo. Por tanto, si se produce un gran descenso en la presión, la existente en el terreno se mantiene en niveles más altos a los que hay dentro del edificio. Esta diferencia de presiones afecta a los procesos convectivos, ya que estos dependen de la diferencia de presiones que existe entre el terreno y el interior de la vivienda. Por tanto, una mayor diferencia de presiones favorecerá estos procesos y por consiguiente se producirá una mayor movilidad del gas hacia el interior del edificio, llegando a producirse aportes de hasta 60 Bq/m^3.hora debido a este efecto [4].

Sin embargo, un estudio [39] indica que no se aprecia influencia de la presión atmosférica en la variabilidad diaria de radón (Figura 2-16).

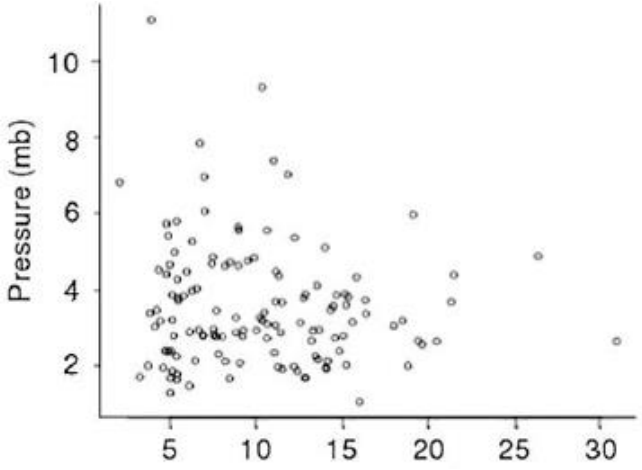


Figura 2-16 Gráfico de dispersión de presión atmosférica-concentración de radón [39]

Por otro lado, en un estudio llevado a cabo por el CSN [6], se observó que durante el periodo en el que se producen los cambios de presión, la concentración de radón puede aumentar hasta un 225%. En este caso en particular, se ha observado un incremento en la concentración de radón hasta los 90000 Bq/m^3 durante el periodo de tiempo en que la presión atmosférica descendió unos 3000 Pa (Figura 2-17).

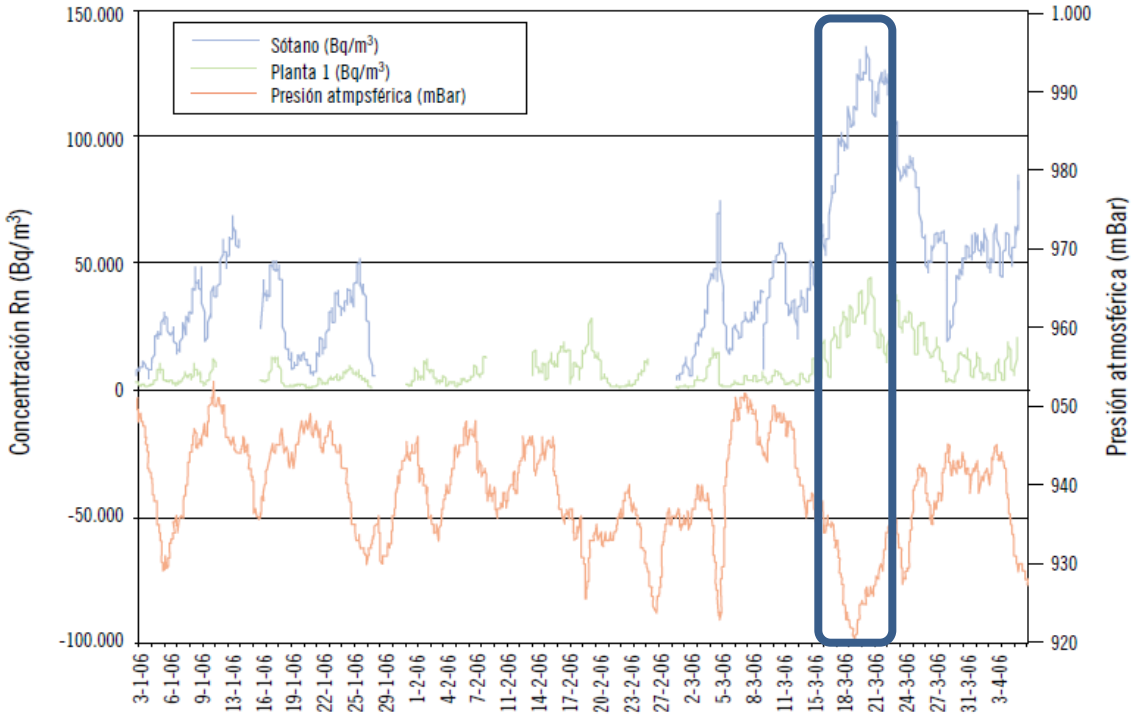


Figura 2-17 Curvas concentración de radón-presión atmosférica [6]

En una tesis realizada en el Instituto Nacional de Berkeley, *Radon Entry into Buildings: Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations and Building Structural Factors* [38] se estudia que los elevados niveles de radón en los edificios se deben principalmente a los flujos advectivos[5] impulsados por la diferencia de presiones que se produce entre el exterior y el interior de la edificación. Sin embargo, se han observado elevadas concentraciones de radón durante periodos en los que las diferencias de presiones eran muy débiles. Por tanto, los cambios de presión atmosférica pueden ser la explicación de estos flujos advectivos de radón que se introducen en la vivienda. Pero este hecho, no explica todos los incrementos que se producen en los niveles de radón.

Un estudio llevado a cabo en 1992, *Effects of periodic atmospheric pressure variation on radón entry into buildings* [40], indica que los cíclicos cambios en la presión atmosférica pueden dirigir flujos de radón al interior de los edificios, ya que impulsa los flujos advectivos de radón sin necesidad de que haya un gradiente de presiones entre el interior y el exterior. Estos cambios que desarrolla la presión en ciclos, se denominan marea barométrica, y se deben a la atracción gravitatoria de la Tierra con el Sol y del calentamiento de la atmósfera debido al ozono que más tarde, este efecto, se propaga hacia la superficie produciendo estas variaciones. Por tanto, podemos considerar este proceso como un fenómeno transitorio, donde estos cambios de presión sí explican las variaciones en las concentraciones de radón interior.

Asimismo, en esta investigación se reconoce a través de distintos modelos analíticos, que estos cambios de presión pueden suponer un incremento en los niveles de radón de hasta 0,2 $Bq.s^{-1}$ [40]. Este flujo supone más del doble del flujo que aporta el movimiento por difusión. Además, las oscilaciones semi-diurnas que se producen en la presión atmosférica, desarrollan los flujos más elevados de entrada y salida de gas en el edificio.

Como se comentó anteriormente, la presión existente en el terreno necesita un periodo de tiempo para adaptarse a los cambios de presión atmosférica que se producen. En la tesis del Dr. Borja Frutos Vázquez [4], se añade que estos periodos dependen de la capacidad que tiene el terreno para adaptarse al cambio y de la longitud de masa de suelo que hay hasta la capa impermeable. Por otro lado, también se indica que en suelos con alta porosidad, cuando se produce un cambio en la presión, el tiempo que necesita para adaptarse es mucho más corto que en terrenos compactos (poco porosos). Además, en días en que se producen precipitaciones, el suelo satura sus poros y se vuelve menos permeable. Durante estos tiempos, el terreno necesita un mayor tiempo para que se iguale a la nueva presión.

Tanto en esta tesis como en el estudio del CSN, se concluye que la presión atmosférica es un factor que influye hasta 100 veces más que el viento en las concentraciones de radón. Por tanto, cuando se producen descensos bruscos de presión, se aprecia un incremento en los niveles de radón. Si ocurre el proceso contrario, los niveles disminuyen. En la Figura 2-18 podemos apreciar entre el 8 y el 28 de marzo un descenso de presión que lleva ligado un incremento de concentración de radón.

[5] Advección: Proceso por el que se produce el movimiento de algún material disuelto o suspendido en un fluido

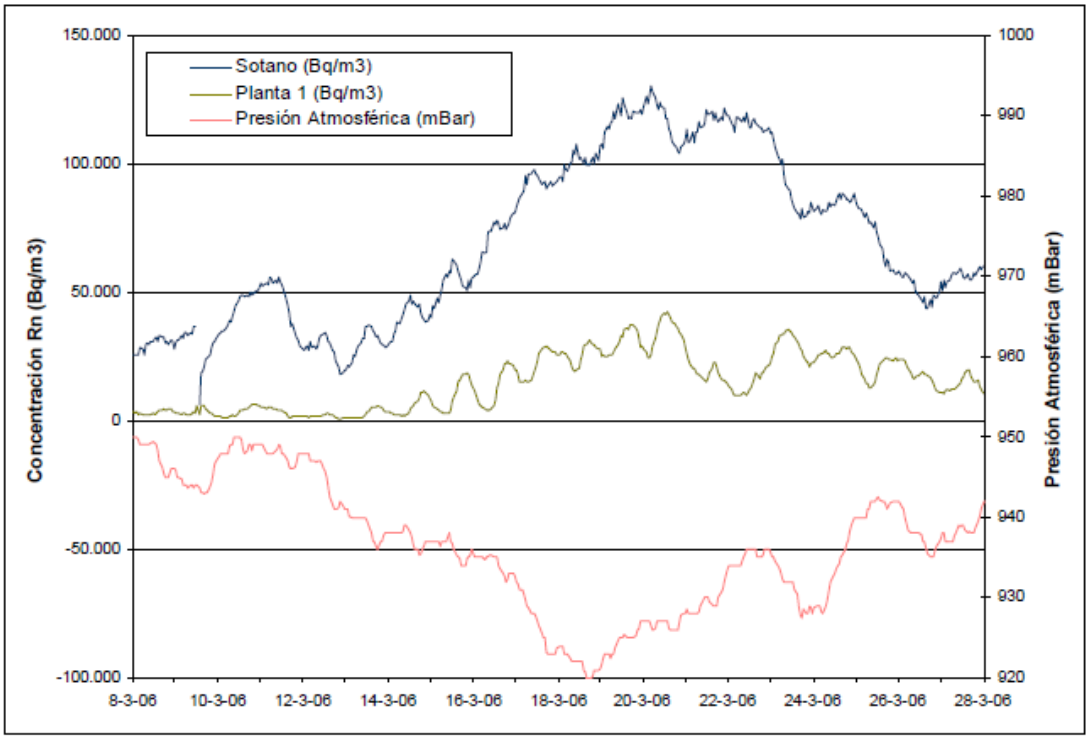


Figura 2-18 Concentración de radón- presión atmosférica Tesis Borja Frutos Vázquez [4]

2.3.3 Temperatura

En este apartado analizaremos otro factor que produce fluctuaciones en la concentración de radón, la temperatura. El CSN [6] expone que esta variable atmosférica modifica los flujos convectivos del aire como medio para que se extienda el radón. A lo largo del día, los niveles de radón a la altura del terreno son menores. Este hecho se debe al calentamiento que se genera en la atmósfera la cual produce que el radón se distribuya de forma más uniforme con la altura. Sin embargo, durante la noche, los niveles se disparan debido a que hay una mayor estabilidad atmosférica.

En este mismo estudio llevado a cabo por el CSN, se determina que los cambios de temperatura que se producen en el exterior del edificio, se deben a variaciones en el gradiente de presiones que se producen entre el interior y el exterior de la edificación (efecto *stack*). En el interior de los edificios se puede desarrollar el efecto *stack*, que explica los flujos de gases por cambio de temperaturas en el interior de edificios. Este proceso se produce cuando el aire caliente se expande e intenta huir al exterior de la vivienda a través de chimeneas, grietas, ventanas entre otros lugares. Debido a este hecho, se genera una leve depresión que en ocasiones puede producir que aumente la concentración de radón en el interior. Debido a esto, a efecto *stack* también se le denomina efecto chimenea. A pesar de ello, el CSN concluye que las diferencias de presión que generan los cambios de temperaturas son muy pequeñas, en torno a 1 Pa, por lo que las variaciones de radón no se deben a la temperatura.

La conclusión obtenida en el estudio del CSN, también es compartida en la tesis del Dr Borja Frutos Vázquez. Además, añade que aunque no hay relación a lo largo de tiempo, sí que se observan cambios en la concentración de radón y temperatura para el mismo periodo de tiempo como se observa en cierta medida en la Figura 2-19, donde ambas curvas mantienen una tendencia similar durante este periodo.

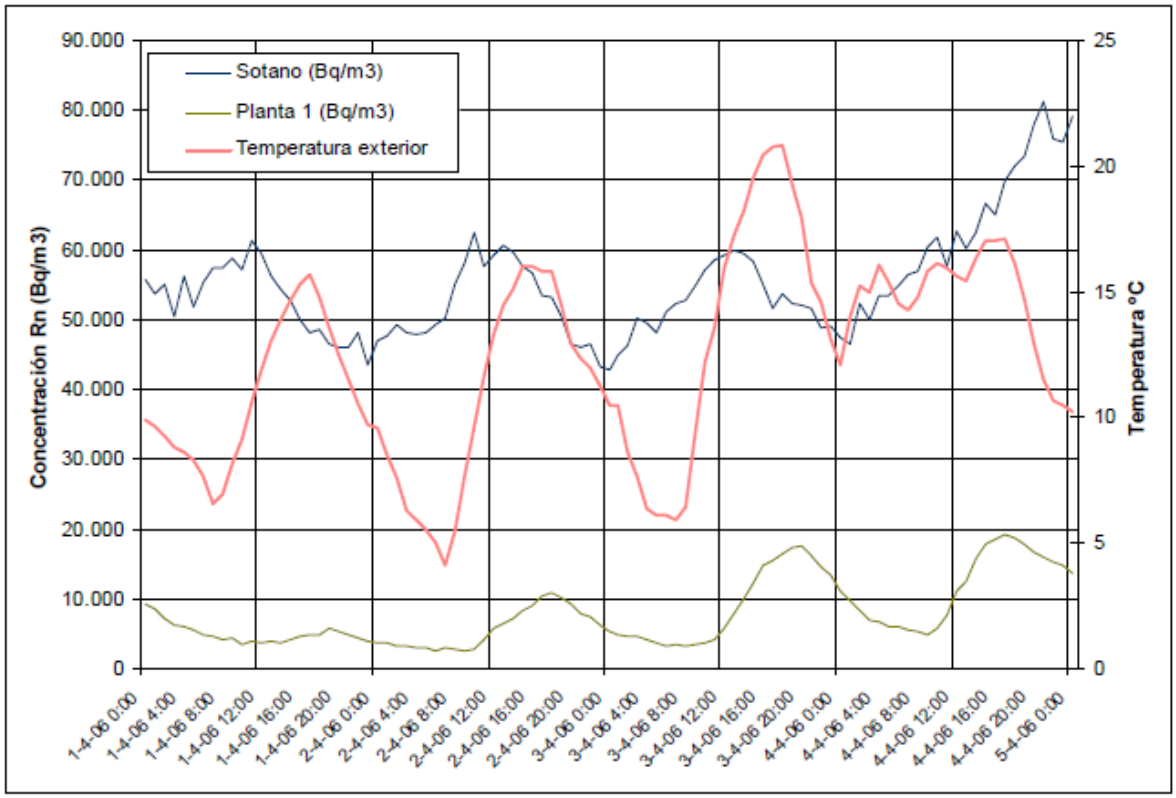


Figura 2-19 Concentración de radón- Temperatura (Período 5 días) [4]

Por otro lado, en dicha tesis también se analizan la diferencia entre las temperaturas exteriores e interiores del módulo en que se desarrolla el estudio. Los cambios en la temperatura interior son menores que los del exterior. Entre los motivos que podemos encontrar son las propiedades térmicas de los materiales de construcción o la condición de ser un espacio cerrado. Estas diferencias de temperaturas generan un gradiente de presiones debido al efecto *stack* pero esta diferencia no supera los 3 Pa, en este caso. Anteriormente habíamos observado, que la presión atmosférica generaba un mayor gradiente.

Por tanto, de forma general, no existe una correlación entre la temperatura y la concentración de radón. Sí se puede obtener una cierta relación a nivel diario como también se indica en la tesis de la Dra. Alicia Fernández Villar [22]. A pesar de ello, hay que tener en cuenta que los cambios de presión se deben a fluctuaciones en la temperatura. En este mismo sentido, en un estudio realizado en Portugal [39] se halló un coeficiente de correlación entre estas dos variables de 0,43 (Figura 2-20).

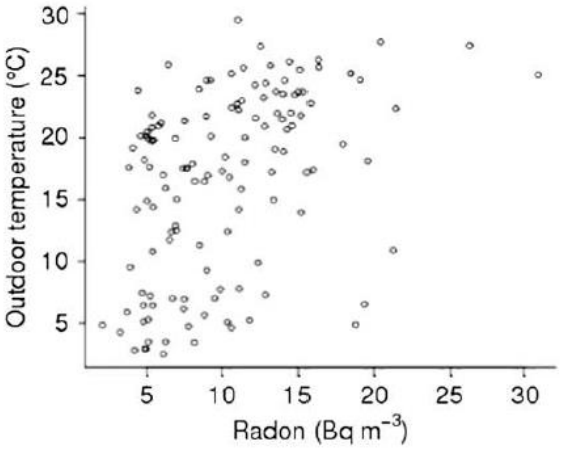


Figura 2-20 Gráfico de dispersión de temperatura exterior-concentración de radón [39]

Por último, analizaremos un estudio llevado a cabo en el observatorio de geodinámica de Hungría, [41]. En el estudio se observa que cuando la temperatura exterior excede la interior, se produce un rápido aumento en la concentración de radón. Además, se estudió la relación entre la temperatura y la concentración de radón a lo largo de 5 años y se obtuvo que la temperatura en un largo período de tiempo es uno de los principales factores en la concentración de radón (Figura 2-21)

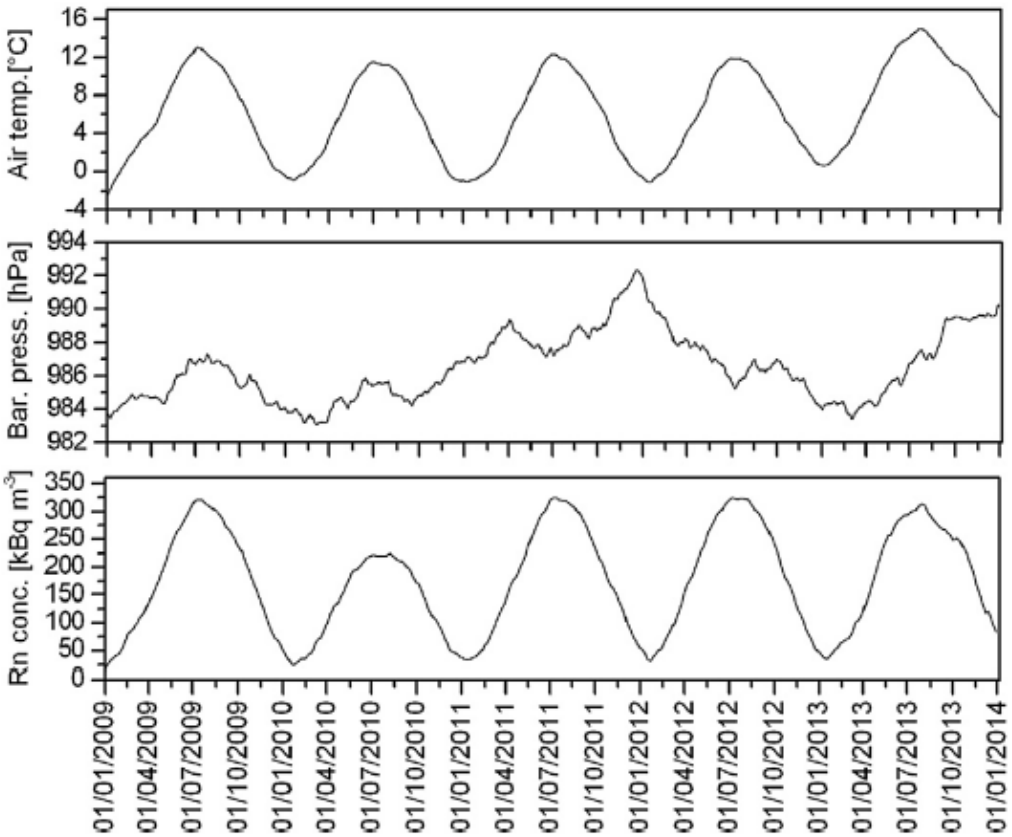


Figura 2-21 Relación de concentración de radón-temperatura, presión (5 años) [41]

Además, en este mismo estudio [41], se analizó por separado la correlación que producía la temperatura en los meses de verano y de invierno. Por un lado, se obtuvo un coeficiente de correlación positivo diario (0,676) en los meses de verano que varía entre los 16 y los 25 kBq m^{-3} $^{o}C^{-1}$. Sin embargo, a corto plazo, esta relación es mucho menor. Por otro lado, en los meses de invierno, cuando la temperatura exterior es menor que la interior, los coeficientes de correlación obtenidos son más pequeños que los de verano, obteniendo un valor de 0,519 diario.

En conclusión, se obtiene que la relación de la temperatura es siempre positiva, que se obtiene una ligera diferencia entre los meses de verano y de invierno en cuanto a la medida en la que afecta a las concentraciones de radón y que a largo plazo es uno de los factores más importantes.

2.3.4 Precipitaciones

Las precipitaciones son un factor adicional que suelen mostrar una cierta relación con la concentración de radón. Durante períodos lluviosos, puede producirse una disminución de la permeabilidad del suelo en el terreno que se encuentra alrededor de la vivienda. Sin embargo, el suelo que se encuentra bajo el edificio permanece seco, lo que puede dar lugar a que por esta zona se exhale radón al interior de la construcción.

Como se ha explicado anteriormente en el apartado 2.1.2, la permeabilidad del terreno disminuye debido al agua que se acumula en el suelo. Los poros del terreno se saturan en presencia de este elemento y, en consecuencia, sus interconexiones también. De esta forma, el terreno se hace más impermeable a

la exhalación de gas radón. Por ello, la concentración de este gas debería disminuir. Sin embargo, en los edificios, el suelo se encuentra seco por lo que los poros de este terreno son capaces de exhalar radón al ser más permeables. Este terreno constituye un camino preferente para el radón hacia el interior. [4]

En ese sentido, la porosidad del suelo es un aspecto muy importante, ya que si el suelo es muy compacto, el agua de las precipitaciones no le afectará en su permeabilidad, y, por consiguiente, los niveles de radón serán casi idénticos a si no lloviera.

Asimismo, los periodos de precipitaciones suelen estar ligados a fases de bajas presiones (véase Figura 2-22). Por ello, tanto las precipitaciones como la presión son factores que confluyen y se han constituido como los principales modificadores de la concentración de radón [4].

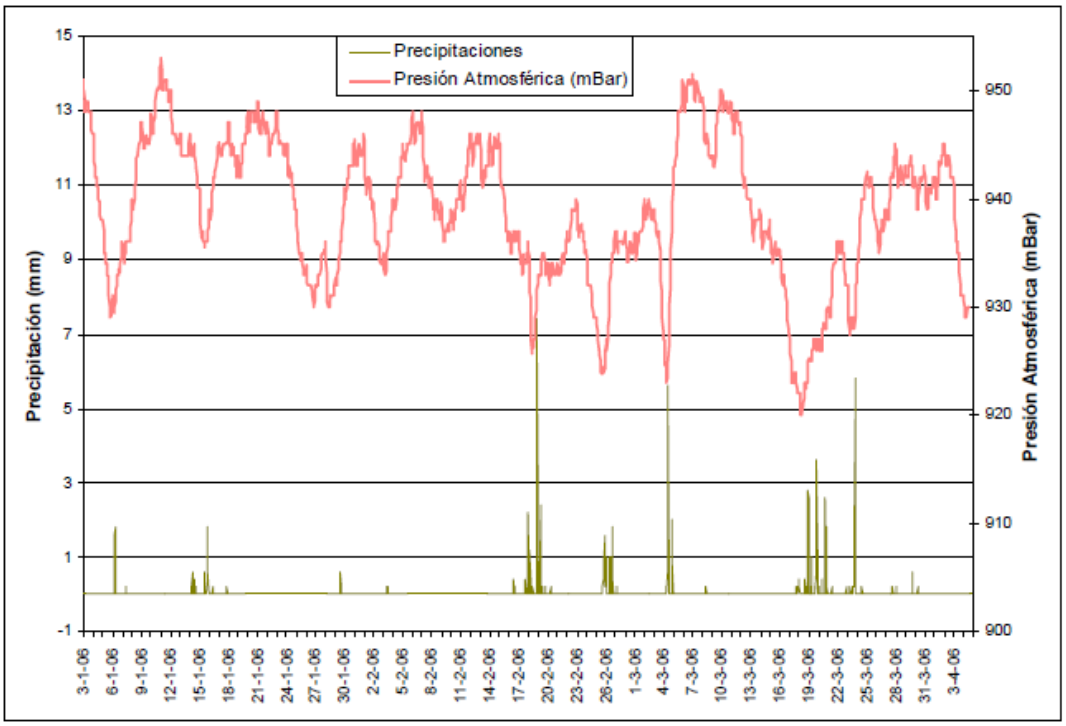


Figura 2-22 Precipitaciones-Presión atmosférica [4]

Por otro lado, el CIEMAT concluye en su estudio [37] que las precipitaciones no incrementan la cantidad de Rn en el aire exterior. Sin embargo, cuando se producen largos períodos de precipitaciones, se observa una disminución de la concentración de radón en el aire de la atmosfera debido a los motivos anteriormente mencionados. En conclusión, la precipitación es un factor que podría modificar en gran medida, después de la presión, las concentraciones de radón.

2.4 Variaciones cíclicas en la inmisión de radón

En este apartado se analiza el ciclo que sigue el radón a lo largo del tiempo así como de los factores que afectan a este ciclo. Numerosos trabajos han estudiado la periodicidad que desarrolla el radón en el tiempo.

Sin embargo, otros estudios han indicado que el efecto gravitacional de la Tierra, el Sol y la Luna sobre la corteza terrestre, conocido como mareas terrestres, pueden influir en la variabilidad del radón. Asimismo, en lugares próximos a la costa, las mareas oceánicas, quizás, también pueden influir en estos ciclos periódicos de exhalación del radón ya que producen variaciones en el nivel de agua subterránea, también conocido como nivel freático.

2.4.1 Ciclos de radón debido a variables meteorológicas

En la sección 2.3.3 ya se había visto que existe una importante relación entre la temperatura exterior y la concentración del radón en el interior de edificios, produciéndose una variación cíclica conjunta de estas variables

Además, en la investigación [39] se analizan los ciclos de radón que se producen lo largo del tiempo, tanto de forma diaria como a lo largo de las estaciones, a partir de datos experimentales recogidos durante seis meses. Se concluye que la variabilidad del radón a lo largo del día es mínima, con variaciones de entre 10 y 15 Bq/m^3, produciéndose los niveles máximos generalmente por la mañana, si bien en algunas ocasiones también se obtuvieron durante la noche

En este estudio, se distingue también una cierta relación diaria con la humedad relativa, tal y como se observa en la Figura 2-23. Cabe resaltar que esta dependencia es mucho más débil que la que se obtiene con el caso de la temperatura, donde se obtenía una relación mucho mayor.

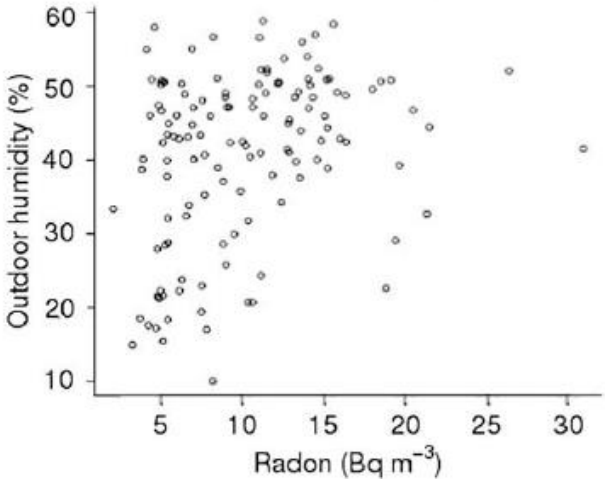


Figura 2-23 Gráfico de dispersión de humedad exterior-concentración de radón [39]

Es importante recalcar que este estudio ha observado que se produce un cierto retardo entre el momento en que se produce el fenómeno atmosférico y la variación en la concentración de radón. Por ejemplo, cuando se producen variaciones de presión atmosférica, los cambios que se producen en la concentración de radón no son inmediatos. En ocasiones hay que esperar varias horas para observar este fenómeno.

Finalmente, este estudio argumenta que las precipitaciones no son un factor que afecte en la variabilidad a largo plazo. En aquellos días en los que se producen lluvias es cuando se observa la menor variación en los niveles de radón principalmente motivado por la disminución de la permeabilidad del terreno. Además, concluye que las variaciones diarias en la concentración de radón están asociados a cambios de temperatura, en especial en la temperatura exterior. Esta conclusión obtenida tiene relación con su explicación física. La agitación térmica de las capas atmosféricas más cercanas al suelo constituye el mecanismo más eficaz de difusión de radón debido a que bloquea este gas en el suelo durante la noche y facilita su liberación durante el día.

Por otro lado, como se expuso en el apartado 2.3.2, el fenómeno conocido como marea barométrica también puede describir flujos de radón al interior del edificio de forma cíclica.

Para analizar las fluctuaciones a lo largo de las estaciones examinaremos otro estudio llamado *The effect of Meteorological Parameters on Radon Concentration in Soil Gas* [42]. En esta investigación, se demuestra que las concentraciones de radón adquieren los valores máximos a finales de invierno y principios de primavera (Figura 2-24). Este periodo se caracteriza por ser inestable en lo que a condiciones atmosféricas se refiere. Por otro lado, las concentraciones mínimas se observan en otoño,

una estación principalmente seca y estable. Esta correlación puede ser observada también claramente en la Figura 2-25, donde se comparan la concentración media mensual de radón y la temperatura, humedad y presión del exterior.

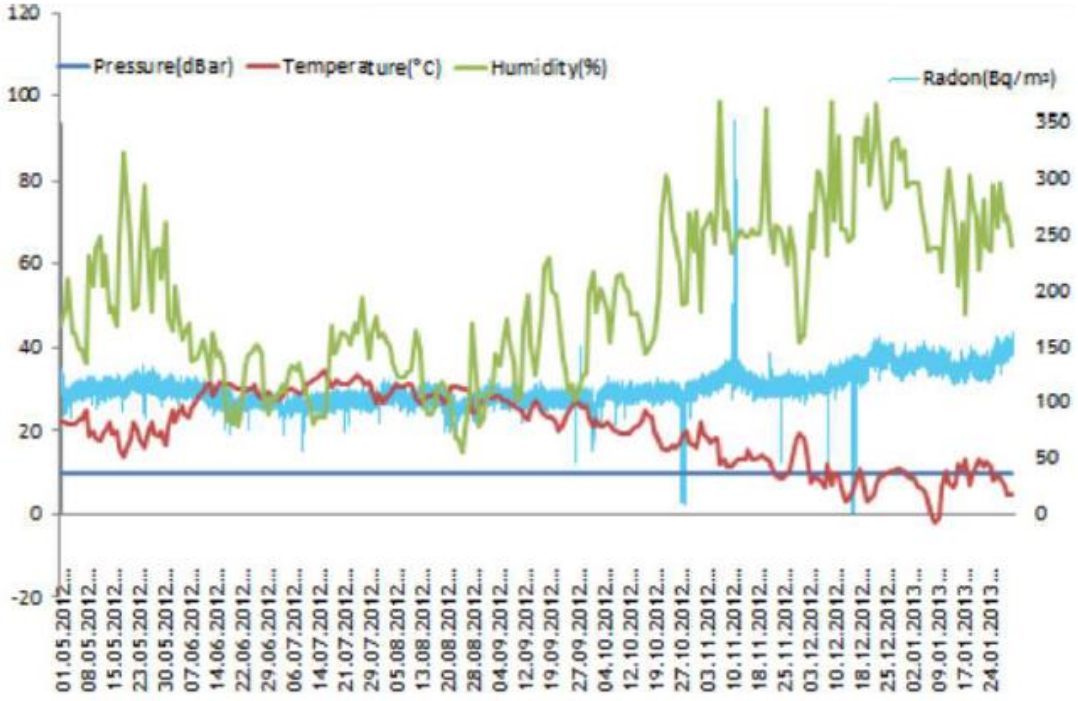


Figura 2-24 Relación estacional entre la concentración de radón y variables meteorológicas [42]

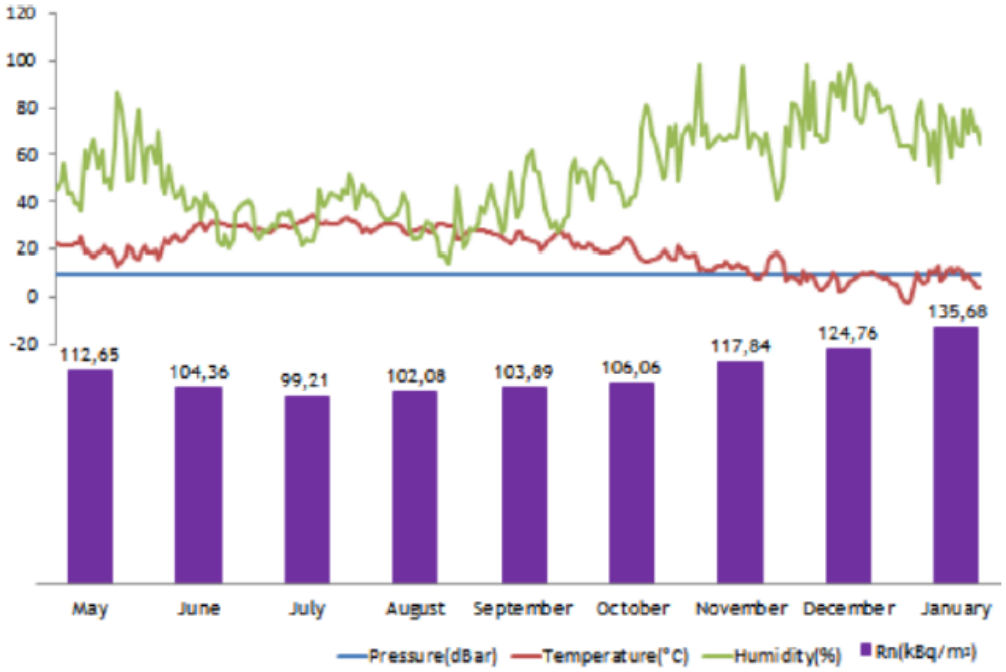


Figura 2-25 Relación mensual entre la concentración de radón y variables meteorológicas [42]

Al igual que en el estudio anterior, también se observaba un cierto desfase entre los fenómenos atmosféricos y los incrementos de radón. En este caso, este retardo se ha observado entre la humedad y el radón, donde se han llegado a diferenciar hasta en 5 horas entre un suceso y otro, motivado por la lenta transferencia de calor del suelo a la atmósfera.

Por tanto, se puede concluir que las diferentes variables meteorológicas influyen en distinto grado en los ciclos que el radón describe a lo largo del tiempo. Se ha observado gran relación en distintos estudios [39], [42] entre la temperatura y el ciclo que describe el radón al igual que también con la humedad, aunque esta última en menor grado.

2.4.2 Influencia de las mareas terrestres en los ciclos de radón

Aparte de la fuerza gravitatoria y la fuerza centrífuga presente en el espacio, existe una pequeña fuerza como consecuencia de las variaciones del campo generado por la presencia de movimientos de los cuerpos celestes que se encuentran próximos. Todas estas fuerzas generan atracciones entre los distintos cuerpos. El efecto de atracción de la Luna (realmente es la combinación de Luna-Sol) sobre la superficie de la Tierra es a lo que se le denomina mareas terrestres. Normalmente se asocian este tipo de mareas a las mareas oceánicas, ya que este efecto mencionado se aprecia en los grandes desplazamientos de masa que se producen en los océanos [43]. Pero este fenómeno también afecta a la corteza terrestre en sí, que en cierto modo se comporta como un material elástico y se deforma ante esta combinación de fuerzas gravitatorias.

Las mareas terrestres pueden ser también las responsables de la exhalación periódica del radón. Este hecho, se produce a través del movimiento que se genera en las variaciones del nivel freático, en respuesta a los efectos que produce la dilatación y compresión de la corteza terrestre y por consiguiente del agua de los acuíferos durante el movimiento de las mareas. Además, las mareas terrestres realizan desplazamientos tanto verticales como horizontales. Estas mareas elevan el terreno verticalmente entre 30 y 40 cm y los desplazan horizontalmente entre 10 y 20 cm. La componente horizontal afecta a la corteza terrestre la cual experimenta ciclos de contracción y dilatación durante el viaje de la marea liberando así fluidos y gases desde el suelo. El movimiento del agua del subsuelo produce movimientos en el radón del interior del estrato de las rocas, el cual asciende hacia la superficie para más tarde liberarse,

En un estudio reciente sobre el efecto de las mareas terrestres en la exhalación de radón [44] se realizaron medidas en la concentración de radón en aguas subterráneas y, además, se registraron datos tanto de las mareas terrestres como del nivel freático. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Figura 2-26.

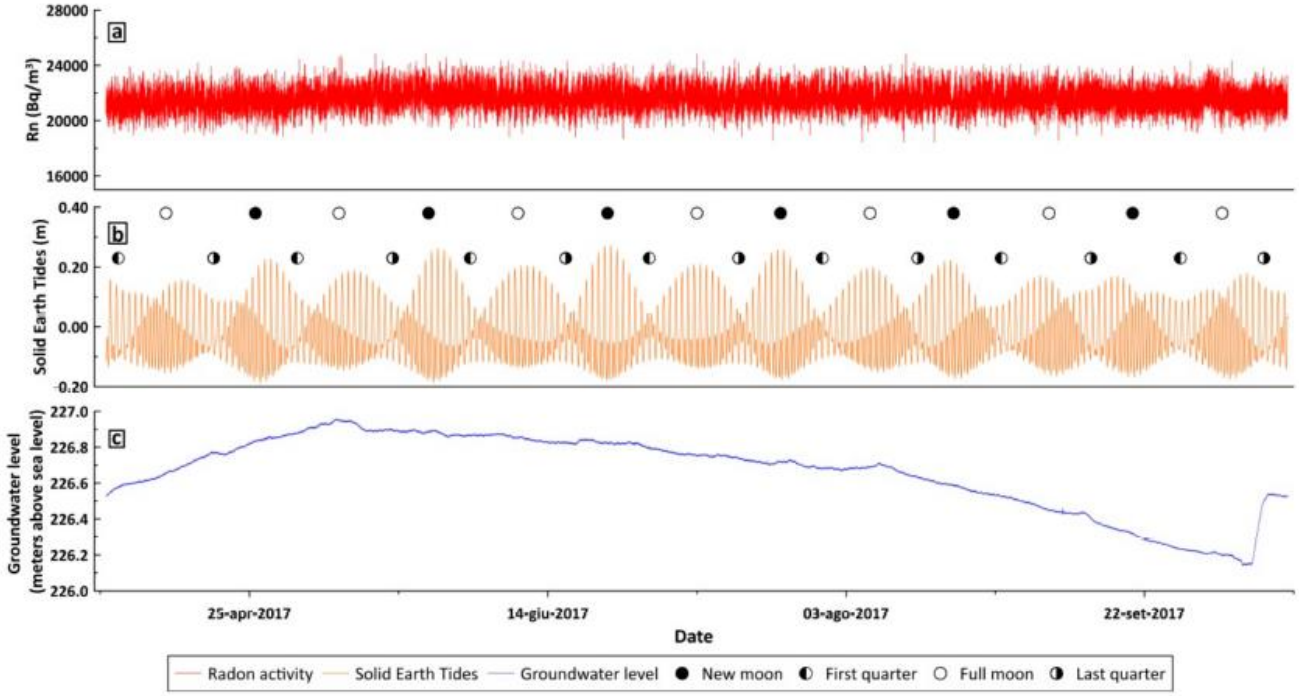


Figura 2-26 Concentración de radón-mareas terrestres-variación de nivel freático [44]

Como podemos observar, las mareas terrestres muestran variaciones periódicas en amplitud que parecen coincidir con los distintos estados de la Luna. Los datos indican coincidencias en los periodos diurnos y semidiurnos de las concentraciones de radón en el agua subterránea, el nivel freático y las mareas terrestres con los puntos en los que el Sol se encuentra en auge (12h aprox.).

Sin embargo, el estudio concluye que con los datos obtenidos no es posible obtener una clara correlación entre estos los niveles de radón y las mareas terrestres. Este hecho se debe a que las variaciones tanto de concentración de radón como del nivel freático pueden estar relacionados con modificaciones en distintos parámetros meteorológicos.

Por otro lado, mostraremos los resultados de un estudio denominado *Tidal sychronity of built-enviroment radon levels in the UK* [45] en el que también se explican las mareas terrestres.

En este documento se expone que la fuerza de las mareas terrestres también puede estar relacionado con las mareas oceánicas. Es decir, el movimiento cíclico del agua que describen estas mareas aumentan o disminuyen el nivel del agua subterránea lo que produce que el gas se impulse hacia la superficie cuando este nivel aumenta. Por consiguiente, afecta al nivel freático de las zonas en las que estas mareas están presentes.

Además, expone que los picos en la concentración de radón parecen mostrar cierta relación con las fases de Luna llena y nueva. Los cálculos en la periodicidad del radón indican picos de este gas a los 14,9 y 29,7 días (Figura 2-27). Teniendo en cuenta que un ciclo lunar se produce cada 28 días, el radón coincide en las fases de Luna nueva y llena. Se han llegado a obtener coeficientes de correlación de hasta 0,53 entre las mareas terrestres y el radón en esta zona.

Una de las posibles explicaciones a este hecho puede ser que el radón se mezcla con otros gases en las rocas. Los ciclos de las mareas impulsan estas mezclas hacia la superficie. Este impulso se debe a una combinación de la atracción gravitacional de la Tierra con otros cuerpos, de la dilatación y compresión del estrato de las rocas y de las variaciones en el nivel freático. Este último factor depende a su vez de la geología de la zona y la proximidad a la costa.

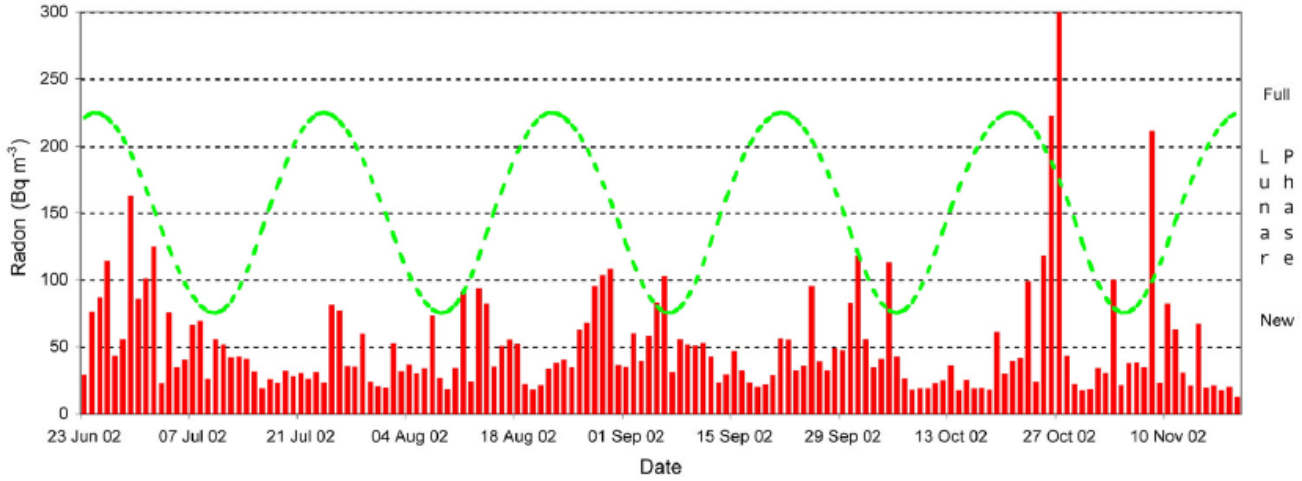


Figura 2-27 Relación entre la concentración de radón y las fases de la Luna [45]

Asimismo, la relación entre estos dos elementos parece mostrar un cierto retardo como se puede observar en la gráfica (especialmente en el día 27 de octubre). Los valores máximos se obtienen 3 y 4 días después de que se produzcan estas fases y no de forma casi inmediata. Este retardo depende de la profundidad a la que se encuentre el estrato de las rocas bajo la superficie. Es decir, a mayor profundidad se observará un mayor retardo entre la Luna y el radón.

A día de hoy, no hay una conclusión clara acerca de si realmente las mareas terrestres afectan de una forma directa en la concentración de radón. Suelen encontrarse dos conclusiones acerca de este factor. Por un lado, no se cree que haya relación entre las mareas terrestres y oceánicas con los ciclos que describen el radón a lo largo del tiempo como algunas investigaciones han indicado [44]. En cambio, otros estudios han indicado que existe una relación y se ha mostrado cierta correlación entre las fases de la Luna y la concentración de radón [45]. En la actualidad, este factor sigue siendo motivo de estudio para conseguir obtener una respuesta clara acerca de su relación con la exhalación del gas radón.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del recinto de estudio

3.1.1 Localización y descripción del edificio

Uno de los objetivos de este TFG es tomar medidas de concentración de radón, para averiguar su grado de dependencia con los distintos factores que afectan a estos niveles. Para ello se toma como local principal de estudio un despacho de profesores en el Centro Universitario de la Defensa (CUD), situado en la zona sureste de la Escuela Naval Militar (Figura 3-1). El edificio fue construido entre los años 1939 y 1943. Asimismo, se han llevado a cabo obras entre abril de 2009 y marzo de 2010 en las cuales se crearon más aulas y se reformó parte de la estructura. Tras la reforma, la planta pasó a ocupar una superficie de 664 m^2.

El edificio se compone de dos plantas. En la planta alta, se encuentran varios despachos de profesores, la secretaría del CUD, así como una sala de juntas. Por otro lado, en la planta baja se sitúan varios seminarios donde los alumnos reciben clases, así como despachos de profesores y el salón de grado. En dos de estos despachos (Despachos 112 y 114) se realizan las mediciones de la fase experimental de este trabajo.

Durante la construcción del CUD se llevó a cabo un gran movimiento de tierras [46]. Debido a lo accidentado a que estaba el terreno, se tuvo que realizar:

- Desmonte, con un 70% de volumen de roca: 207.000.000 m^3
- Relleno, en superficie ganada al mar: 650.500.000 m^3

No se han podido obtener datos del nivel freático del terreno sobre el que se asienta el CUD. Sin embargo, para conocer un nivel que sirva de referencia en la zona, se ha acudido a un estudio geotécnico realizado en Paseo Alcalde Antonio Blanco [47], situado a 520 metros del lugar de estudio. En el sondeo realizado, el nivel freático se encuentra a cuatro metros y medio de profundidad.

Figura 3-1 Situación del edificio del CUD dentro de ENM Fuente: Google Earth

Por otro lado, y más bien a modo de curiosidad, durante el desarrollo de las obras en la ENM, se utilizaron los siguientes materiales de construcción (Tabla 3-1):

Materiales	Cantidad empleada
Cemento	16.000.000 kg
Tejas	1.000.000 piezas
Ladrillos	12.000.000 piezas
Baldosas	400.000 piezas
Azulejos	300.000 piezas
Adoquines	3.100.000 piezas

Tabla 3-1 Materiales empleados en la construcción de la ENM [46]

3.1.2 Características del despacho 114

El despacho 114 se encuentra situado en la planta baja del Centro Universitario de la Defensa, en la zona sur (véase Figura 3-2). Contiguo a este recinto, por la parte Este, se encuentra el despacho 112, y

por el Oeste, el salón de grados. Actualmente este despacho no es utilizado como tal, sino como almacén de distintos enseres como sillas o mesas, entre otros.

Este despacho ha sido seleccionado en base a un estudio previo realizado en el año 2019 por el AN García Denia sobre la concentración de radón en el CUD [21]. En este trabajo se concluyó que en este lugar existen concentraciones mucho más elevadas que en el resto de zonas del edificio del CUD. Por tanto, este despacho nos servirá para analizar con mayor sencillez la correlación entre el radón y diferentes distintas variables.

El despacho tiene sólo una ventana orientada hacia el Patio de Aulas, de vidrio doble (4-6-4 mm) y marcos de alumnio de color verde, y una única puerta de acceso de madera. Además, cuenta con un falso techo de altura 180 cm.

La pared del despacho que contacta con el Patio de Aulas, se compone de ladrillo hueco de 60 cm de espesor recubierta con una capa de yeso. El resto de paredes del despacho, que son interiores, están formadas por una estructura de acero galvanizado relleno de fibra mineral y recubiertas de dos hojas de panel de yeso cartón de expesor 15mm en cada una de las caras. El espesor final de estas paredes es de 13 cm.

El despacho posee una longitud en planta de 510 cm, un ancho de 360 cm y una altura incluyendo el falso techo de 370 cm.

Por último, el falso techo está fabricado por bandejas metálicas de aluminio perforado en blanco con fieltro acústico y molduras de pladur lisa Cabe destacar, que el falso techo entre el despacho 112 y 114 es compartido, no hay ninguna pared o barrera en esta zona entre ambos espacios(Figura 3-3).

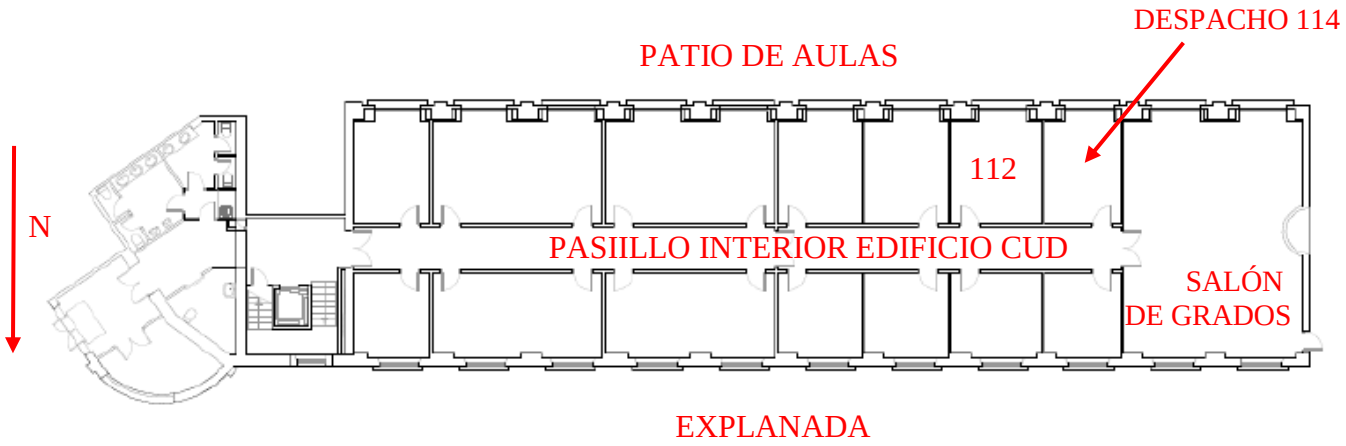


Figura 3-2 Localización despacho 114 en planta baja del CUD

Figura 3-3 Falso techo de despacho 114 (vista interior y exterior)

Para poder visualizar mejor el aspecto de este espacio, se presenta a continuación distintas perspectivas del despacho mediante modelo 3D (Figura 3-4 y Figura 3-5). Estas vistas se han realizado con el software Siemens NX:

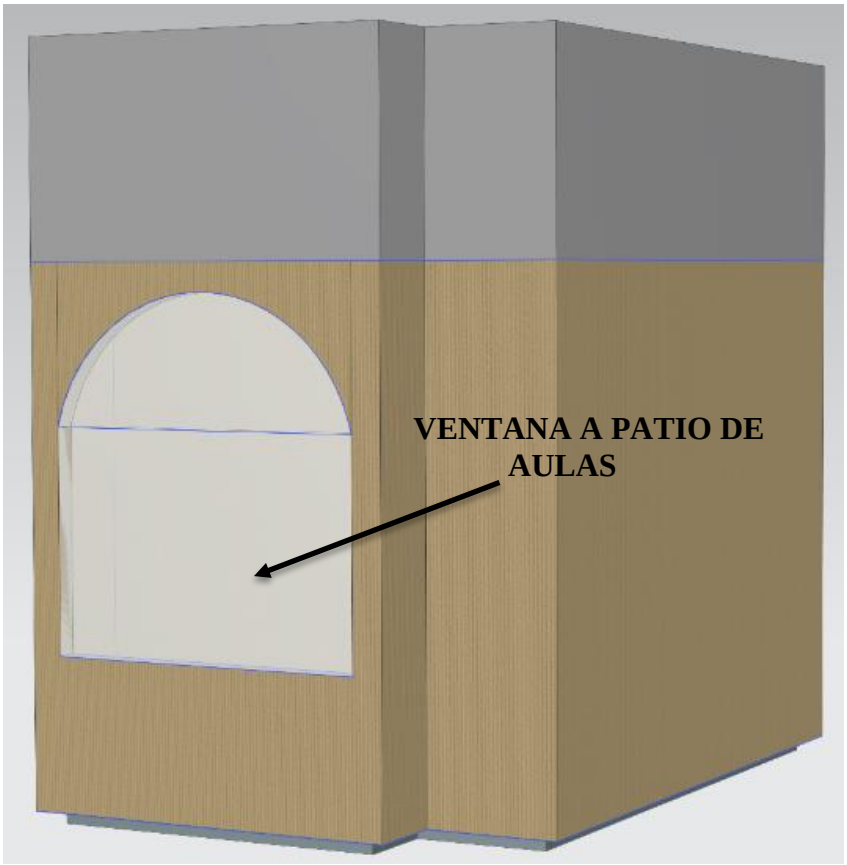


Figura 3-4 Despacho 114 (vista desde ventana patio de aulas)

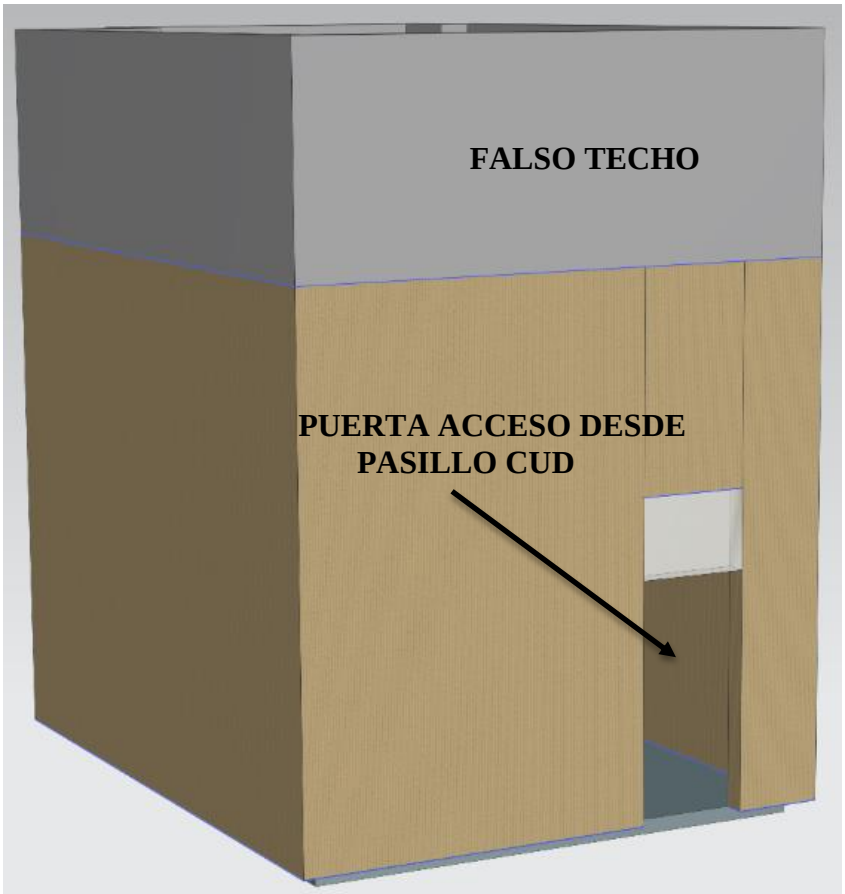


Figura 3-5 Despacho 114 (vista desde pasillo interior edificio CUD)

Para poder realizar con mayor rigurosidad las mediciones de concentración de radón y evitar en la medida de lo posible que estas se viesen afectadas por factores no controlados, se limitaron las infiltraciones de aire a través de puertas, ventanas y otros puntos, tal y como se muestra en la Figura 3-6 y la Figura 3-7. Además, también se cerró la salida de aire del circuito de ventilación, que se encuentra en el falso techo del despacho.

Figura 3-6 Sellado de filtraciones y cierre del conducto de ventilación

Figura 3-7 Sellado de filtraciones de aire a través de la ventana

En este habitáculo, se han situado distintos medidores para la determinación de radón a distintas alturas como, por ejemplo, en el falso techo. Más adelante, se desarrollará la situación de cada uno de ellos en el despacho.

3.2 Equipos empleados en la medición

En este apartado se llevará a cabo una descripción de los equipos de medición empleados para la toma de resultados experimentales del presente trabajo.

3.2.1 RadonEyeRD200

El equipo empleado para la obtención de datos es el *RadonEyeRD200* desarrollado por el fabricante surcoreano RadonEye *(*Figura 3-8*)*. Gracias a su reducido tamaño puede ubicarse en cualquier sitio siempre y cuando se encuentre cerca una toma de energía eléctrica. Mide de forma continua en Bq/m^3 o pCi/L y comienza a registrar datos una hora después de que se haya puesto en funcionamiento. Toma datos de la concentración de radón cada 10 minutos y registra el valor medio obtenido cada hora.

El equipo permite detectar hasta un máximo de 3696 Bq/m^3 con una precisión del 10%. Para la obtención de datos del dispositivo, es necesario disponer de un teléfono móvil, instalar la aplicación RadonEye y conectarse al dispositivo del que queremos obtener los datos vía Bluetooth. Los datos se pueden descargar en un fichero de texto para su posterior análisis. Para obtener más características del dispositivo, se puede consultar su ficha técnica [48].

Este equipo ya ha sido empleado en el Centro Universitario de la Defensa por los AN Muñoz Yébenes [20] y AN García Denia [21] en años anteriores.

Figura 3-8 RadonEyeRD200 y su aplicación móvil

3.2.2 Sensores de temperatura y humedad

Durante el período de toma de datos, se ha medido la temperatura y humedad relativa del aire interior mediante sensores de tipo botón Figura 3-9, que registraron datos en intervalos de 10 minutos. Estos sensores reciben el nombre de “Datalogger de humedad Hygrochron y temperatura”. A través del programa One Wire Viewer se pueden recabar los datos del sensor y transferirlos al ordenador. Para obtener características más detalladas de los sensores, consultar sus especificaciones [49].

Figura 3-9 Sensores de temperatura y humedad

Estos sensores reciben el nombre de "Datalogger de humedad Hygrochron y temperatura". A través del programa One Wire Viewer se pueden recabar los datos del sensor y transferirlos al ordenador. Con la utilización de estos aparatos, se ha podido obtener información que permita analizar la correlación entre el radón con estos factores meteorológicos y de esta forma poder obtener posibles conclusiones.

3.2.3 Obtención de datos meteorológicos, fases lunares y mareas

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio se han obtenido de la estación de Lourizán de MeteoGalicia [50]. Se decidió emplear esta estación debido a que es la más cercana a la Escuela Naval Militar. Desde esta página web se han descargado diariamente los datos de las variables de presión, temperatura, humedad y precipitaciones, así como de la intensidad de viento.

Para la obtención de los datos de las mareas oceánicas, se han obtenido también diariamente del Instituto Hidrográfico de la Marina [51]. La instalación donde se obtienen los datos se encuentra situada a 1300 m del despacho 114. Asimismo, los datos de las distintas fases de la Luna han sido también obtenidos de forma diaria [52]. Estos datos serán empleados para compararlos con las concentraciones de radón.

3.3 Descripción de la metodología y toma de datos experimentales

En el siguiente apartado, se explica la normativa a tener en cuenta para la toma de datos. Seguidamente, se desarrollará el proceso llevado a cabo en la toma de datos así como la metodología que se ha empleado.

3.3.1 Normativa seguida en la toma de datos

Para llevar a cabo las mediciones de concentración de radón en el edificio del CUD, con los equipos mencionados anteriormente, se han intentado cumplir en la medida de lo posible las exigencias del CTE[6]

En el Documento Básico DB-HS6-Protección frente al radón del CTE [19] aparecen reflejados las recomendaciones a seguir para estimar el promedio anual de la concentración de radón. A continuación, se describen algunas de ellas:

- En el punto 2.2 se establece que la ubicación exacta de los detectores se adaptará a la configuración espacial de cada planta teniendo en cuenta los sistemas de calefacción y ventilación.
- En el punto 3.2 se detalla que los detectores deben situarse a una altura entre 50 y 180 cm sobre el suelo y a 30 cm de paredes y puertas. Además, deben situarse al menos a10 cm de otros objetos.
- En el mismo apartado 3.2, se define que los equipos no deben colocarse próximos a corrientes de aire como ventanas o ventiladores. Por otro lado, en lugares con una

[6] CTE: Código Técnico de la Edificación

humedad relativa superior al 70%, se cubrirán los dispositivos con una membrana para protegerlos.

En general, se han seguido estas recomendaciones para la colocación de los sensores de radón, a excepción de algún medidor que se ha colocado en localizaciones específicas para poder evaluar ciertos factores de interés para esta investigación (ver sección 3.2.2).

Además, en el punto 3.3 se determina que los detectores deben permanecer midiendo por un tiempo mínimo de dos meses en las condiciones habituales del espacio. Esta condición también se ha cumplido.

En nuestro caso, al tratarse de un espacio no habitado, la normativa explica que el lugar debe permanecer cerrado en lo que a ventanas y puertas exteriores se refiere. Estas medidas se han cumplido durante el desarrollo del presente trabajo.

A continuación, en los siguientes apartados, se describirá tanto la ubicación de los medidores, así como el tiempo que se ha estado midiendo en esas posiciones.

3.3.2 Metodología empleada en la fase de toma de datos

La fase de datos comprende 2 meses, entre los días 22 de diciembre de 2019 y 22 de febrero de 2021. Se colocaron un total de cuatro medidores en el despacho 114 de la planta baja del edificio del CUD, los cuales se fueron moviendo o incluso eliminando por razones específicas como se explicará más adelante. Durante todo este periodo, el despacho se mantuvo sin ocupación y con la ventana cerrada.

En la Tabla 3-2 se identifican los medidores utilizados y su ubicación, así como si disponen o no de sensor de temperatura y humedad a su lado. Para que resulte más sencilla la exposición y discusión de los resultados, los medidores se nombrarán según se reseña en la columna “Designación final”:

Nº de identificación del sensor	Localización en despacho 114	Altura (m)	Sensores de Tª y HR interior	Designación final
5	Mesa junto a ventana	0,8 m	Tª+HR	Medidor ventana
9	Mesa a gran altura en el centro	2,3 m	Tª	Medidor central alto
13	Contenedor junto a puerta	1 m	NO	Medidor puerta
15	Falso techo	3,75 m	Tª+HR	Medidor falso techo

Tabla 3-2 Designación y ubicación inicial de los medidores de radón en el despacho 114

Estos medidores se colocaron en distintos lugares y a distintas alturas con el fin de obtener conclusiones de cómo varía la concentración de radón con las variables espaciales y así determinar si su distribución es homogénea en la sala. Además, se dejaron midiendo durante todo este periodo de invierno para ver como afectaba una época de cierta inestabilidad atmosférica, fría y húmeda.

En la Figura 3-10 y Figura 3-11 se muestra la ubicación de los medidores de radón utilizando el modelo 3D del despacho, creado con el software Siemens NX. Asimismo, en la Figura 3-12 se adjunta una imagen de los distintos medidores en el despacho 114.

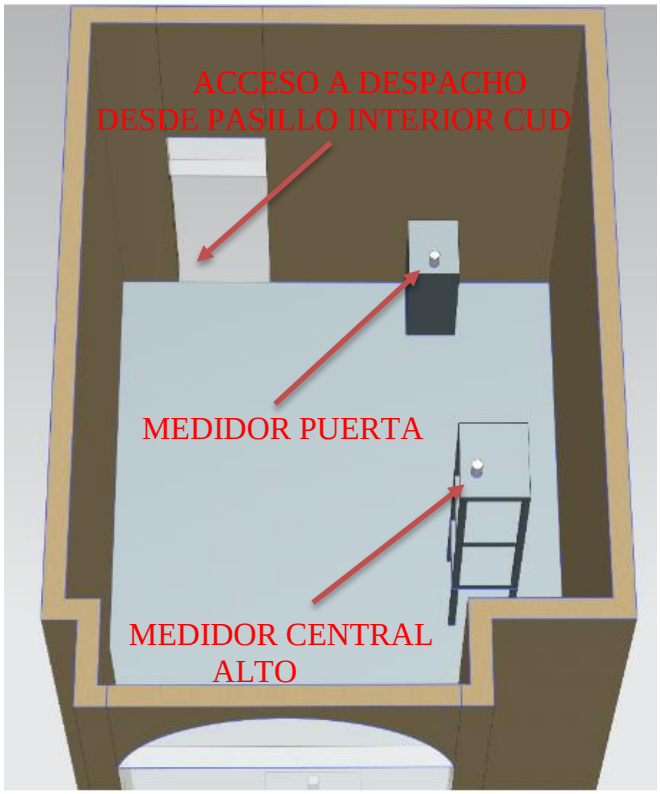


Figura 3-10 Situación de los medidores #9 y #13 en el despacho 114

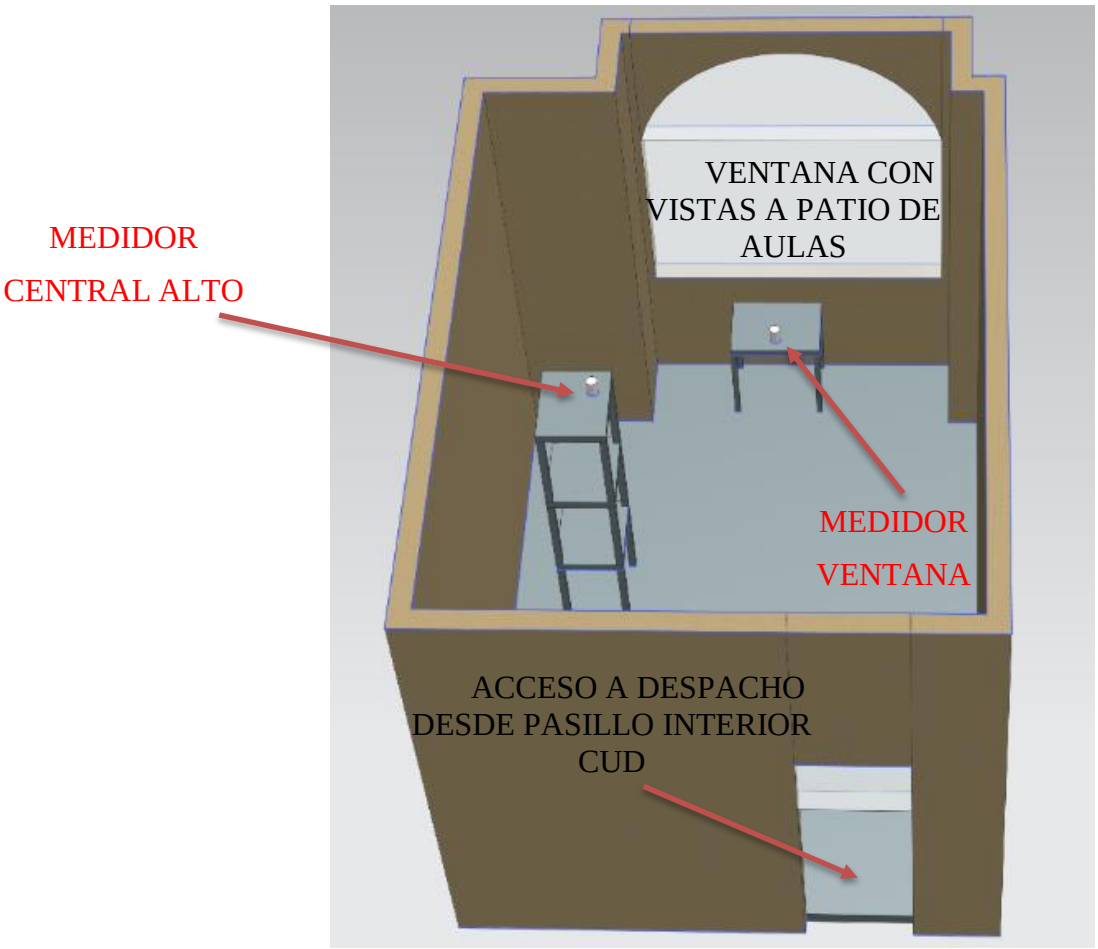


Figura 3-11 Situación de los medidores #5 y #9 en despacho 114

Figura 3-12 De izquierda a derecha medidores ventana, central alto y puerta

Una vez que ya se pudieron extraer ciertas conclusiones sobre la distribución de radón en el despacho, a partir del día 19 de enero, a las 11:45 h, se decidió cambiar la ubicación del medidor #5, pasando a estar en la misma vertical que el "medidor central altos", a una altura de 0,45 m (Figura 3-13). Los medidores #9 y #15 se mantuvieron en la misma ubicación y se eliminó el "medidor puerta". La designación de los medidores para esta situación quedó según se indica en la Tabla 3-3:

Nº del equipo	Localización en despacho 114	Altura	Designación final
5	Silla bajo medidor central alto	0,45 m	Medidor central bajo
9	Mesa a gran altura en el centro	2,3 m	Medidor central alto
15	Falso techo	3,75 m	Medidor falso techo

Tabla 3-3 Designación y ubicación de los medidores de radón en el despacho 114 a partir de 19 de enero

Figura 3-13 Nueva situación del medidor #5 a partir del 19 de enero

Para poder observar la nueva situación de los medidores a partir del día 19 de enero, obsérvese el modelo 3D representado en la Figura 3-14:

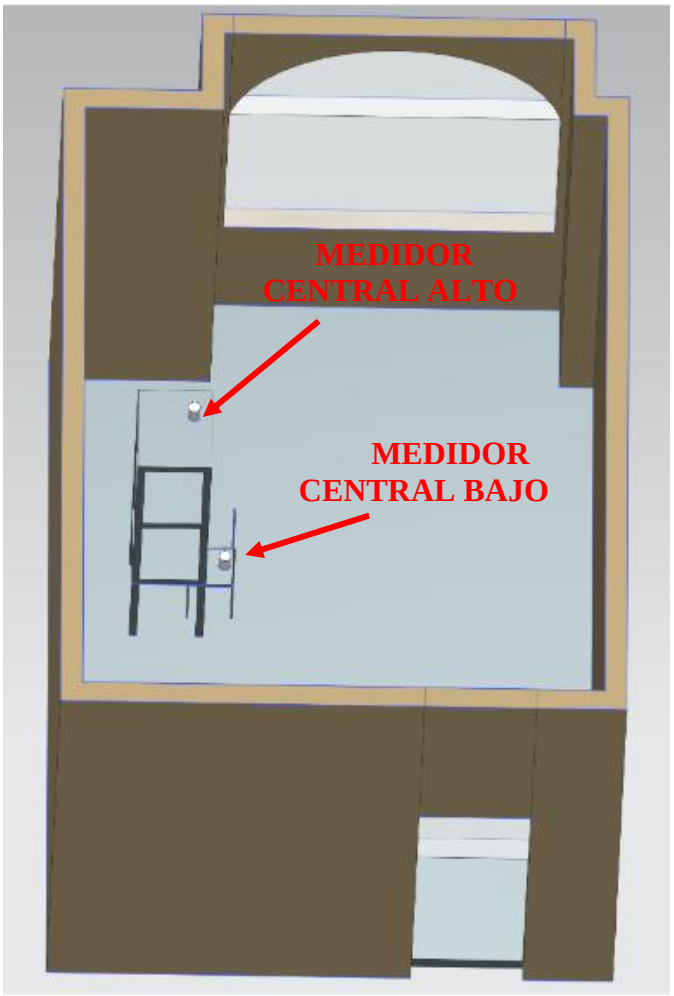


Figura 3-14 Situación de los medidores de radón a partir del 19 de enero

Este cambio que se ha realizado en la situación de los medidores ha sido únicamente con objeto de analizar de forma más extensa la distribución espacial de radón. Para el resto de factores, se ha optado por emplear únicamente los datos de un único medidor por simplicidad. Este medidor que se utilizará como referencia es el medidor central alto.

Además, se instalaron dos medidores de radón en el despacho contiguo 112 con el objeto de investigar la influencia que puedan tener las características constructivas, geológicas y de uso de este despacho sobre las concentraciones de radón en el despacho 114, y viceversa: la influencia del despacho 114 sobre las concentraciones de radón en el despacho 112. Además, con el estudio de las concentraciones en el despacho 112 se pretendía. Estos medidores se han designado de la siguiente manera (Tabla 3-4):

Nº del equipo	Localización en despacho 112	Altura
137	Mesa de despacho	0,8 m
141	Falso techo	3,75m

Tabla 3-4 Medidores de radón en el despacho 112 (elaboración propia)

Por otro lado, como complemento necesario para el estudio de uno de los factores investigados en este trabajo, también se emplearon las mediciones de otro TFG de un medidor situado en el aula nº21 (simulador de navegación) que se encuentra a 20 m del despacho 114 (Figura 3-15).

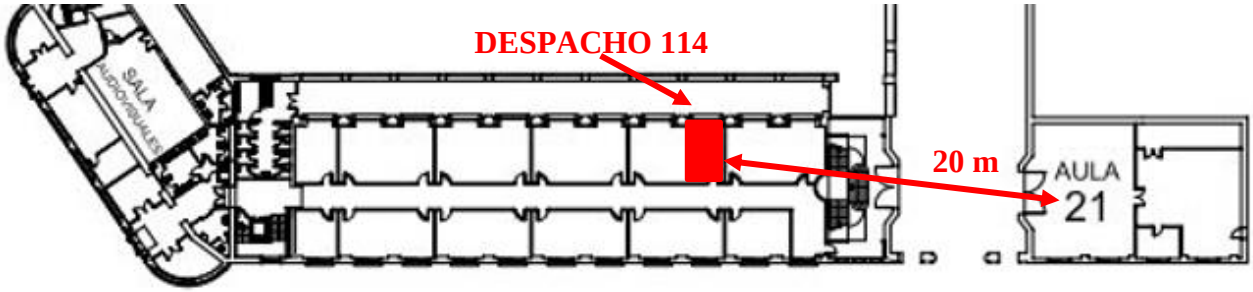


Figura 3-15 Situación aula 21 (simulador de navegación)

Cabe destacar, que a partir del día 19 de enero de 2021 se abrió la ventilación (aporte de aire exterior) en el despacho 112, que se había mantenido cerrada desde el comienzo de la fase experimental (22 de diciembre) y sin ocupación desde esta fecha hasta el día 11 de enero. Debido a que los falsos techos están comunicados, se quiso evitar en la medida de lo posible que la ventilación y la actividad humana en el despacho 112 afectase a la concentración de radón en el despacho 114. Por ello, se selló la salida del fancoil (Figura 3-16 y Figura 3-17) en el despacho 114, que es el encargado en estos espacios de impulsar aire fresco del falso techo al propio despacho.

Figura 3-16 Rejilla de impulsión del Fancoil del despacho 112

A continuación, se presenta una imagen de la rejilla del fancoil sellada (Figura 3-17):

Figura 3-17 Aislamiento de fancoil despacho 112

3.3.3 Análisis de correlación de variables

Por otro lado, hay que tener en cuenta que para hallar las correlaciones entre el radón y las distintas variables, se ha llevado a cabo un análisis estadístico. Se han empleado los coeficientes de correlación y lineal y coeficientes de determinación para examinar estas relaciones.

El coeficiente de correlación lineal de Pearson devuelve un valor que indica el grado de dependencia entre dos variables, es decir, como de fuerte es una relación lineal entre dos variables. Permite así determinar si es conveniente realizar un ajuste lineal de una variable para poder explicar la otra. El signo de este coeficiente puede ser tanto positivo como negativo, indicando este último signo, una relación inversa entre ambas variables, es decir, cuando una aumenta, la otra disminuye.

Para interpretar el coeficiente de correlación lineal entre dos variables, los niveles de correlación se consideran de acuerdo a la Tabla 3-5:

Valor del coeficiente de correlación	Significado
0,00 a 0,19	Correlación muy débil
0,20 a 0,39	Correlación débil
0,40 a 0,69	Correlación moderada
0,70 a 0,89	Correlación fuerte
0,90 a 1,00	Correlación muy fuerte

Tabla 3-5 Niveles de correlación lineal

El coeficiente de determinación (R^2), también conocido como bondad de ajuste, permite determinar si un modelo es aceptable, indicando así la certeza del modelo. Se puede obtener elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson, pero sólo en el caso de regresiones lineales simples.

4 RESULTADOS

A lo largo de los siguientes subapartados se presentan los resultados obtenidos de los distintos medidores y sus relaciones con las distintas variables que pueden modificar la concentración de radón. Con los datos obtenidos, se llevará a cabo un análisis, para posteriormente obtener conclusiones en base a estos resultados.

Para la representación de los datos, se ha empleado el programa Microsoft Excel. En las distintas gráficas que se van a mostrar, la concentración de radón se representa en el eje vertical primario (situado a la izquierda), mientras que en el eje horizontal primario (abajo) se representa el tiempo en días u horas. Por último, para comparar los valores de radón con las variables meteorológicas (presión, viento entre otros), se representan estos factores en el segundo eje vertical (derecha). A pesar de ello, en cada gráfica se adjunta una leyenda para identificar lo que se está representando.

4.1 Influencia de factores constructivos

4.1.1 Distribución espacial de radón en despacho 114

En primer lugar, se muestran las concentraciones medias obtenidas de cada uno de los medidores en la Tabla 4-1 (para más detalle en la ubicación de estos medidores, consultar la sección 3.3.2):

Nombre del equipo	Concentración media (Bq/m^3)
Medidor ventana (0,8 m)	554
Medidor central alto (2,3 m)	575
Medidor puerta (1 m)	599
Medidor falso techo (3,75 m)	302

Tabla 4-1 Concentraciones medias obtenidas en distintos puntos del despacho 114, 22/12-18/01

Como se puede observar, los niveles medios de radón obtenidos durante este periodo de tiempo superan las concentraciones permitidas tanto por el CTE [19] como por la Directiva Europea (2013/59/Euratom) [18], que dictamina 300 Bq/m^3 para edificios existentes.

A continuación, en la Figura 4-1, se puede observar la evolución de la concentración de radón obtenida con cada uno de los medidores:

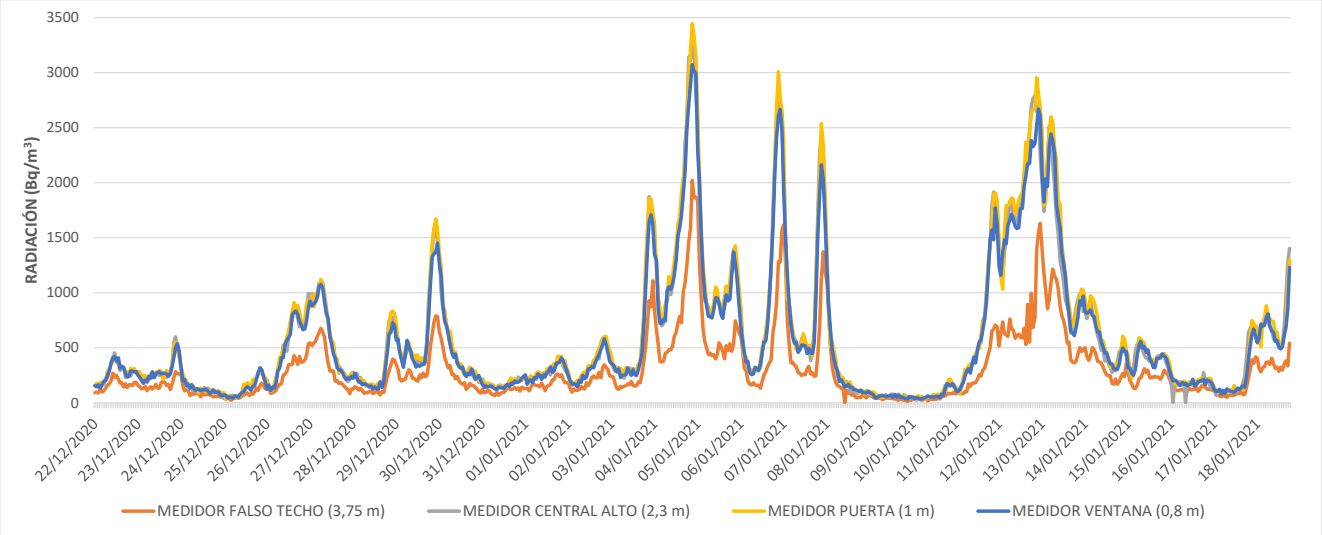


Figura 4-1 Gráfico combinando de medidores 22/12 a 19/01

Examinando esta gráfica, observamos que las concentraciones de radón más altas se obtienen en el medidor puerta a una altura de 1 m (color amarillo), mientras que las concentraciones más bajas se presentan en el medidor falso techo situado a una altura de 3,75 m (color naranja). De media, la concentración en el medidor puerta es hasta casi 2 veces mayor que la del falso techo. Para ver mejor esta diferencia, se representan sólo estos dos medidores en el siguiente gráfico (Figura 4-2):

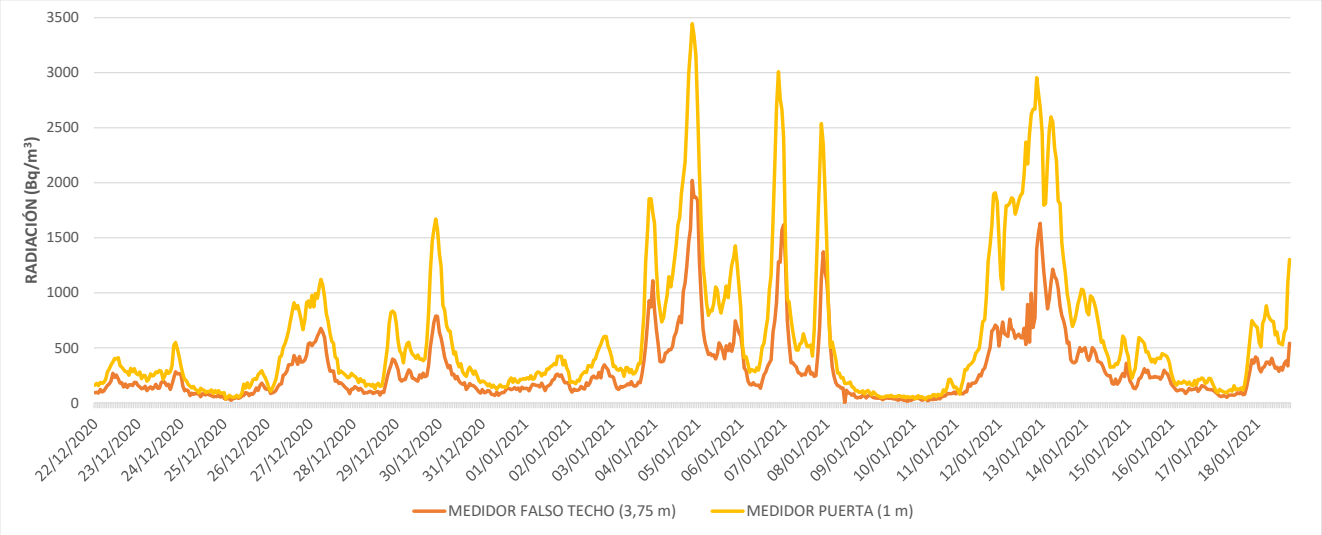


Figura 4-2 Medidores falso techo y puerta 22/12 a 19/01

Estos equipos se encuentran situados a distintas alturas (Tabla 3-2), por lo que parece que se observa que la concentración de radón disminuye con la altura. Además, de acuerdo a los estudios científicos, las concentraciones de radón obtenidas más cerca del suelo son más altas [4] ya que el radón es mucho más pesado que el aire, por lo que es más difícil que ascienda. Estos resultados obtenidos son acordes a lo reseñado por el CSN [6], de lo que podemos deducir que el radón se distribuye de una forma más o menos uniforme de forma horizontal. Hay que añadir, que la estructura del falso techo está formada por delgadas láminas de aluminio que constituyen, en cierta manera, una barrera contra el radón y parece tener concordancia con los valores obtenidos, ya que la media de radón del medidor falso techo es mucho menor respecto al resto de medidores. Parece que esta estructura puede actuar como mecanismo que limita el paso del aire, y uno de los principales mecanismos de movimiento del radón es el propio movimiento del aire.

Asimismo, también se produce el mismo proceso, aunque en menor medida, entre los medidores central alto y el medidor puerta donde las concentraciones medias van disminuyendo en altura.

Entre los medidores de la ventana y de la puerta situados casi a la misma altura (0,8 m y 1 m respectivamente) los niveles medio son muy similares. Aunque la diferencia de altura es mínima, cabría esperar una concentración media mayor en el medidor situado en la mesa junto a la ventana ya que se encuentra más cerca del suelo. Sin embargo, el sellado de la ventana es imperfecto y se produce un cierto intercambio de aire con el exterior que puede hacer reducir esta concentración.

Para completar el estudio de la influencia de la altura en la concentración de radón, se cambió la situación del medidor ventana el día 19 de enero, pasando a tener dos medidores en la misma vertical separados 1,9 m (ver apartado 3.3.2). En la Figura 4-3 podemos observar el resultado obtenido por estos dos medidores:

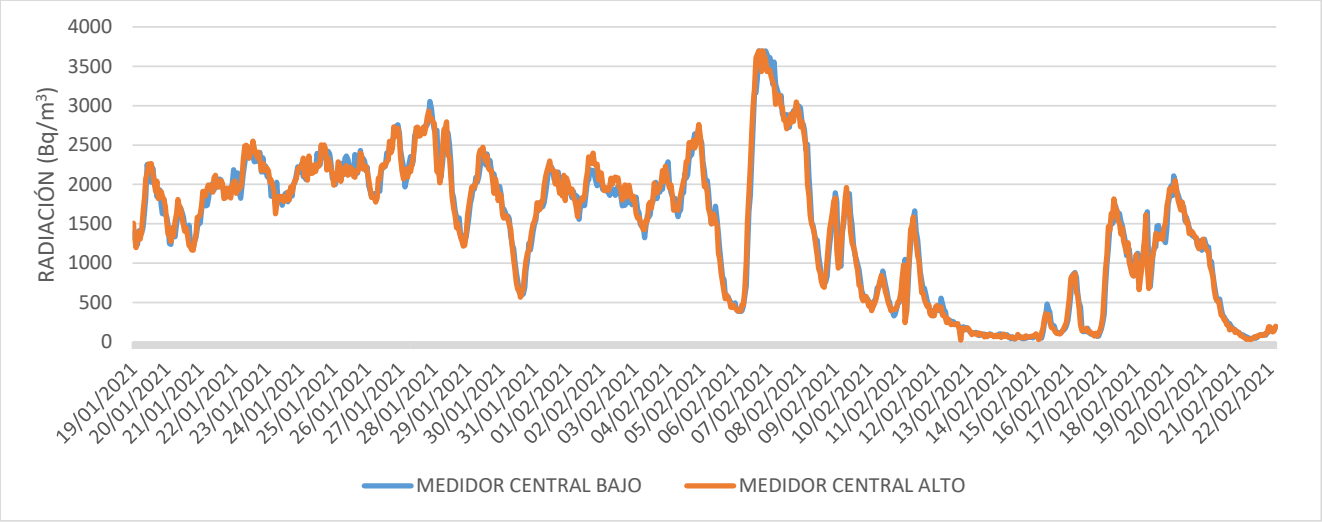


Figura 4-3 Medidores en la misma vertical 19/01-22/02

En base a esta gráfica podemos observar que el comportamiento de ambos es prácticamente idéntico, sólo encontrándose pequeñas variaciones en ciertos días en los que el medidor central bajo recibe mayor concentración debido posiblemente a que se encuentra más próximo al suelo. A pesar de ello, la disminución de concentración con la altura es tan débil que parece claro que el falso techo supone una barrera, pues las concentraciones por encima de esta disminuyen considerablemente.

En conclusión, como se ha podido observar, de forma general se ha observado una distribución prácticamente uniforme de la concentración en todo el volumen por debajo del falso techo, con ligeros descensos en altura y con la cercanía a la ventana.

Gracias a esta conclusión, se tomará el medidor central alto como referencia para el estudio de los demás factores que puedan influir sobre la concentración de radón. Además, este medidor ha permanecido en su lugar durante todo el período en que se han tomado datos y se ve menos afectado por las posibles infiltraciones de aire a través de la ventana y la puerta.

4.1.2 Influencia de la ventilación mecánica sobre los niveles de radón

A partir del día 9 de febrero las condiciones del despacho 114 sufren modificaciones. Se procedió a la apertura de la trampilla de ventilación mecánica por completo. Además, a partir de esta fecha, la puerta del despacho se abre en reiteradas ocasiones. Por tanto, a partir de este día el despacho se encontraba con unas condiciones de ventilación variable, distintas a las que el despacho estaba sometido antes de esta fecha. A continuación, observaremos el comportamiento descrito por el radón a partir de este día tanto en el medidor central alto como en el medidor del falso techo (Figura 4-4).

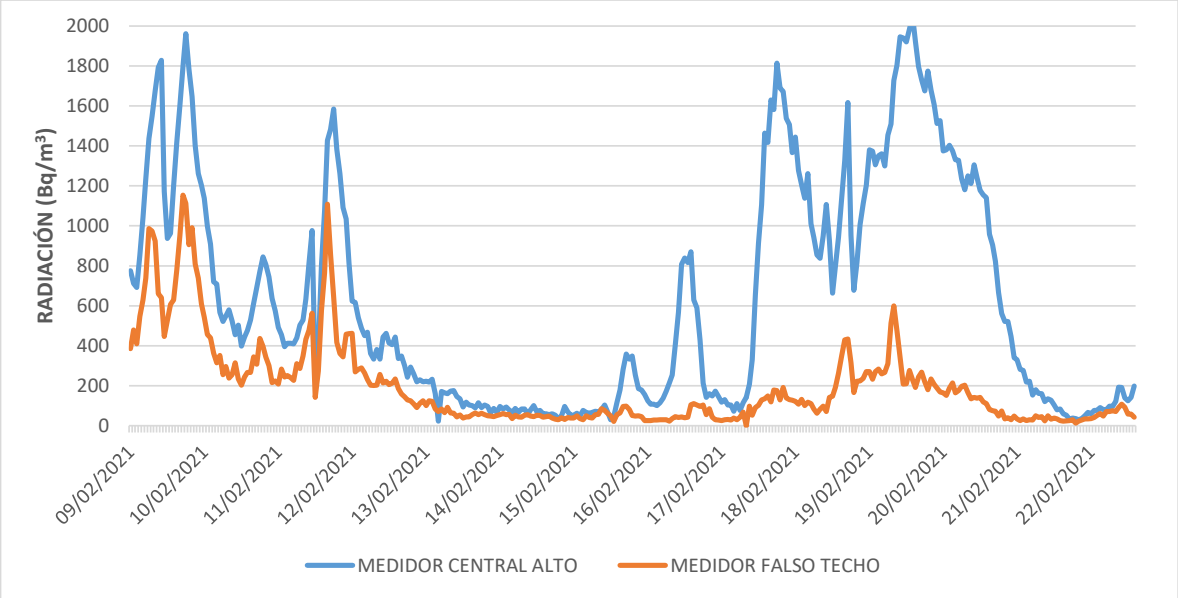


Figura 4-4 Concentración de radón en el despacho 114 con condiciones de ventilación variables

Cabe destacar de estos resultados, que las concentraciones medias obtenidas en el medidor del falso techo son menores durante este periodo en el cual la trampilla se encontraba abierta y dirigía flujos de aire frío al falso techo. La concentración media obtenida en este medidor durante estas dos semanas ha sido de 175 Bq/m^3; en cambio, si observamos lo obtenido en la Tabla 4-1, cuando la trampilla se encontraba cerrada, los niveles eran mayores. La diferencia de concentraciones medias entre ambos casos es de hasta 125 Bq/m^3. En el caso del medidor central alto, durante el periodo a partir del 9 de febrero, la concentración media obtenida ha sido de 643 Bq/m^3. En cambio, durante el periodo con trampilla cerrada, la concentración fue de 575 Bq/m^3 (Tabla 4-1), lo que supone un incremento en los niveles de radón, efecto contrario al obtenido en el medidor falso techo. El hecho de tener concentraciones más elevadas en el interior del despacho durante la segunda fase indica que la inmisión promedio de radón ha sido superior en este periodo de tiempo, debido a múltiples factores. Sin embargo, las concentraciones en el falso techo son menores, demostrando que para que la ventilación con aire fresco en el falso techo llegue a funcionar como medida de mitigación, será necesario impulsar el aire del falso techo hacia el propio despacho. Tal y como está concebida la instalación de ventilación-climatización del CUD, este efecto puede conseguirse poniendo en marcha el ventilador del fancoil situado en el falso techo, que además cuenta con tres velocidades de funcionamiento.

Como ya se observará en la Figura 4-9 donde se comparan los medidores del falso techo de ambos despachos, en ese caso la diferencia de concentraciones entre ambos despachos era 180 Bq/m^3. Sin embargo, cuando la ventilación se encontraba abierta, esta diferencia es menor, con un valor de 90 Bq/m^3. Para poder observar mejor esta diferencia se adjunta la siguiente gráfica (Figura 4-5):

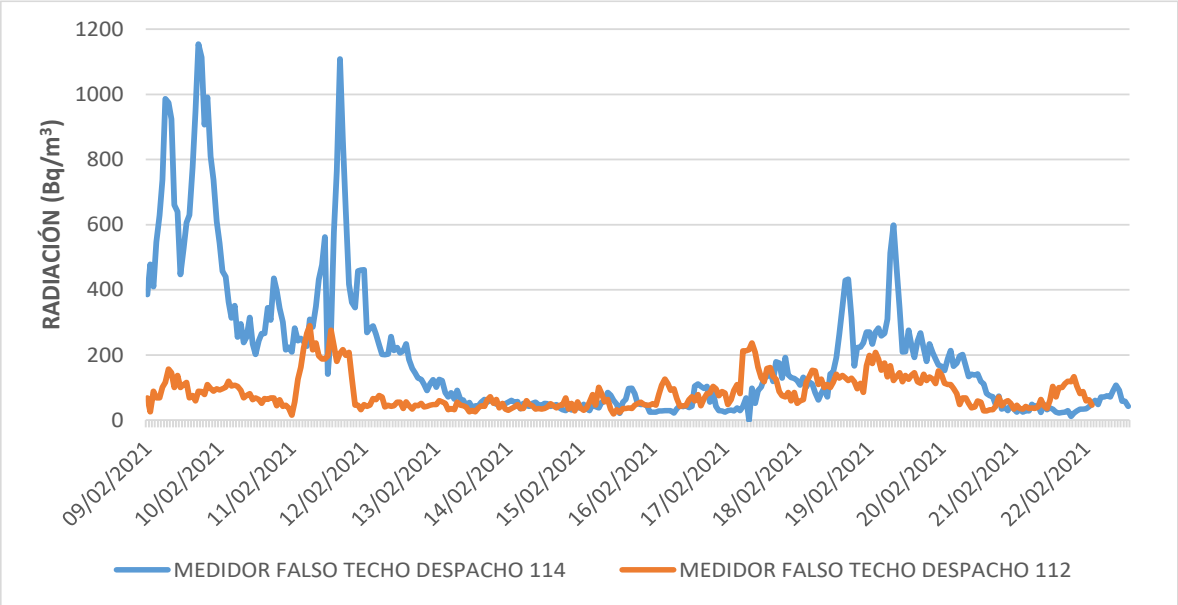


Figura 4-5 Medidores falso techo despacho 112 y 114 9/2-22/2

Se puede observar que, entre los días 13 y 17 de febrero, el comportamiento entre ambos despachos es muy similar y la concentración media es también más reducida. Además, el comportamiento entre el medidor central alto y falso techo es muy similar también para estos días. Este hecho es posible que se deba a que el aire circule aunque en muy reducida cantidad desde el falso techo hacia el despacho. Aunque los factores meteorológicos también pueden haber influido durante este periodo, estos deberían afectar a ambos despachos, por lo que no parece una razón suficiente para explicar la menor diferencia encontrada entre sus concentraciones. Por lo tanto, la ventilación que se produce debido a la apertura de un conducto de ventilación mecánica, antes aislado (Figura 3-6), y la apertura de la puerta con cierta frecuencia beneficia a que los niveles de radón sean menores en el despacho 114 y por tanto más próximos a los del 112. A pesar de ello, se concluye que el flujo de aire de ventilación suministrado al despacho 114 no es suficiente para reducir los niveles a la normativa establecida (300 Bq/m^3). Sin embargo, en el despacho 112 la ventilación recibida cumple estos márgenes. Por tanto, este caudal en el despacho 114 debe ser aumentado en determinadas ocasiones para asegurar los niveles adecuados de radón.

4.1.3 Distribución del gas radón entre dos espacios contiguos

En el presente apartado se mostrará de qué forma se produce la difusión de radón entre dos espacios contiguos. Para ello, los espacios que se han seleccionado en este estudio son los despachos 112 y 114. Su disposición aparece reflejada en la Figura 3-2.

Como se mostrará en el apartado 4.2, en el subsuelo del terreno del despacho 114 puede haber algún tipo de anomalía física que desprende grandes cantidades de radón. Por tanto, partiendo de este punto como posible foco de radón, se analiza el camino que realiza entre estos dos espacios.

En primer lugar, el radón emana del terreno y atraviesa la solera del despacho 114. En este espacio se distribuye de forma bastante uniforme tanto horizontalmente como en altura como ya se observó en el apartado 4.1.1. Por tanto, desde este despacho el radón puede seguir varias vías para infiltrarse en el despacho 112:

1) Pared y muro compartido entre ambos despachos: La gran movilidad que dispone el radón permite atravesar estos materiales a través de los poros de estos. De esta forma, en los materiales de construcción, además de su propia aportación debido a sus propiedades, también se infiltra el radón procedente del despacho 114 a través de sus poros. Cabe destacar que en la Tabla 2-6 se

indicaban los espesores necesarios para asegurar la estanqueidad al gas. En nuestro caso, estas paredes no poseen esos espesores especificados.

2) Falso techo: El falso techo de ambos despachos se encuentra unificado, es decir, no hay ningún tipo de división ni barrera entre ambos despachos en esta zona. Por consiguiente, el radón que ascienda por el despacho 114, aunque este será mucha menor cantidad debido a que se irá disipando en altura y la estructura del falso techo genera una barrera, también puede trasladarse a la zona del falso techo del despacho 112. Sin embargo, los niveles en esta zona serán mucho menores ya que el radón también se diluirá por el falso techo. Este proceso parece tener relación con la diferencia observada entre ambas zonas del falso techo en la Figura 4-9 donde el medidor del falso techo del despacho 112 obtenía niveles inferiores al del despacho 114. Cabe destacar, que el falso techo al generar una barrera al paso del radón, la cantidad desde este lugar al despacho será en cantidades casi nulas.

A pesar de la influencia de estos caminos, cabe resaltar que la principal fuente de radón del despacho 112 es el propio terreno sobre el que asienta este despacho. Por tanto, la influencia de estas vías queda en un segundo plano.

Para poder observar con claridad estos procesos, se presenta a continuación la siguiente imagen (Figura 4-6). Que muestra una representación gráfica de las principales vías de transferencia de radón del despacho entre dos despachos con diferentes concentraciones de radón.

Por tanto, se puede apreciar que el gas radón se infiltra a través de distintas vías como se ha podido observar.

Para analizar si los niveles de concentración de radón en el despacho 114 se ven afectados por la ventilación natural del despacho contiguo (112) se llevó acabo el siguiente experimento.

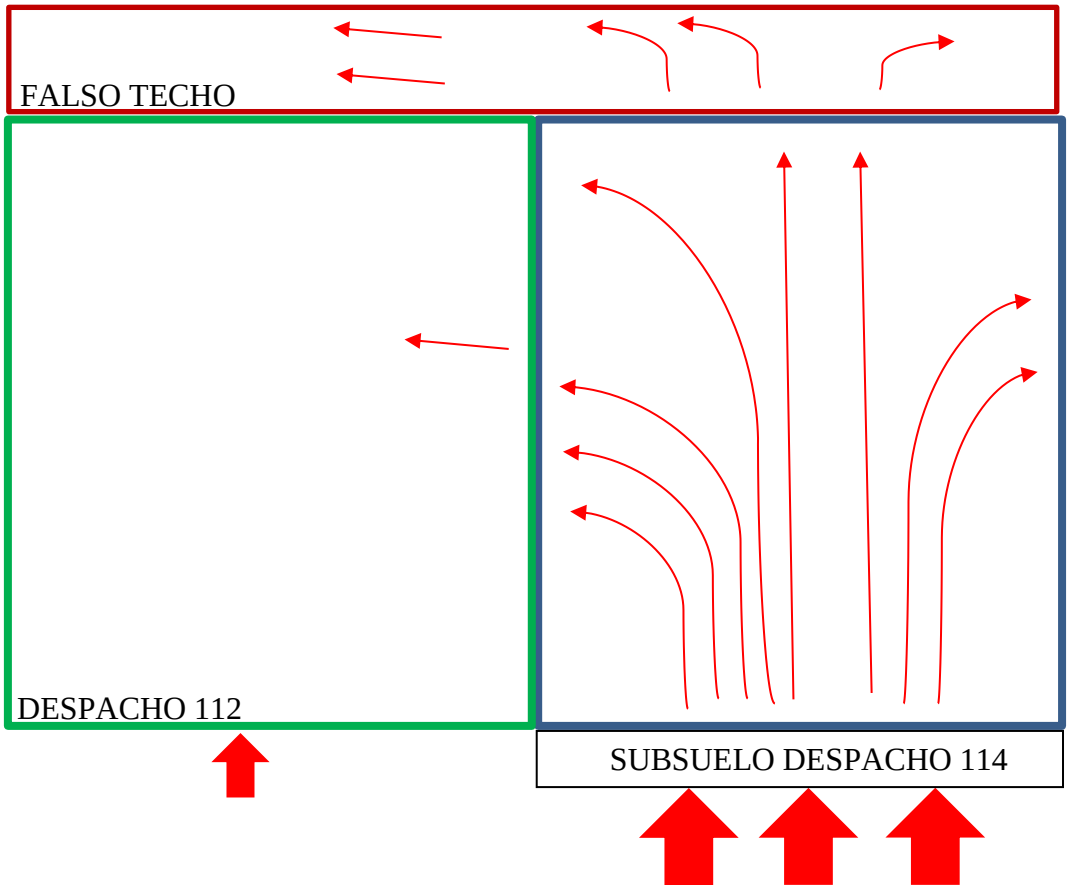


Figura 4-6 Principales vías de transmisión de gas radón entre dos despachos con diferentes concentraciones

4.1.4 Efecto de la ventilación del espacio contiguo (112) sobre despacho 114

El día 19 de enero de 2021 se cerró la ventilación del despacho 112 que conecta con el despacho 114 entre las 09:50 horas y las 11:00 horas. De la misma manera, se abrió la ventana de este despacho. El objetivo de este proceso era obtener posibles conclusiones en cuanto a si se produce una corriente o flujo de aire entre los despachos 112 y 114 que pudiera modificar los niveles de radón. En primer lugar, se mostrarán los datos obtenidos a lo largo de este periodo (Tabla 4-2). Los datos de concentración de radón están medidos en Bq/m^3.

Nombre medidor	Altura (m)	Radón (09:50)	Radón (10:00)	Radón (10:35)	Radón (10:45)	Radón (11:00)
Central alto	2,3	1277	1313	1380	1403	1456
Falso techo	3,75	777	826	857	869	890
Mesa 112	1	471	393	247	222	209
Falso techo 112	3,75	305	335	281	260	234

Tabla 4-2 Evolución concentración de radón con ventilación apagada

Como se puede observar, la concentración de radón de los medidores mesa 112 y falso techo 112, situados en el despacho del mismo número, disminuye con el paso del tiempo. El motivo de este hecho, se debe a que gracias a que la ventana se encuentra abierta, el intercambio de aire que se produce con el exterior es el suficiente para que los niveles de radiación disminuyan, ya que el aire del exterior tiene una menor concentración de radón que el del interior.

Sin embargo, todos los medidores del despacho 114 muestran un incremento en sus concentraciones en este periodo. Hay que tener en cuenta que la ventilación mecánica del despacho 112, contiguo a este, se encuentra cerrada. De esta manera, el despacho 114 se ha vuelto más estanco, pues no recibe ningún intercambio de aire. Por tanto, no se aprecia ningún intercambio de aire entre ambos despachos que pudiera modificar las concentraciones de radón. Además, las concentraciones del despacho 114 siguen aumentado debido posiblemente a un pequeño efecto de succión en el interior de este espacio motivado por la apertura de la ventana en el despacho 112. Por otro lado, en el despacho 112, es visible que la ventilación de la ventana afecte principalmente a las zonas bajas del espacio, ya que se reducen en el medidor mesa los niveles en gran medida. En cambio, el radón debido a su peso, se disipa en altura y no reduce apenas las concentraciones en el falso techo.

4.2 Análisis de la geología de la zona de estudio

Para comparar las concentraciones obtenidas en el despacho 114 con otros espacios cercanos del edificio en busca de una posible influencia de la geología de la zona, se instalaron dos equipos en el despacho 112, compartimento contiguo a nuestro lugar de estudio y unido por el falso techo. Los medidores se designaron anteriormente en la Tabla 3-4.

En los medidores del despacho 112 se obtuvieron las siguientes concentraciones medias (Tabla 4-3):

Nº del equipo	Localización en despacho 112	Concentración media (Bq/m^3)
137	Mesa despacho	140
141	Falso techo	123

Tabla 4-3 Concentraciones medias de medidores despacho 112

En la Figura 4-7 podemos ver la gráfica combinada de todos los medidores de ambos espacios entre el 22 de diciembre y el 18 de enero:

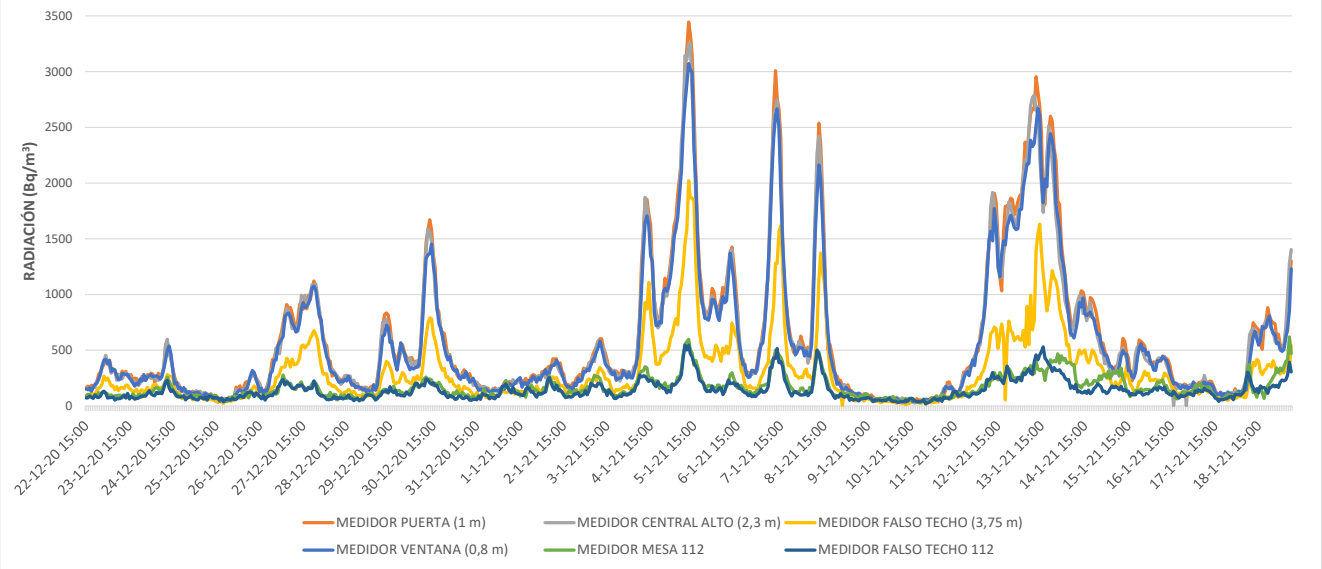


Figura 4-7 Gráfico combinado despachos 112 y 114

Para poder observar la diferencia de concentraciones entre estos dos despachos con mayor claridad, se han comparado entre el 22/12-18/1 el medidor del despacho 112 con el medidor del despacho 114, que posee las concentraciones medias más bajas (medidores falso techo despacho 112 y 114) y más altas respectivamente (medidor puerta y medidor mesa 112). Los resultados obtenidos pueden observarse en las Figura 4-8 y Figura 4-9, respectivamente.

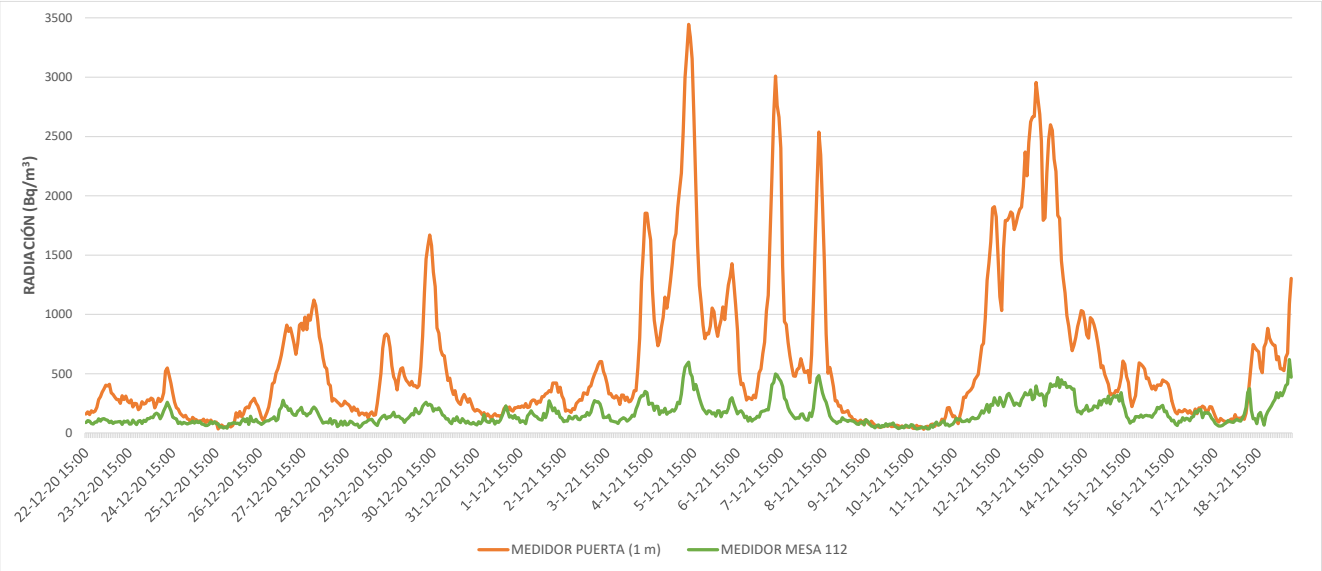


Figura 4-8 Medidores concentraciones más altas despacho 112 y 114

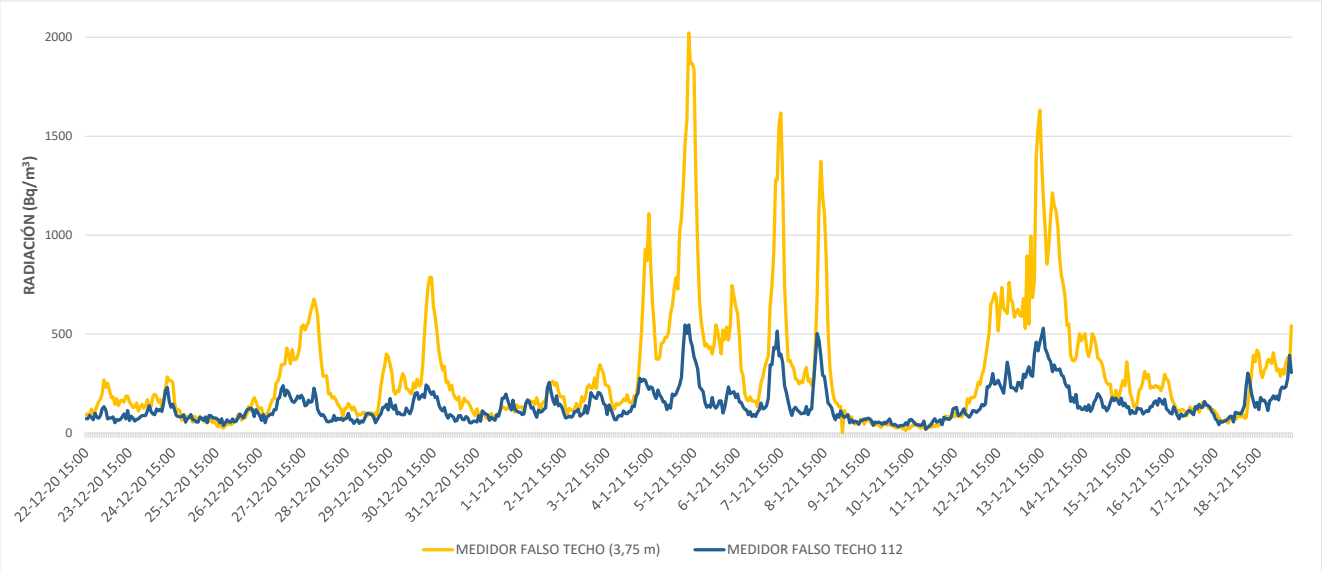


Figura 4-9 Medidores concentraciones más bajas despacho 112 y 114

Cabe destacar de estos resultados, que aunque la tendencia en el comportamiento del radón es similar, existe una gran diferencia de concentraciones entre estos dos espacios contiguos. En el caso del despacho 112, las concentraciones mantienen los valores estipulados por las normativas durante casi toda la fase. Sin embargo, no se puede obtener el mismo resultado en nuestro lugar de estudio.

Por otro lado, analizaremos la composición geológica de la zona en la que se encuentra la ENM. Para poder conocer la composición del subsuelo, se han empleado los datos aportados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). A continuación, en la Figura 4-10 podemos observar parte de la hoja número 16 de Pontevedra del mapa geológico de España [53].

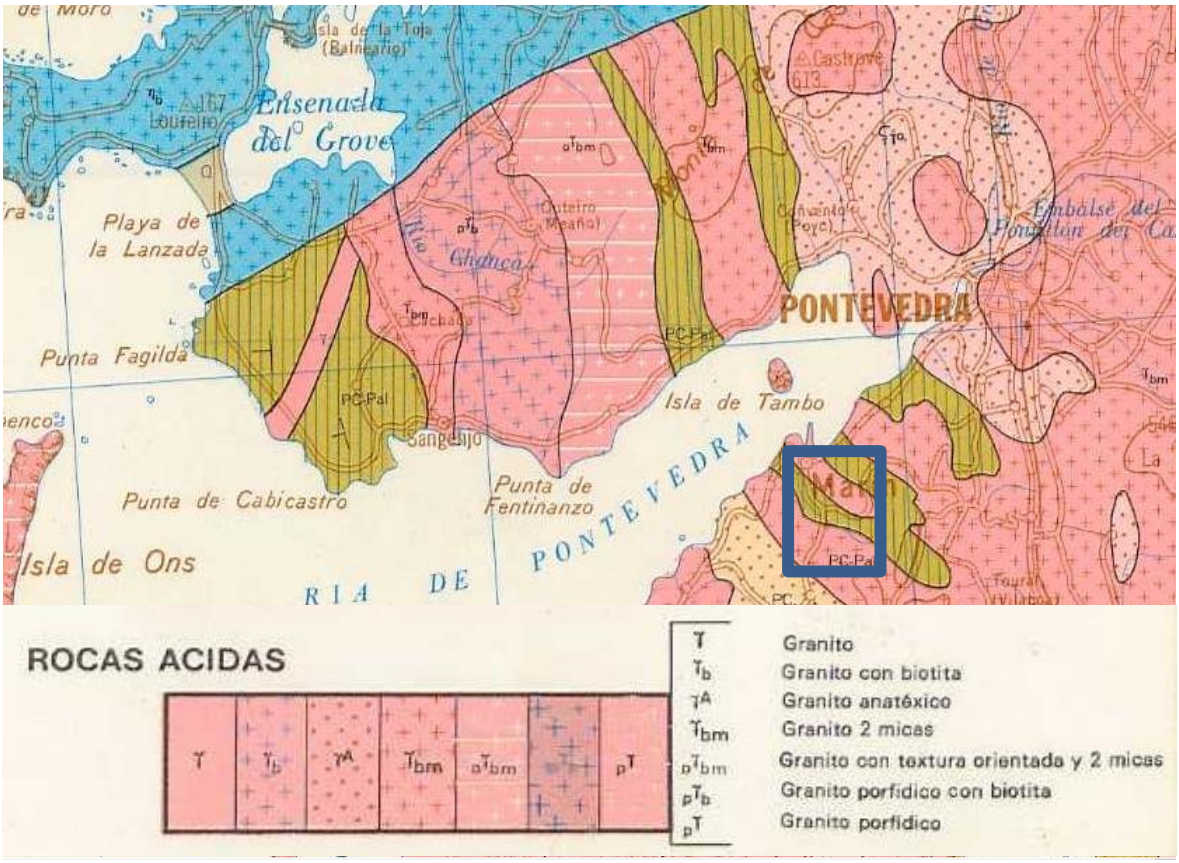


Figura 4-10 Mapa geológico de Pontevedra Fuente: IGME [53]

De acuerdo a la leyenda de dicho mapa, en la zona de estudio existe principalmente granito dos micas (Tbm en color rosado en la Figura 4-10). La zona de color verde de acuerdo a la leyenda corresponde con un suelo indiferenciado. Por tanto, para esta zona el granito es el elemento que más favorece la presencia de radón ya que como se indicó en el apartado 2.1.1, el granito es de las rocas ígneas, la que mayor concentración de uranio contiene.

Con objeto de analizar en mayor profundidad esta zona desde un punto de vista geológico, se adjunta a continuación un mapa (Figura 4-11) del visor cartográfico digital del IGME [53]. En esta imagen se puede observar que en parte de la Escuela Naval Militar predomina principalmente rocas de origen granítico. Dentro de este tipo de roca, el IGME añade que en el lugar en el que se encuentra la ENM son granitos de dos micas (color rosa), al igual que en la Figura 4-10. Los granitos de dos micas se caracterizan por estar compuestos por biotita y feldespatos alcalinos. En la Tabla 2-1 se muestra que los granitos con biotita contienen mayor concentración de uranio (8,1 ppm) que los granitos de feldespato (2,7 ppm), por lo que se podría esperar una mayor concentración de radón en los edificios de la ENM situados sobre el primer tipo de granito. A pesar de ello, la precisión de estos mapas, no permite distinguir de forma diferenciada en que zona de la ENM se encuentran cada uno de estos compuestos.

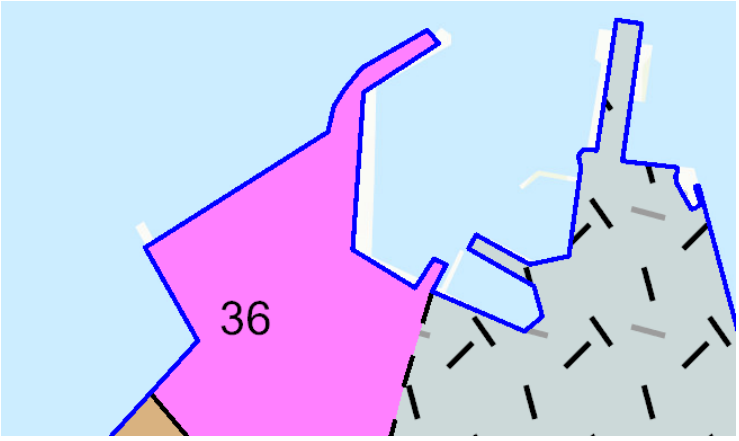


Figura 4-11 Visor cartográfico IGME para la zona de la ENM [53]

Además, se observa en la Figura 4-11 una diferencia de terrenos en zonas cercanas al despacho 114. En color rosa, se distingue el suelo granítico que se ha explicado anteriormente. Por otro lado, el suelo de color grisáceo, corresponde con acumulaciones de gravas, arcillas y limos que poseen características distintas en lo que a permeabilidad se refiere, que las rocas graníticas. Por tanto, en zonas cercanas a nuestro despacho, se podría encontrar una confluencia de distintos compuestos en el terreno.

Por otro lado, hay que añadir que los materiales de construcción que contienen estos despachos son principalmente ladrillos y hormigón que poseen elevados valores de concentración de radio (Tabla 2-3), pero que son idénticos en ambos casos. Sin embargo, ambos despachos se asientan sobre el mismo tipo de granito como se puede observar en la Figura 4-11. Por tanto, estos hechos no explican esta diferencia en las concentraciones de radón entre los dos despachos.

Esta diferencia entre los dos lugares se cree que puede deberse a que el subsuelo del terreno comprendido entre estos dos espacios puede ser distinto y parece posible indicar que haya una posible fisura o fuga en el terreno que facilita la ascensión del gas radón hacia el despacho 114.

Para completar esta posible hipótesis y ampliar el estudio de los factores geológicos, se realizaron mediciones en el aula 21 (simulador de navegación) durante un periodo sin uso, es decir, que se mantuvo cerrada y sin ventilación. Su situación puede observarse en la Figura 3-15. A continuación, podemos observar las concentraciones que se obtuvieron (Figura 4-12):

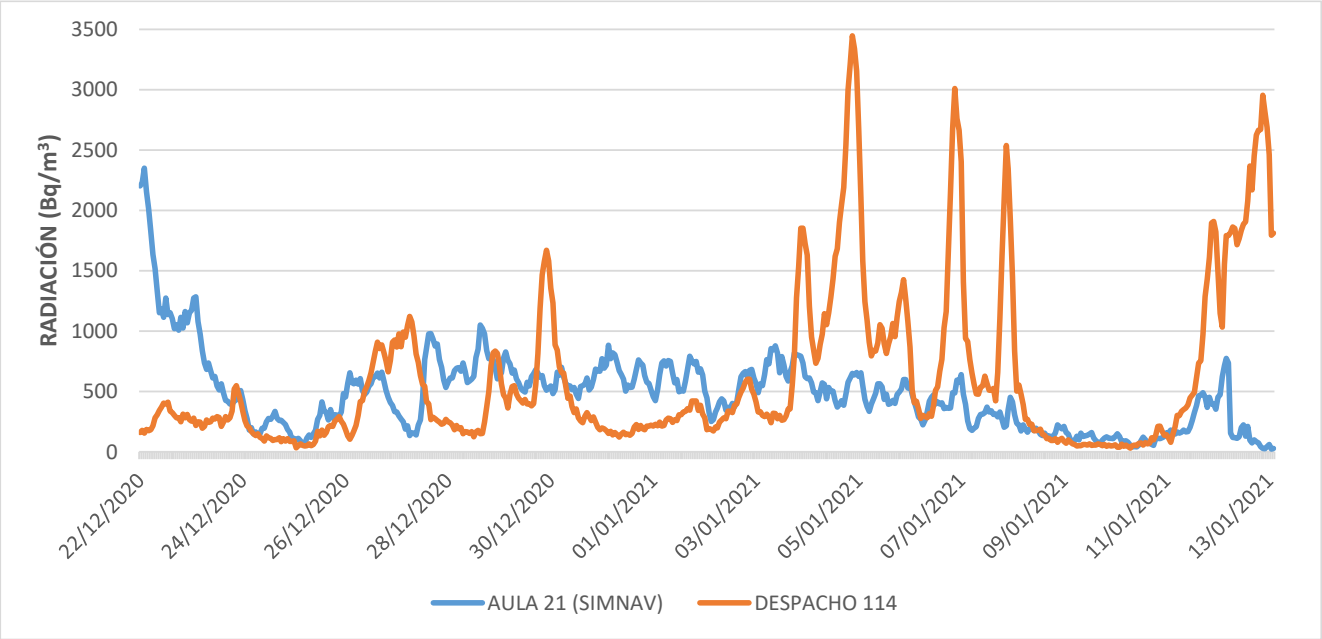


Figura 4-12 Gráfico combinado Despacho 114 y aula 21

Como se puede observar, la concentración en el aula 21 no mantiene relación con lo obtenido en el despacho 114, lo que añade que esta posible irregularidad en el subsuelo esté exclusivamente en el terreno que ocupa el despacho que se está estudiando. Además, estos datos demuestran que las características geológicas del edificio del aula 21, a pesar de estar próximo al edificio del CUD es posible que sean ligeramente diferentes como sugiere la Figura 4-11, ya que no sólo se distingue una diferencia en la concentración media de radón (como se observa entre los despachos 112 y 114) sino también en la tendencia que describe la curva.

A pesar de ello, no es posible obtener una conclusión clara respecto a la influencia de la geología debido a que no se poseen los medios para analizar la composición del subsuelo de la zona de estudio y tampoco para poder observar la posible irregularidad en el terreno bajo el despacho 114, para lo que sería de gran utilidad un escáner GPR, por ejemplo.

4.3 Influencia de los factores meteorológicos y su correlación con el radón

Para continuar con el análisis, se va a comparar los niveles de radón obtenidos en el despacho 114 con las distintas variables meteorológicas. En esta sección se observará la correlación del radón con el viento, presión, temperatura, precipitaciones y humedad. Para ello, se han desarrollado distintos gráficos tanto de forma general como diaria. Se compararán los resultados de las distintas variables meteorológicas frente a las concentraciones de radón. Además, para poder obtener la influencia de estos factores, se han creado diversos gráficos de dispersión que muestran los coeficientes de correlación de las distintas variables.

Cabe destacar que, en base a la información analizada en el estado del arte, no se espera que un único factor explique en su totalidad las variaciones que experimenta la concentración de radón y sea posible que distintos hechos se deban a la confluencia de distintos factores. Además, muchas de las variables meteorológicas están interrelacionadas, por lo que en muchos casos es complejo aislar su efecto.

Por último, en cada factor se han realizado las correlaciones globales de todo el periodo de muestreo al igual que se han analizado relaciones de casos más aislados.

4.3.1 Viento

En la Figura 4-13 y Figura 4-14 podemos observar dos comportamientos que se relacionan en parte con la literatura justificada anteriormente.

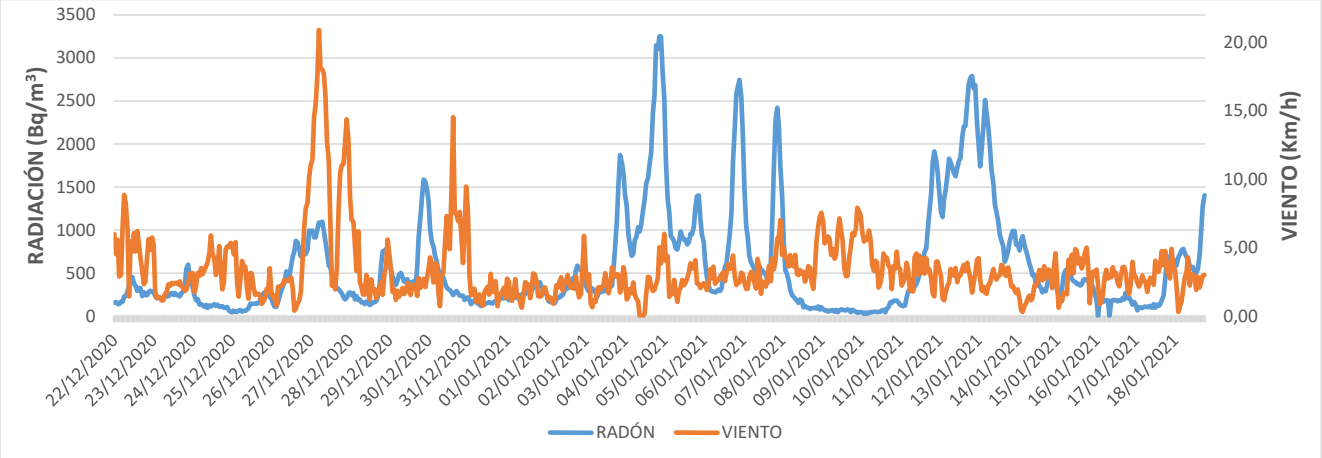


Figura 4-13 Concentración de radón-Viento medidor central alto 22/12-18/1 (2,3 m)

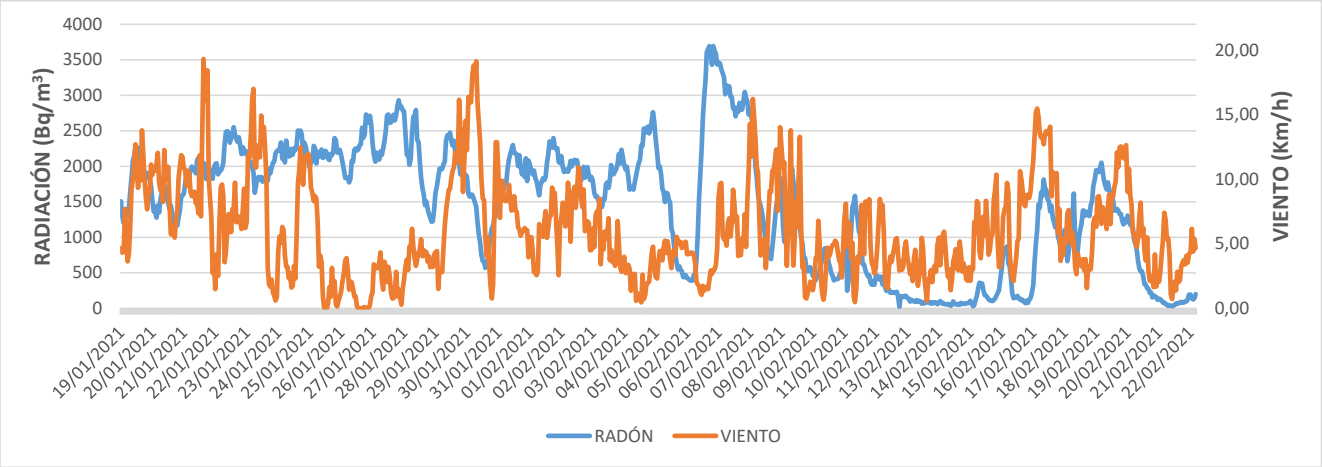


Figura 4-14 Concentración de radón-Viento medidor central alto 18/1-22/2 (2,3 m)

Por un lado, cuando se produce un incremento en la velocidad de viento se observa un aumento en la concentración de radón. Este hecho se debe a la fuerza de succión que genera el viento, lo que produce una depresión en el interior del despacho. Por ello, el despacho succiona aire que parece proceder del terreno que contiene radón. De esta manera, se elevan los niveles de radón como se observa en la Figura 4-13. Este efecto que generan los aumentos en las intensidades de viento sobre los niveles de radón, se producen hasta unos valores máximos de viento, puesto que si hubiera demasiada intensidad de viento podría diluir las concentraciones en el interior del despacho al infiltrase más aire del exterior en los interiores de estos espacios.

A continuación, se analiza la correlación global obtenida en el análisis estadístico. La correlación obtenida para todo el periodo de datos para este factor ha sido de 0,2410 (Figura 4-15).

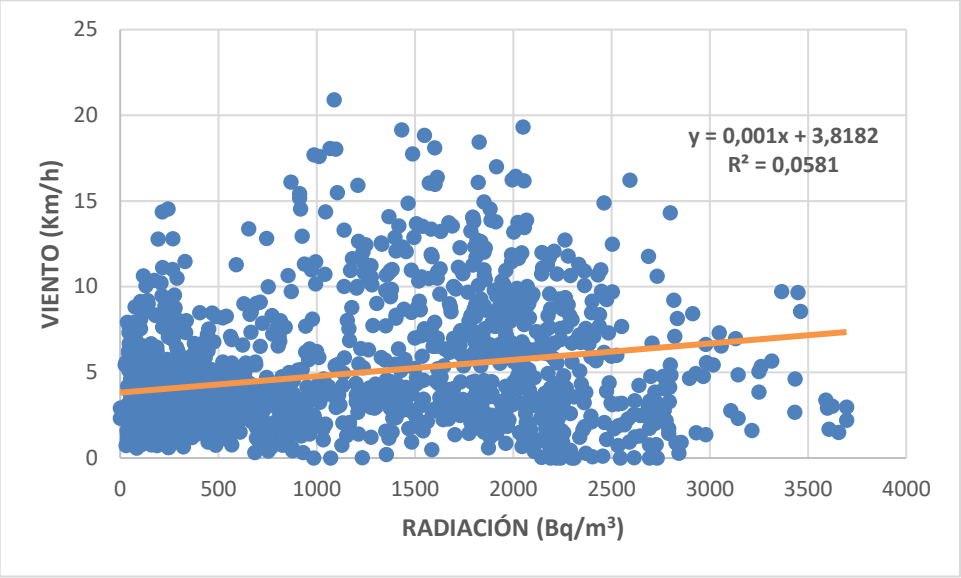


Figura 4-15 Correlación global radón-viento

De forma más particular, el efecto del incremento de la intensidad de viento puede observarse de forma más clara el día 27 de diciembre de 2020, donde se produce el pico máximo de viento de toda la fase de medición y se observa a su vez un incremento en la concentración de radón de hasta 500 Bq/m^3 (Figura 4-16). El análisis estadístico indica una correlación entre el radón y el viento de 0,7870 y un coeficiente de determinación de 0,6194 (Figura 4-17).

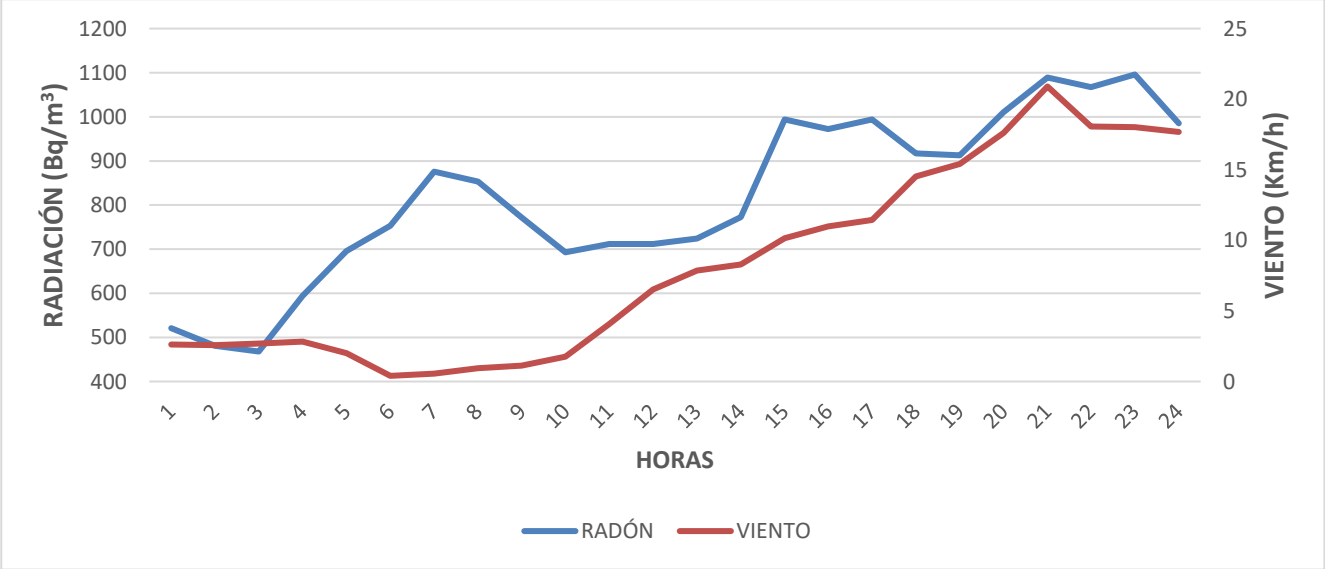


Figura 4-16 Incremento de radón con el viento 27 diciembre medidor central alto (2,3 m)

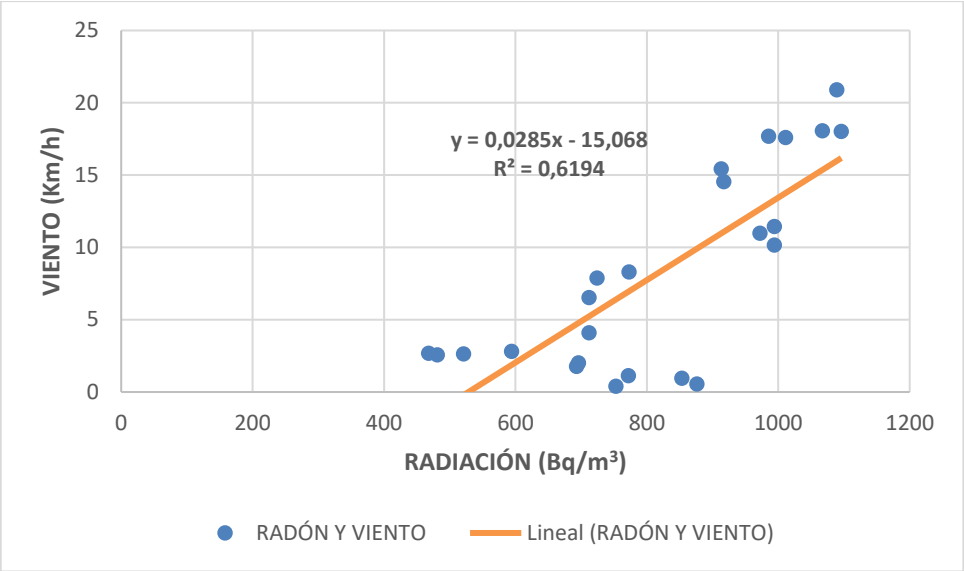


Figura 4-17 Correlación radón-viento 27 diciembre

El mismo proceso de forma similar también se observa entre los días 29 y 31 de enero (Figura 4-18). En este caso, el análisis de correlación indica un factor correlativo para el viento el día 29 de enero de 0,7455 y un factor de determinación de 0,5557 (Figura 4-19).

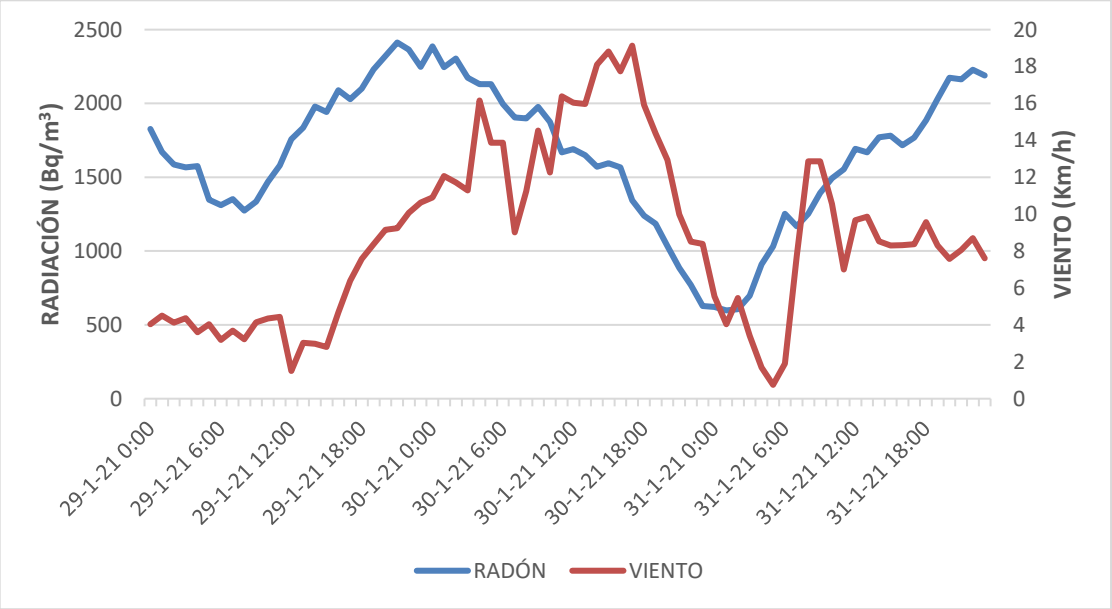


Figura 4-18 Incremento de radón con el viento 29/01-31/01 medidor central alto (2,3 m)

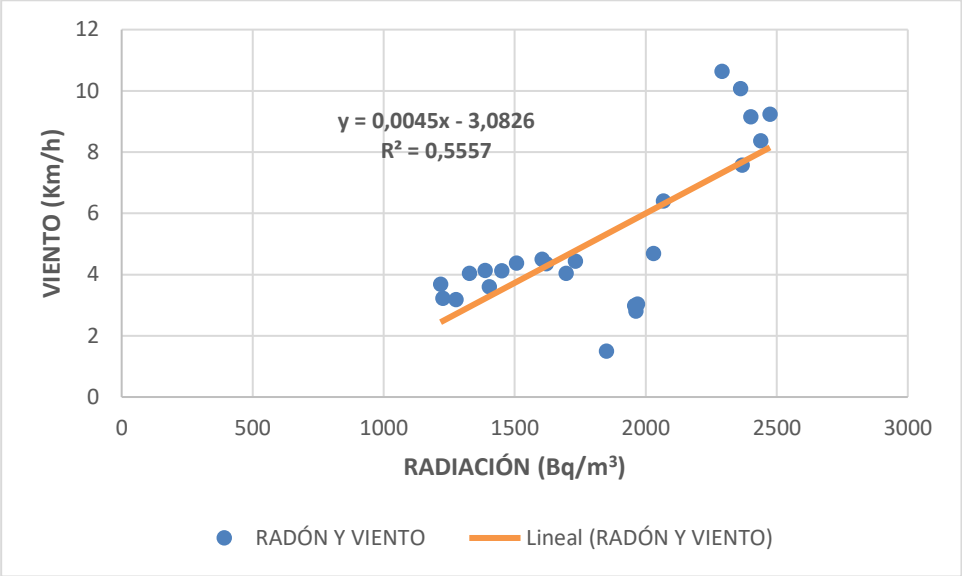


Figura 4-19 Correlación radón-viento 29 enero

Sin embargo, en los días en los que el gas radón adquiere sus valores más altos como se produce entre los días 4 y 7 de enero, la intensidad de viento es mínima. Observando el análisis de correlación de esos días se concluye que la relación entre el viento y el radón es mínima siendo el coeficiente de correlación más alto obtenido de 0,5892 el día 5 de enero, sin embargo, la determinación obtenida en este caso es reducida, con un valor de 0,3472 (Figura 4-20), mientras que en el resto de días la correlación es muy próxima a 0 (Figura 4-21). Por tanto, otros factores como pueden ser la presión o la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior muestran mayor influencia en la variabilidad del radón como se mostrará en las siguientes investigaciones. Este caso se ha obtenido el día 28 de enero, donde se obtiene una correlación entre el radón y el viento de 0,7106 sin embargo, para el mismo día el coeficiente de correlación obtenido con la presión 0,8914.

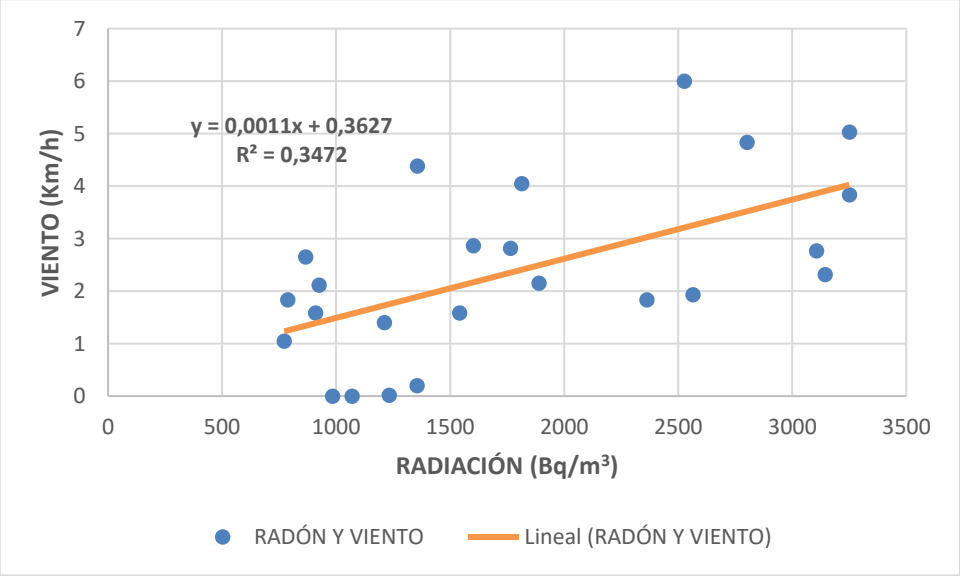


Figura 4-20 Correlación radón-viento 5 enero

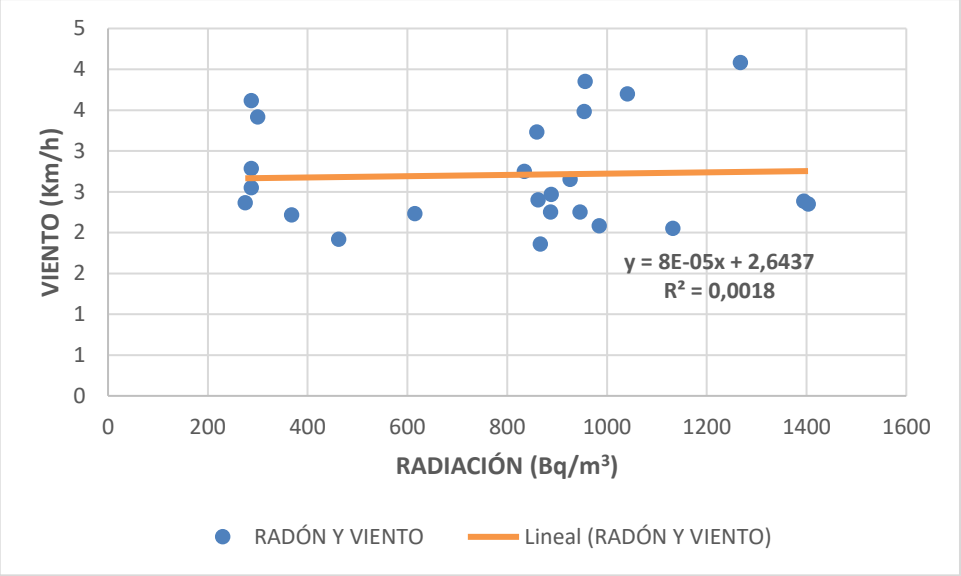


Figura 4-21 Correlación radón-viento 6 enero

Al igual que en lo reseñado en el apartado 2.3.1, se pueden observar dos comportamientos del viento a largo de nuestra toma de datos, sin llegar a una conclusión clara de cómo afecta el viento al radón. Por un lado, se ha observado que con altos valores de viento, se aprecia un aumento en los niveles de radón. Pero también se ha observado el efecto contrario. En días con bajas intensidades de viento, se distinguen incrementos de concentraciones. Por tanto, el viento es un factor que influye en la concentración de radón, pero no de forma tan directa como puede ser la presión o la temperatura.

4.3.2 Presión atmosférica

En las Figura 4-22 y Figura 4-23 se muestra el comportamiento de la presión atmosférica respecto al radón durante el periodo de datos:

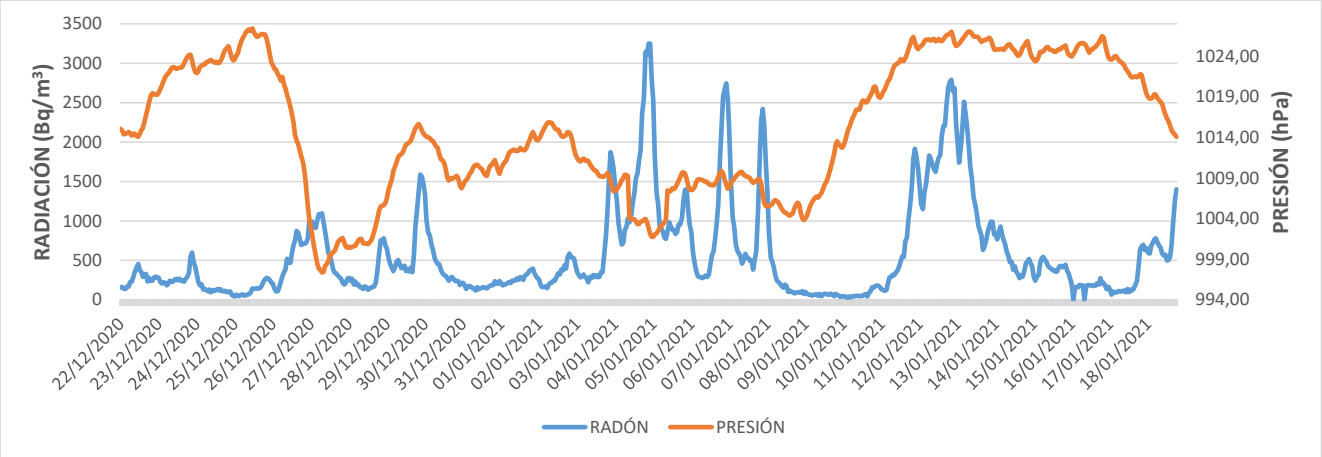


Figura 4-22 Concentración de radón-Presión atmosférica medidor central alto 22/12-18/1 (2,3 m)

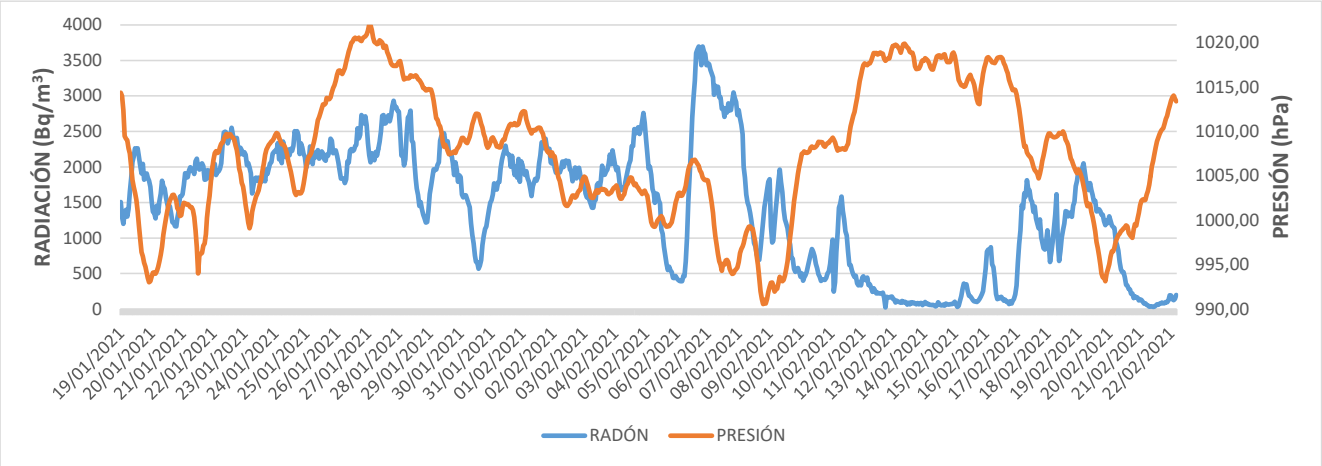


Figura 4-23 Concentración de radón-Presión atmosférica medidor central alto 18/1-22/2 (2,3 m)

De forma general el análisis estadístico muestra de una correlación global de -0,3466 (Figura 4-24).

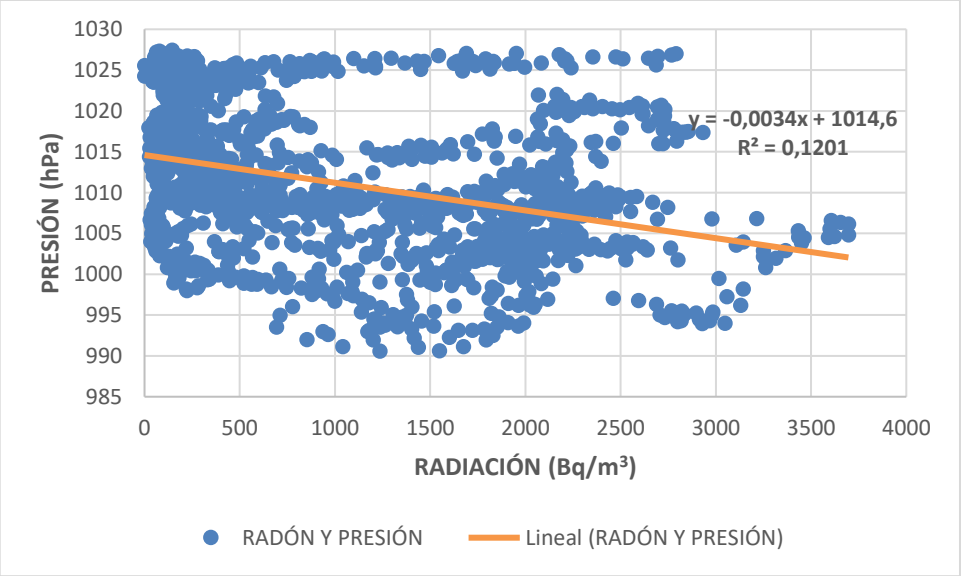


Figura 4-24 Correlación global radón-presión atmosférica

Como se ha ido desarrollando a lo largo del apartado 2.3.2, cuando se producen descensos en la presión atmosférica, se desarrollan incrementos en la concentración de gas radón. Cuando se producen alteraciones de presión, la presión en el interior del edificio se adapta inmediatamente a este cambio. Sin embargo, la presión que existe en el terreno necesita que transcurra un tiempo para asimilar esta variación. Este tiempo depende de la permeabilidad del suelo. Como consecuencia de este proceso, se crea una diferencia de presiones que afecta a los procesos convectivos que incrementan el flujo de radón hacia el interior del despacho. Es decir cuando la presión exterior se reduce, se suelen apreciar incrementos en la concentración de radón.

Este hecho, puede ser observado a continuación entre los días 26 y 28 de diciembre (Figura 4-25) cuando se produce la mayor variación de presión en el menor tiempo de los dos meses de toma de datos:

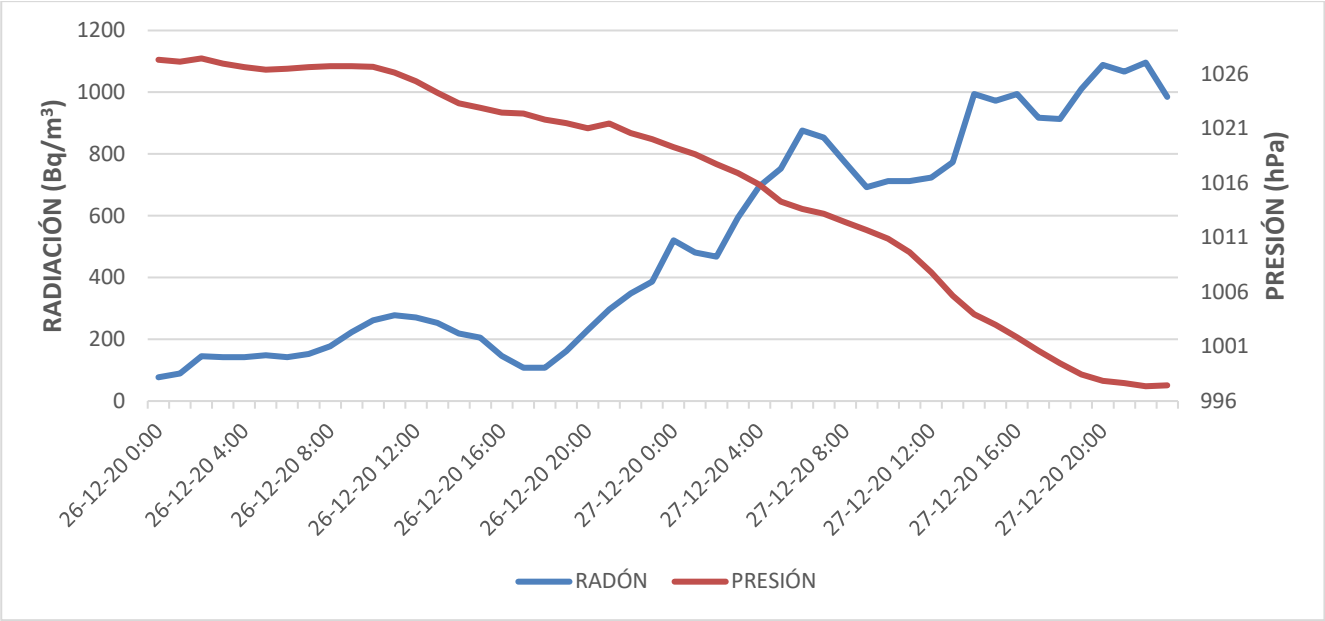


Figura 4-25 Variación de radón con presión 26-28 diciembre medidor central alto (2,3 m)

Como puede observarse en la Figura 4-25, se produce un descenso de presión de 20 hPa entre estos dos días mientras que la concentración de radón aumenta un total de 1000 Bq/m^3. Este descenso de presión parece relacionarse también con el incremento en la intensidad de viento que ocurre en los mismos días como se observó en el anterior apartado.

Como era de esperar, parece producirse un cierto desfase de tiempo entre que sucede el fenómeno atmosférico, en este caso, el descenso de presión, y se produce el incremento de radón. Este desfase, en base a nuestros resultados, puede ser de entre 2 y 3 horas.

Además, el análisis estadístico muestra una correlación entre la presión y el radón en estos días una correlación de -0,9171 y una determinación de 0,8494 para el día 28 (Figura 4-26) y de -0,8883 con una determinación de 0,8474 (Figura 4-27) en el medidor central alto. El signo negativo del coeficiente de correlación indica una relación inversa, es decir, cuando un parámetro aumenta el otro disminuye.

En este período, la presión es el factor meteorológico que más afecta respecto al resto, lo que puede significar que este incremento de concentración se debe principalmente a la presión atmosférica.

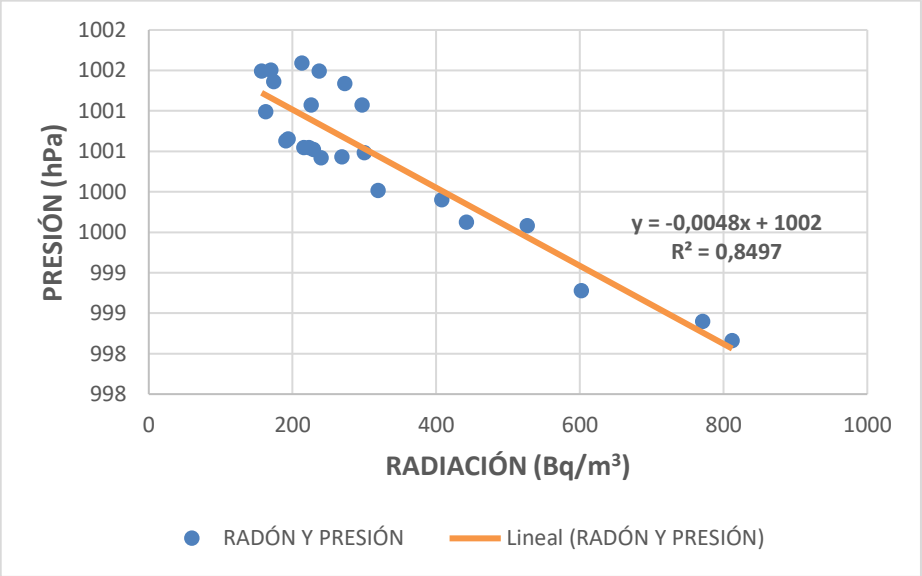


Figura 4-26 Correlación radón-presión 28 diciembre

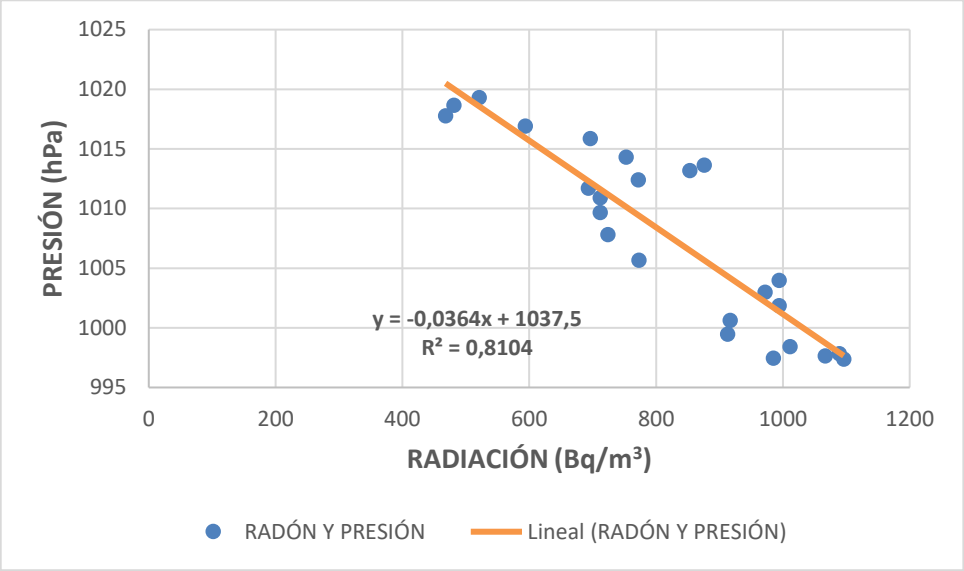


Figura 4-27 Correlación radón-presión 29 diciembre

Por otro lado, se observa que cuando se producen aumentos de presión, disminuye las concentraciones de radón. En la siguiente gráfica se muestra este proceso (Figura 4-28):

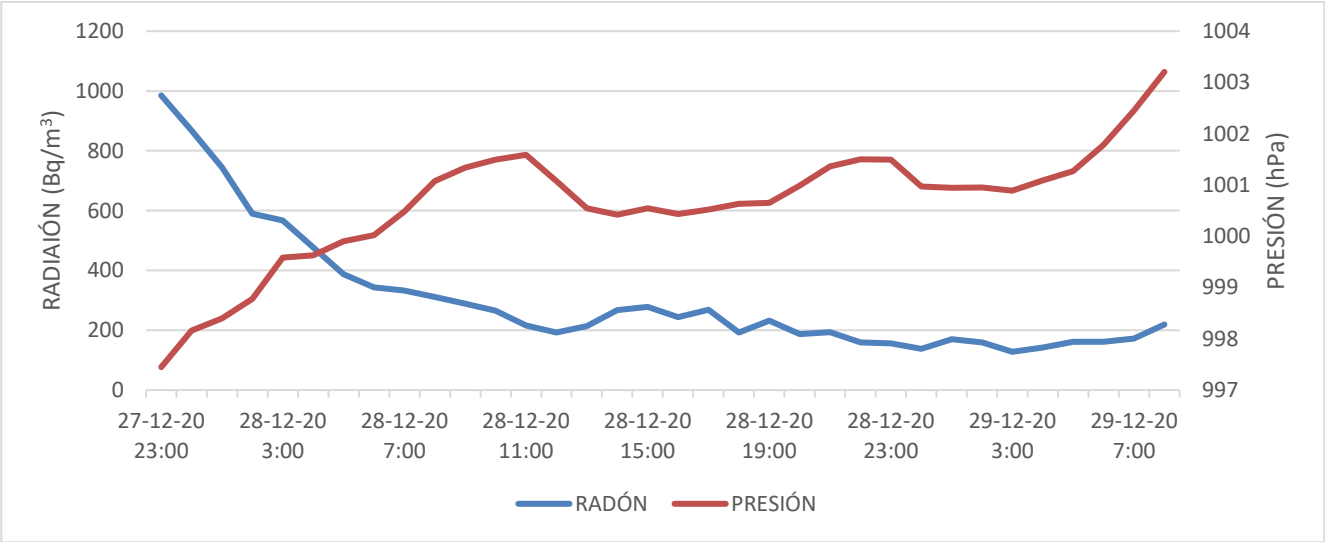


Figura 4-28 Radón-Incremento de presión medidor centro alto (2,3 m) 27-29 dic

Según los resultados obtenidos, este comportamiento se puede observar de forma más clara el día 30 de enero (Figura 4-29). El análisis estadístico muestra una correlación de 0,9319 del radón con la presión y una certeza de 0,9511 (Figura 4-30).

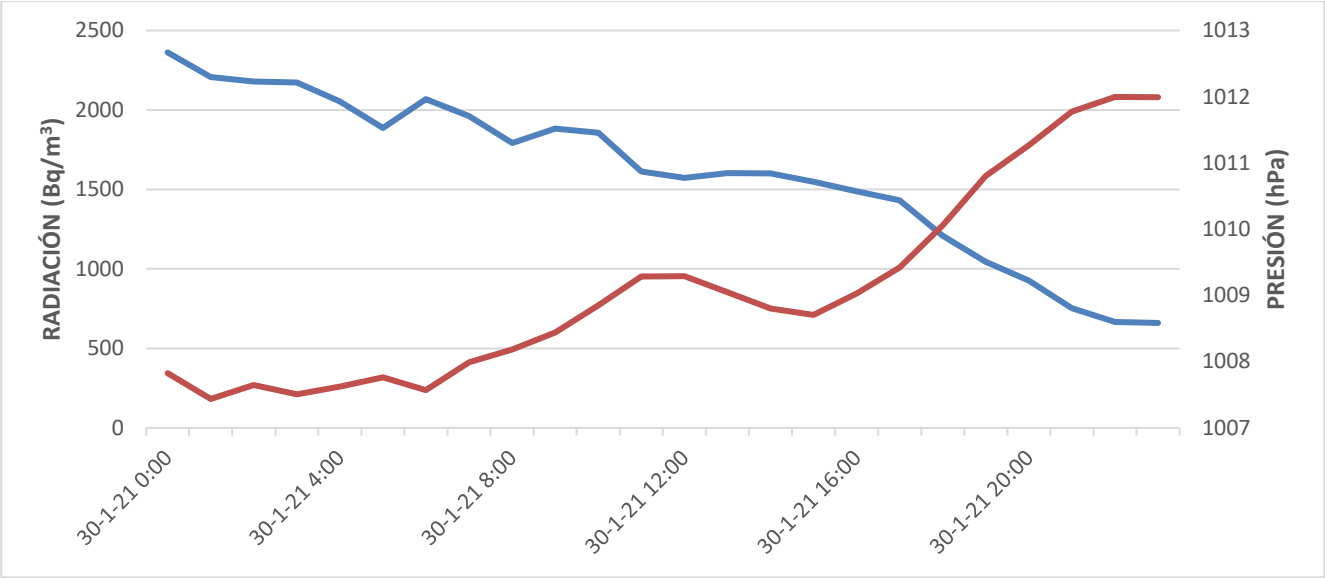


Figura 4-29 Radón-Aumento de presión día 30 de enero medidor centro alto (2,3 m)

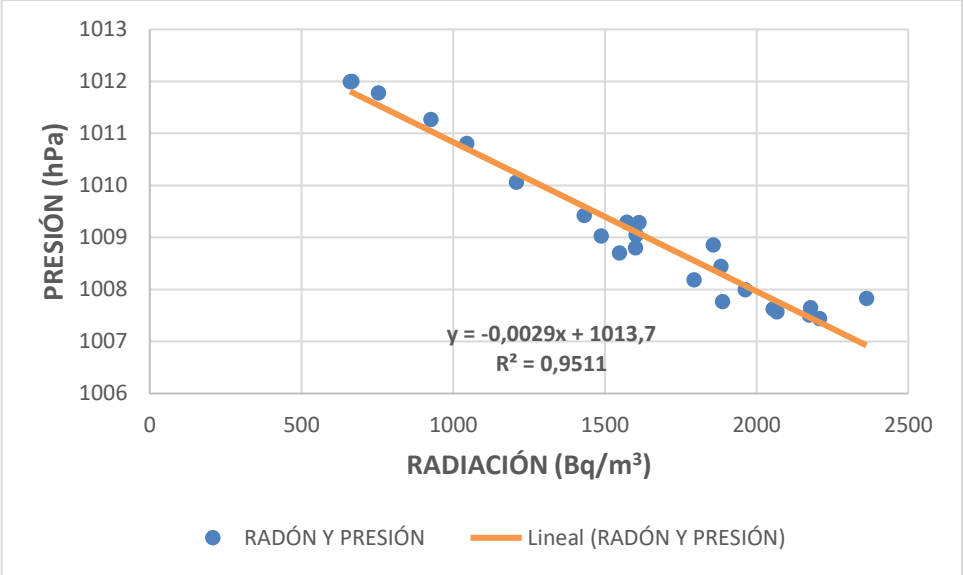


Figura 4-30 Correlación radón-presión 30 de enero

Asimismo, el día 9 de febrero (Figura 4-31) se obtiene el mismo comportamiento y el análisis estadístico indica una correlación de -0,9009 donde el signo negativo explica la relación inversa entre ambos factores como se mencionó anteriormente.

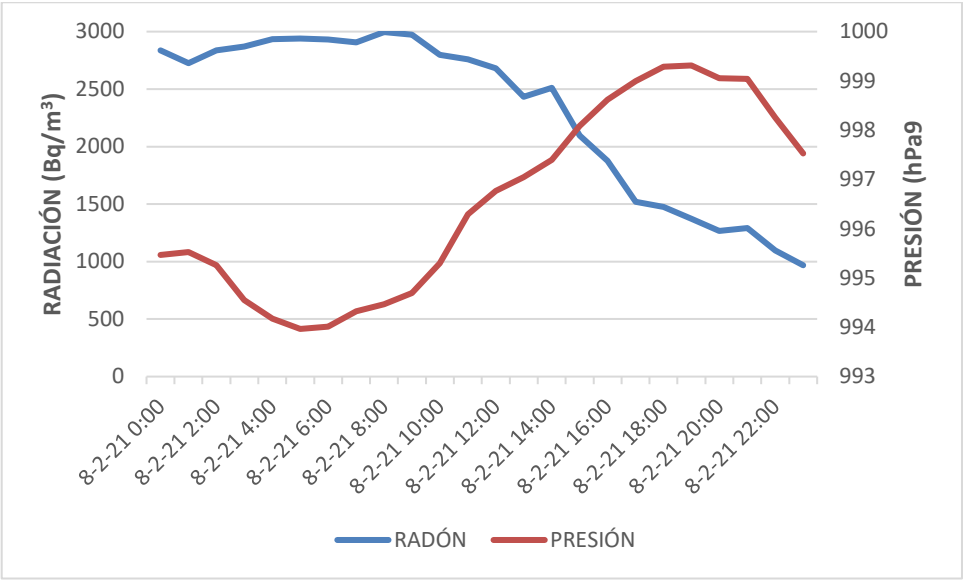


Figura 4-31 Radón-Aumento de presión día 8 de febrero medidor centro alto (2,3 m)

Para que se aprecie la diferencia de ambos comportamientos y la correlación inversa que se produce entre estas dos variables (cuando una incrementa, otra disminuye) se adjunta la siguiente imagen (Figura 4-32):

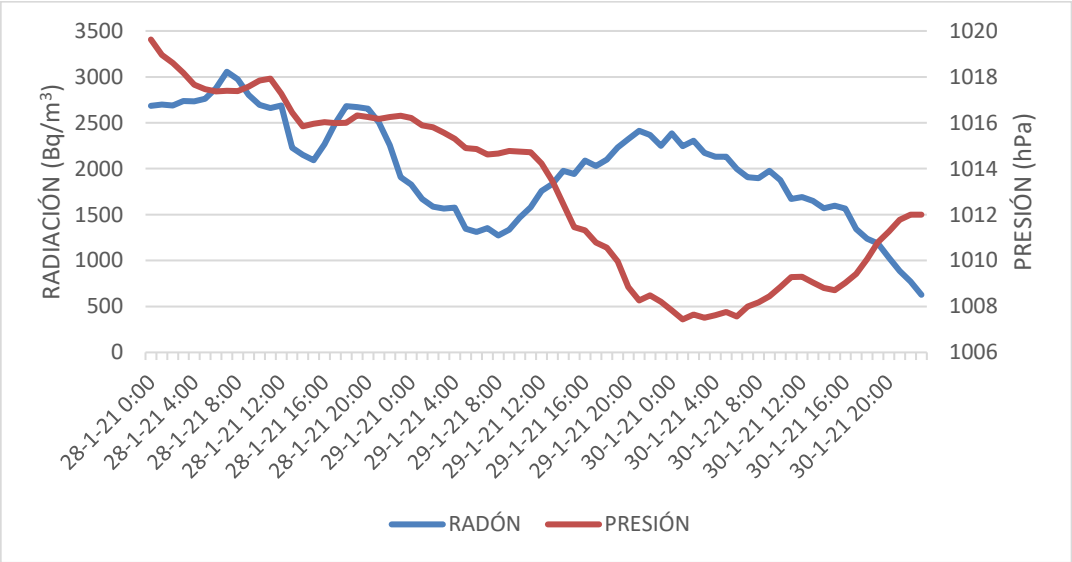


Figura 4-32 Comportamientos de la presión con radón medidor centro alto (2,3 m) 28-30 enero

Cabe resaltar que este fenómeno produce, según nuestros resultados, un aporte de 30 Bq/m^3·h que parece tener concordancia con lo obtenido en la tesis de Don Borja Frutos Vázquez [4], donde se obtenían hasta 60 Bq/m^3·h.

Asimismo, un estudio [40] afirma que el fenómeno denominado como marea barométrica, que son los cambios cíclicos que desarrolla la presión debido al calentamiento de la atmósfera por el ozono, dirige flujos de radón al interior de los edificios.

Este proceso se ha podido observar en cierta medida entre los días 6 y 8 de enero. A lo largo de este período, la presión ha descrito oscilaciones en las que sí parece observarse que estos cambios expliquen en cierta medida el incremento de radón. Como puede observase en la Figura 4-33, en el día 6 de enero, la tendencia tanto del radón como de la presión es muy similar. Asimismo, a lo largo de estos dos días, los ascensos y descensos de presión se relacionan también con los incrementos y decrementos de presión.

Además, se observa también un cierto retardo entre que sucede el fenómeno atmosférico y la variación de radón como ya se mencionó anteriormente. Esto se puede deber a la capacidad del terreno para adaptarse al cambio, que como ya se mencionó, se relaciona con la permeabilidad del mismo.

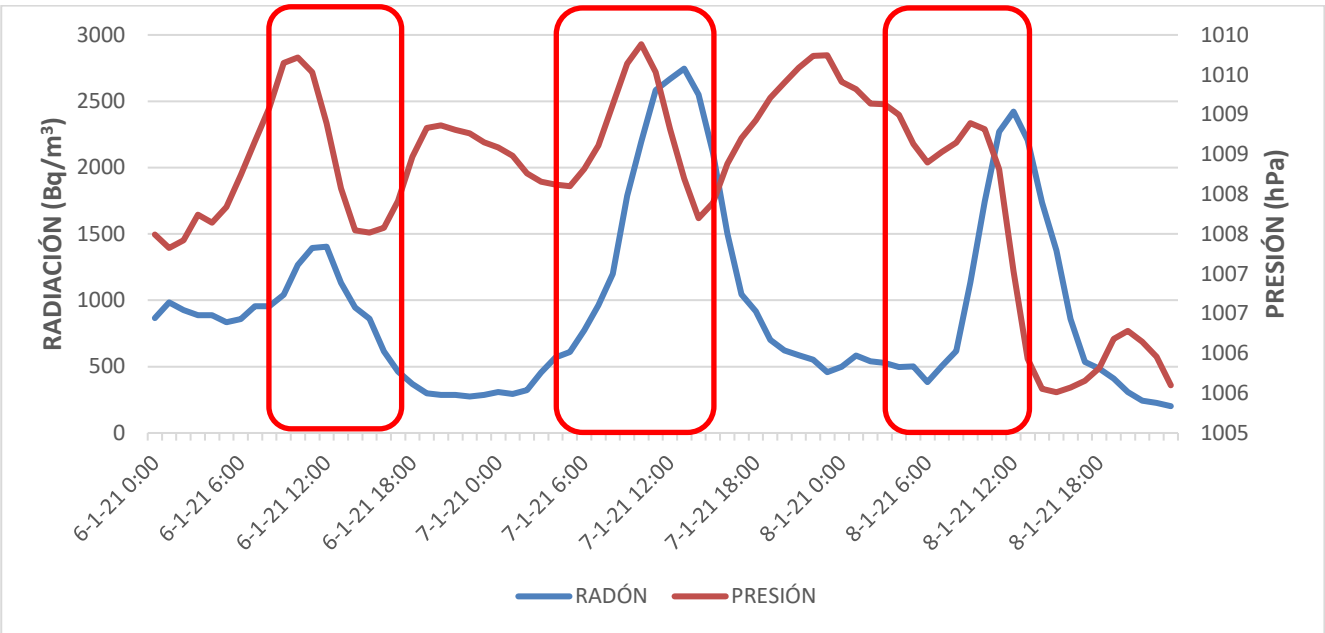


Figura 4-33 Incremento de radón con la presión 6-8 enero medidor centro alto (2,3 m)

En conclusión, la presión atmosférica es uno de los principales agentes atmosféricos que influyen en los niveles de radón. En nuestra zona de estudio, este factor es el que mayor relación ha obtenido con el radón ya que los comportamientos que describe la presión parecen afectar en gran medida a las concentraciones de radón. Estos resultados se relacionan con lo expuesto por el CSN [6], donde explica que la presión puede ser hasta 100 veces más influyente que el viento.

4.3.3 Temperatura

En este apartado se va a analizar la dependencia de la temperatura con el radón. Para ello, en este factor se van a contemplar las tres maneras en las que la temperatura puede influir sobre el radón. Por un lado, se va a analizar la relación del radón con la temperatura interior. Más tarde, se realizará el mismo proceso con la temperatura exterior. Por último, se examinará la diferencia de temperaturas entre estos dos lugares con el gas radón.

- **Temperatura interior**

Para analizar la influencia de este factor se han empleado los sensores de temperatura instalados en el interior del despacho 112 que se han situado de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 3-2.

Hay que resaltar que los datos obtenidos de la temperatura interior del medidor de la ventana no mostraban valores muy fiables en el periodo comprendido entre el 22 de diciembre y el 4 de enero (en el Anexo 1 figuran estos datos para observar su irregularidad). Por ello, estos datos no se han tenido en cuenta en este apartado de resultados.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el medidor central alto (Figura 4-34):

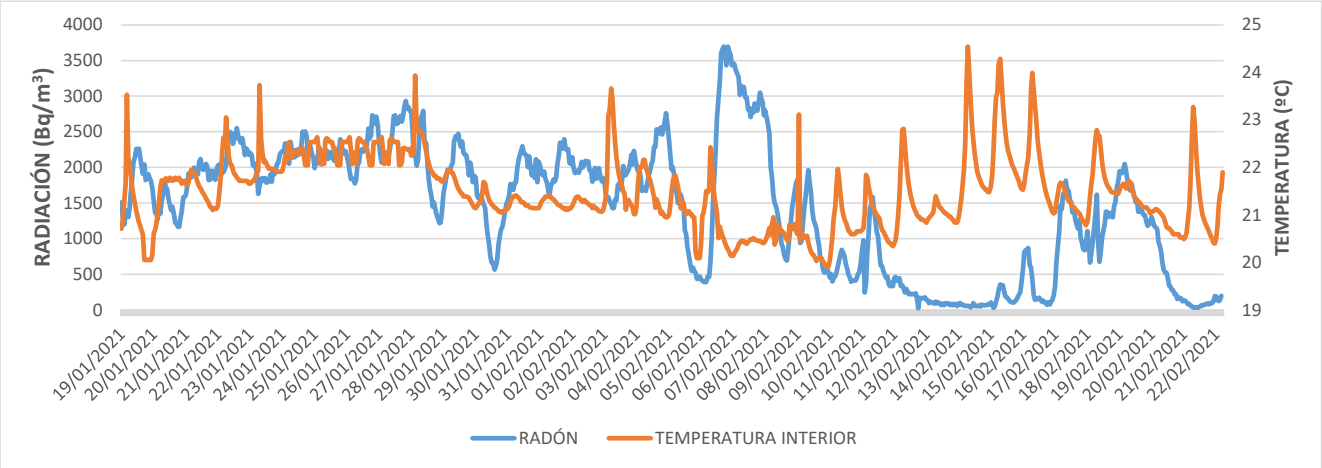


Figura 4-34 Radón-Temperatura interior medidor central alto (2,3 m) 19/1-22/2

El análisis estadístico muestra una correlación global de 0,0046 (Figura 4-35).

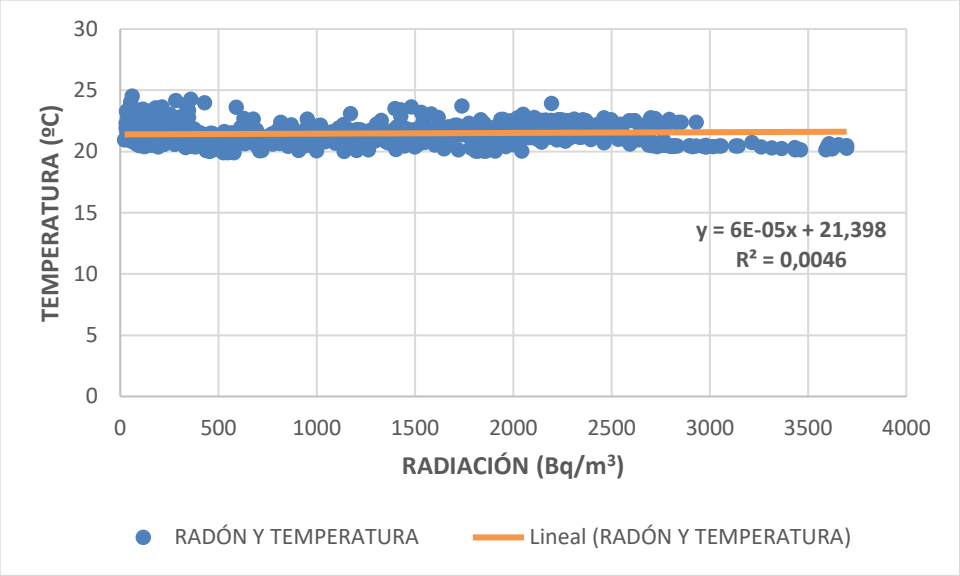


Figura 4-35 Correlación radón-temperatura interior 19/1-22/2

Por otro lado, entre los días 1 y 4 de febrero, se muestra cierta correlación con este factor. A continuación, se adjunta en la Figura 4-36 los resultados obtenidos:

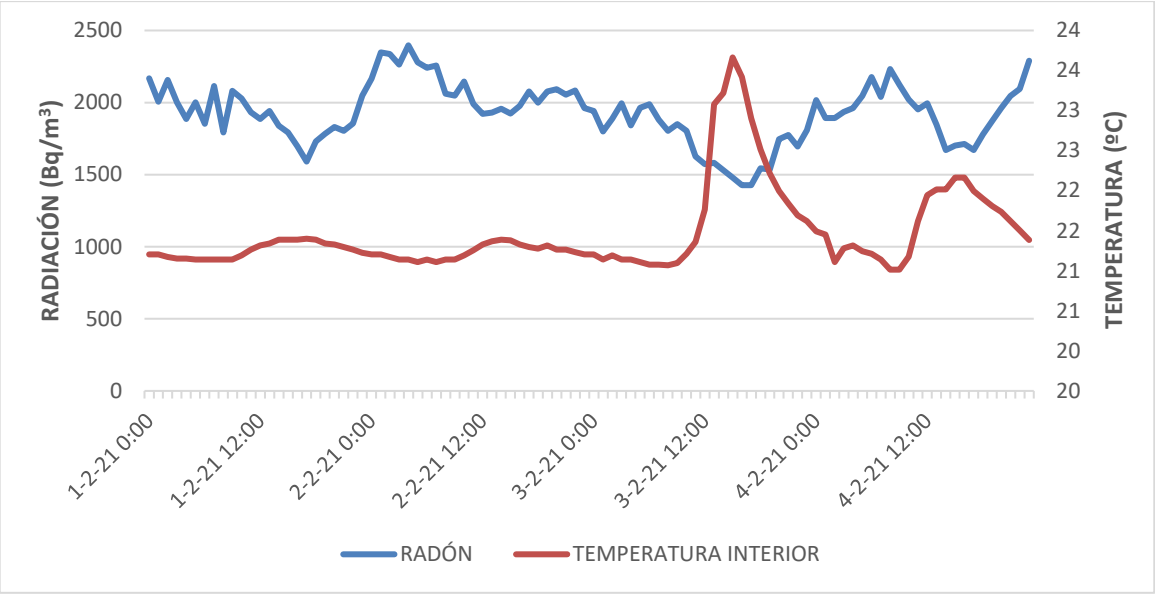


Figura 4-36 Desarrollo de temperatura interior con radón medidor central alto (2,3 m) 1 a 4 febrero

El análisis estadístico muestra una correlación media con el radón de 0,5915 durante este periodo, siendo el valor obtenido más alto de -0,8676 el día 3 de febrero, es decir un aumento de temperatura interior podría estar relacionado con un descenso en la concentración de radón.

A pesar de la correlación obtenida durante estos días, hay que indicar que el día 3 de febrero se abrió el despacho para obtener datos de los distintos sensores. Este hecho podría reflejarse en el incremento de temperatura que se desarrolla en el día 3 de febrero. Sin embargo, durante este periodo no se muestran cambios significativos en la temperatura por lo que no es posible establecer más relaciones con las variaciones de radón.

Entre los días 6 y 8 de febrero (Figura 4-37 y Figura 4-38) parece confirmarse la relación inversa, es decir una bajada de temperatura asociada a un aumento de radón. El descenso de temperatura interior que se produjo podría asociarse a un incremento de la concentración de radón. Esta relación puede deberse realmente a la diferencia de temperatura que se produce entre el exterior y el interior, lo que genera una diferencia de presiones producida por el efecto stack, fenómeno que se estudiará en el apartado de diferencia de temperaturas.

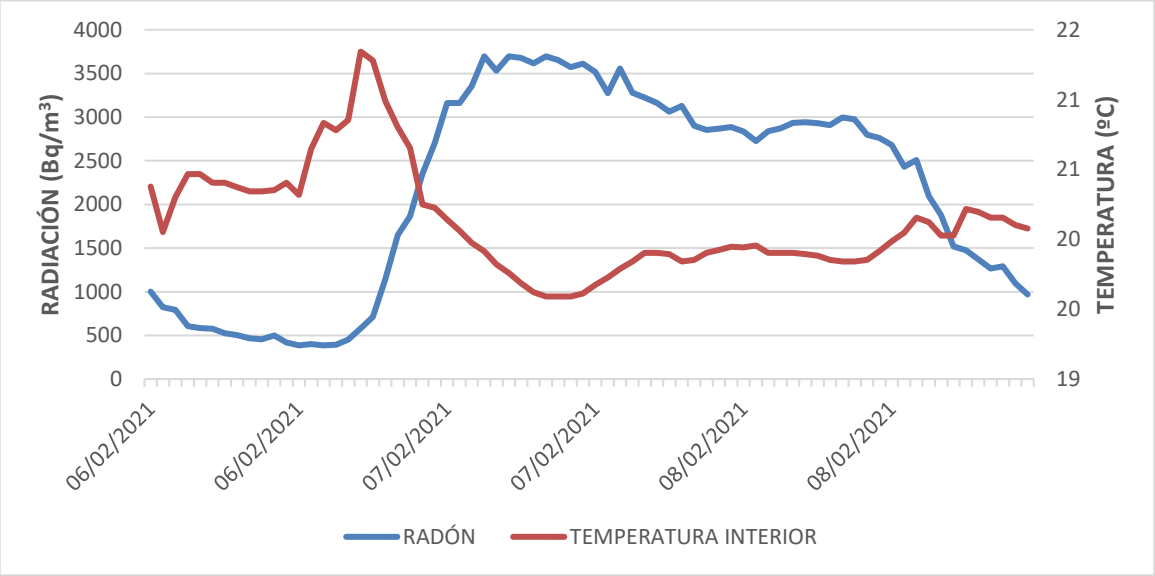


Figura 4-37 Relación de temperatura interior con radón 6 a 8 febrero

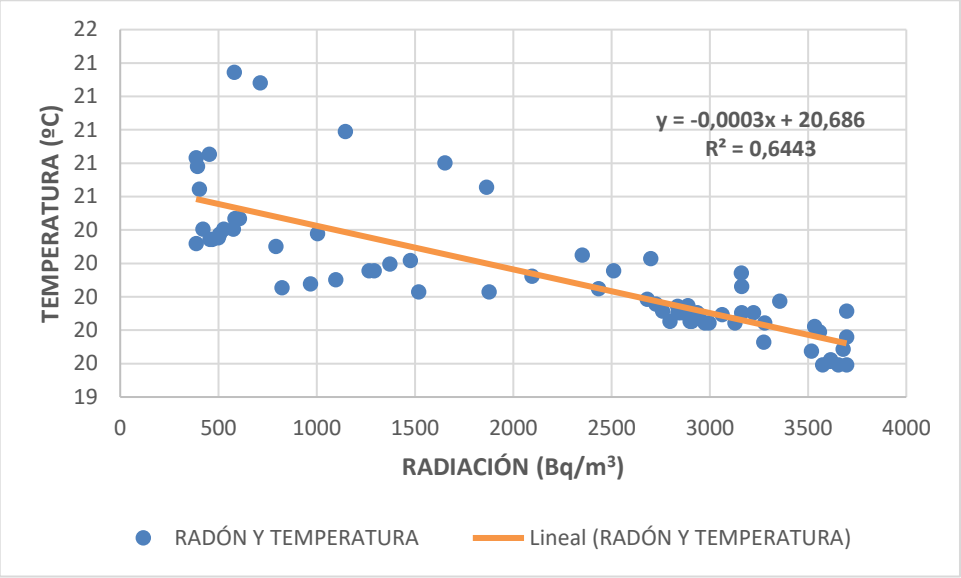


Figura 4-38 Determinación radón-temperatura interior 6-8 febrero

En conclusión, a lo largo del periodo de muestreo no se ha podido observar una relación inversamente proporcional radón y la temperatura interior. Se sugiere que los días en que se ha obtenido una alta correlación entre este factor y el radón puede deberse a la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior como sugieren algunos estudios [4] [6]. Este último factor, que puede ser la causa de esta relación, será analizado más adelante.

- **Temperatura exterior**

Una vez analizada la dependencia con la temperatura interior, pasaremos a la analizar la influencia de la temperatura exterior.

En las siguientes gráficas podemos observar los valores obtenidos en el medidor de referencia (Figura 4-39 y Figura 4-40):

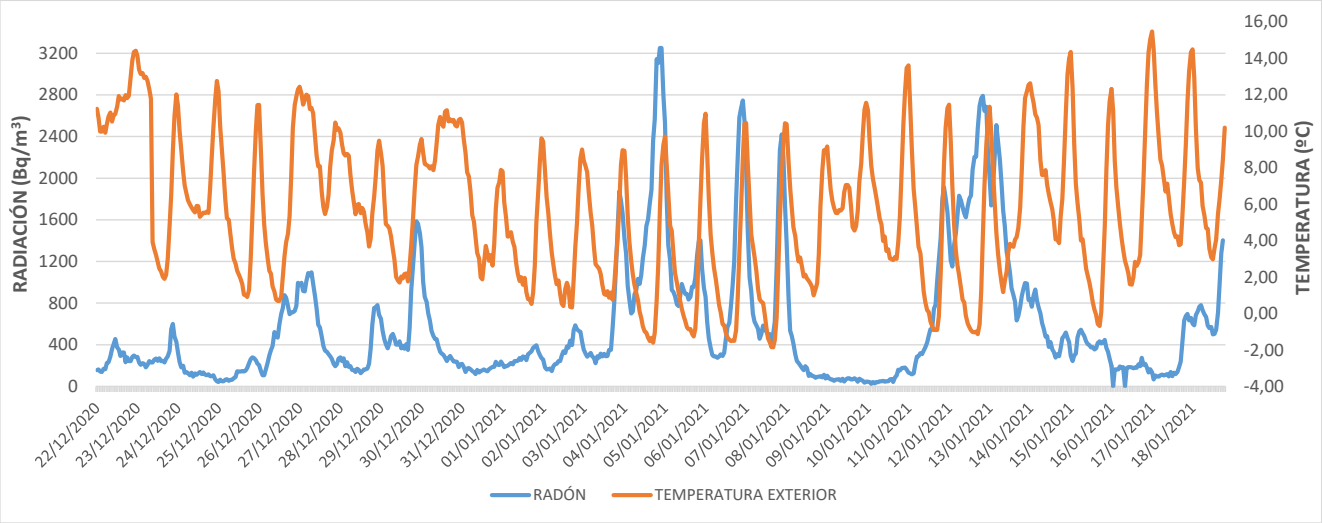


Figura 4-39 Radón-Temperatura exterior medidor central alto (2,3 m) 22/12-18/1

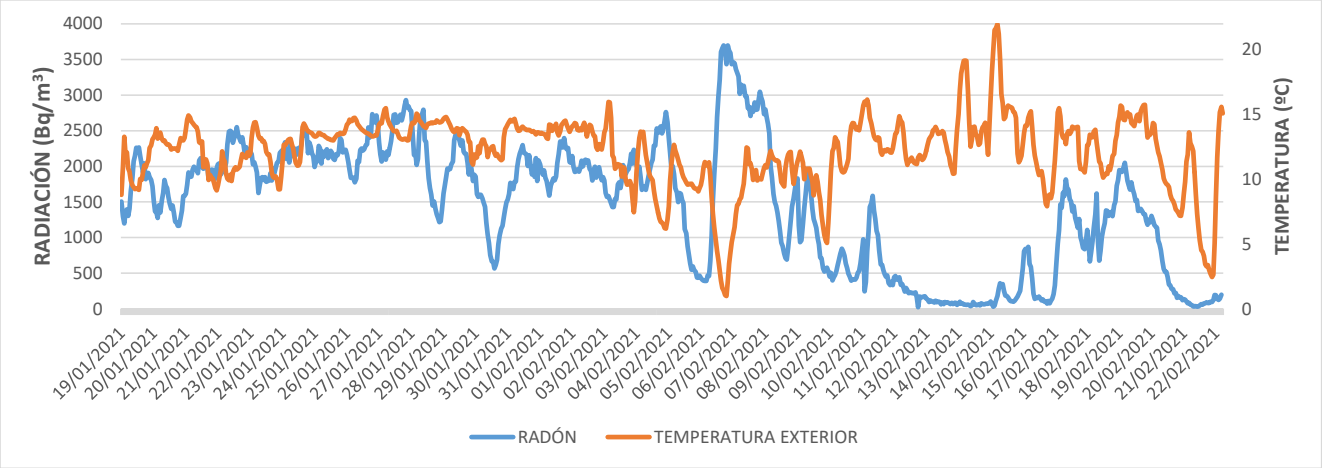


Figura 4-40 Radón-Temperatura exterior medidor central alto (2,3 m) 18/1-22/2

El análisis estadístico muestra para los dos meses una correlación de 0,2808 (Figura 4-41).

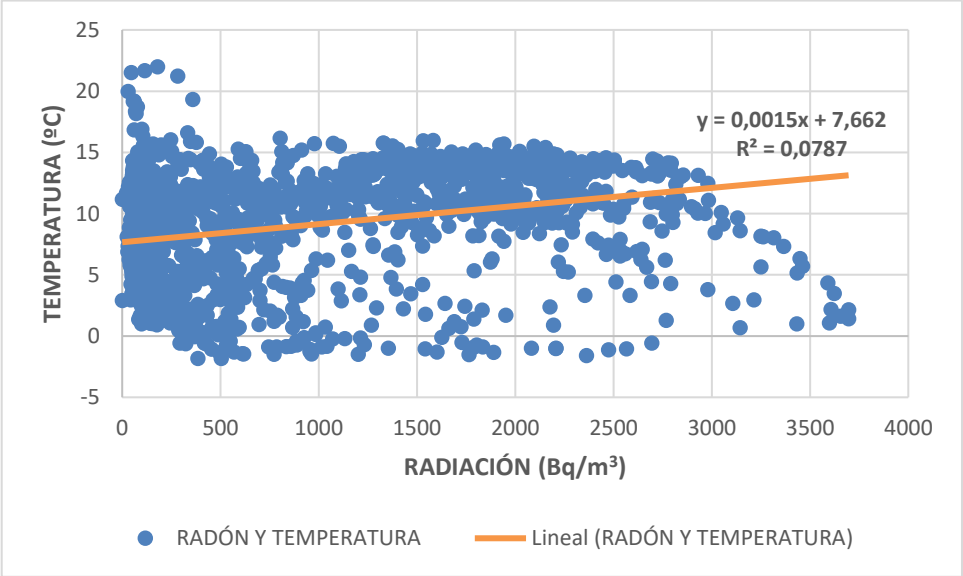


Figura 4-41 Correlación radón-temperatura exterior 22/12-9/2

A la vista de las Figura 4-39 y Figura 4-40, parece obtenerse una pequeña correlación clara entre la temperatura exterior y el gas radón. Entre los días 4 al 9 de enero (Figura 4-42 y Figura 4-43), los picos de radón coinciden con la temperatura para ese tiempo. Hay que añadir que la influencia de las temperaturas en los períodos de invierno son menores respecto a los meses de verano [41]. La toma de datos de este estudio se ha realizado durante la época invernal, por lo que la correlación obtenida puede ser menor.

Del periodo mencionado anteriormente, la correlación media para este periodo es de 0,2556. Cabe destacar, que la mayor relación obtenida entre ambos factores se produjo el día 4 de enero, con un coeficiente de correlación de 0,7973 con una bondad de ajuste de 0,6467.

A pesar de este resultado, los cambios que se producen en la temperatura están ligados a variaciones en la presión atmosférica por lo que este hecho también parece estar provocado en parte por la presión. De hecho, para el mismo día el valor de correlación obtenido para la presión es de 0,5055 (Figura 4-43). Por tanto, aunque sí parece que la temperatura exterior haya influido en este proceso, este cambio puede deberse originalmente también a la presión.

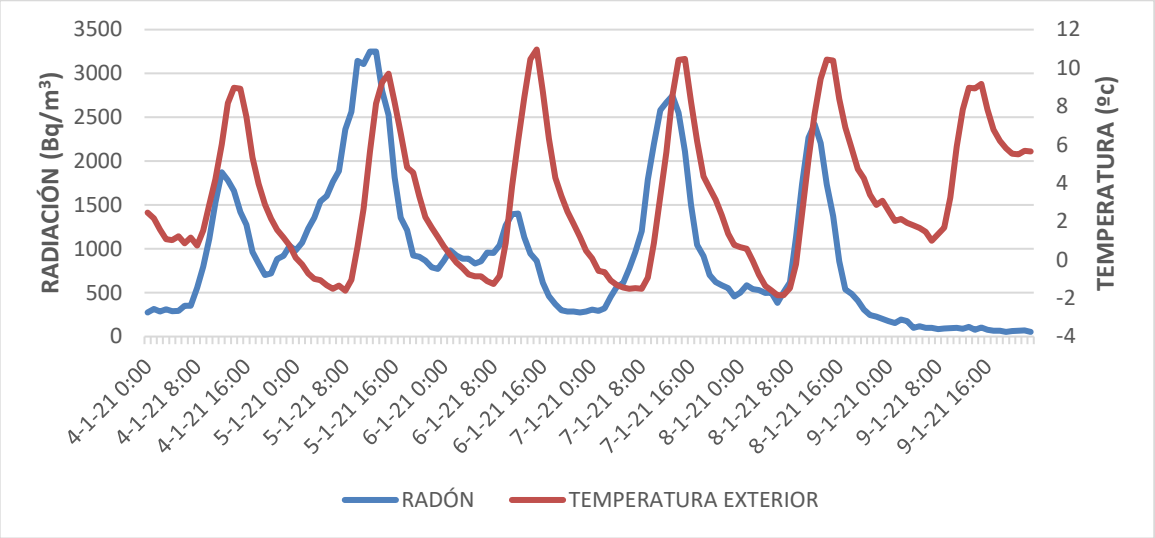


Figura 4-42 Radón-temperatura exterior 4-9 enero medidor central alto (2,3 m)

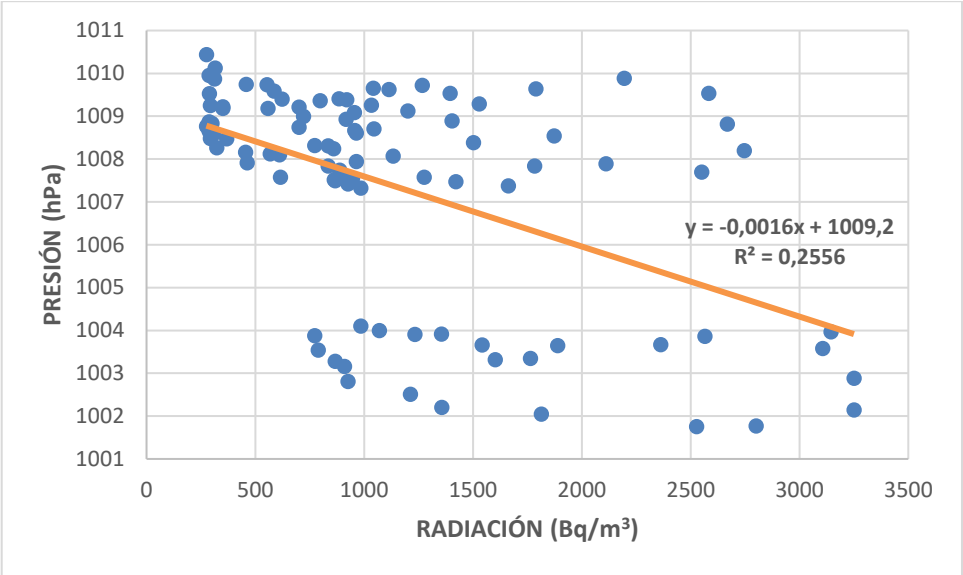


Figura 4-43 Correlación radón-presión atmosférica 4 enero

Durante la misma fase, se han obtenido correlaciones entre la temperatura exterior y el radón, los días 26 de diciembre (0,7157), 29 de diciembre (0,5264) y 30 de diciembre (0,6546). Sin embargo, como ya se observó anteriormente, la presión atmosférica produce un brusco cambio durante estos días. Este proceso conlleva cambios en la temperatura exterior por lo que puede señalar que la relación obtenida estos días se debe realmente a la presión y no a la temperatura. Estos cambios que se producen en la concentración de radón y temperatura para un mismo periodo de tiempo también se exponen en una de las tesis [4] analizadas en este trabajo.

De la misma forma, entre los días 26 y 31 de enero también el análisis estadístico muestra correlación con este factor siendo la relación mínima de 0,6067.

Por último, entre los días 6 y 7 de febrero constatamos las relaciones más altas. Los valores obtenidos son de -0,9515 y 0,8950 respectivamente. Por tanto, se obtiene una relación inversamente proporcional entre ambos factores. En la Figura 4-44 se muestran los resultados obtenidos.

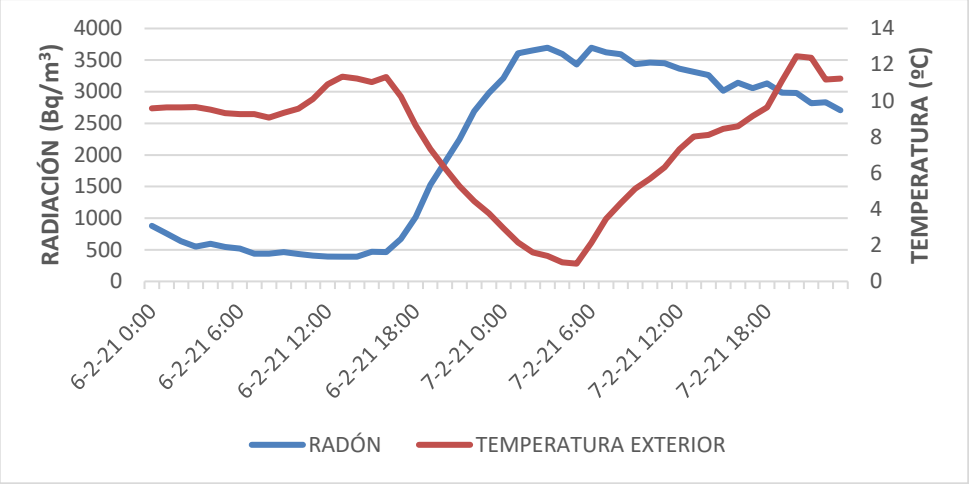


Figura 4-44 Radón-temperatura exterior 6-7 febrero medidor central alto (2,3 m)

Como se observa, cuando se produce el descenso en la temperatura exterior parece hallarse un incremento en la concentración. Sin embargo, estos días también se han encontrado relaciones con la presión atmosférica por lo que este hecho aislado puede ser por la confluencia de ambos factores. Para este día, el aporte de radón obtenido durante este incremento se aproxima a 275 Bq/m^3·h. Si se realiza la comparación con los aportes obtenidos en la presión atmosférica, en este caso, la aportación que se produce es mucho mayor. Sin embargo, este aporte puede deberse a una combinación de varios factores donde la temperatura puede haber influido en gran medida dada la correlación obtenida.

En conclusión, la temperatura exterior en los meses de invierno es un factor que muestra poca relevancia en la concentración de radón. Estos resultados concuerdan con un estudio [41] que afirma el mismo hecho en la misma estación. A pesar de ello, a nivel global no se obtiene una correlación clara. A nivel diario sí se han obtenido relaciones, pero estas pueden ser debidas a la diferencia de temperaturas que se producen entre el exterior y el interior del edificio.

- **Diferencia de temperatura**

Por último, se va a analizar la relación que produce la diferencia de temperaturas que se produce entre el exterior y el interior del despacho 114. Varios estudios [4] [6] han señalado que este aspecto de la temperatura es el que produce mayor influencia sobre la concentración de radón.

A continuación, en las Figura 4-45 y Figura 4-46 se pueden observar los resultados obtenidos durante el periodo de muestreo:

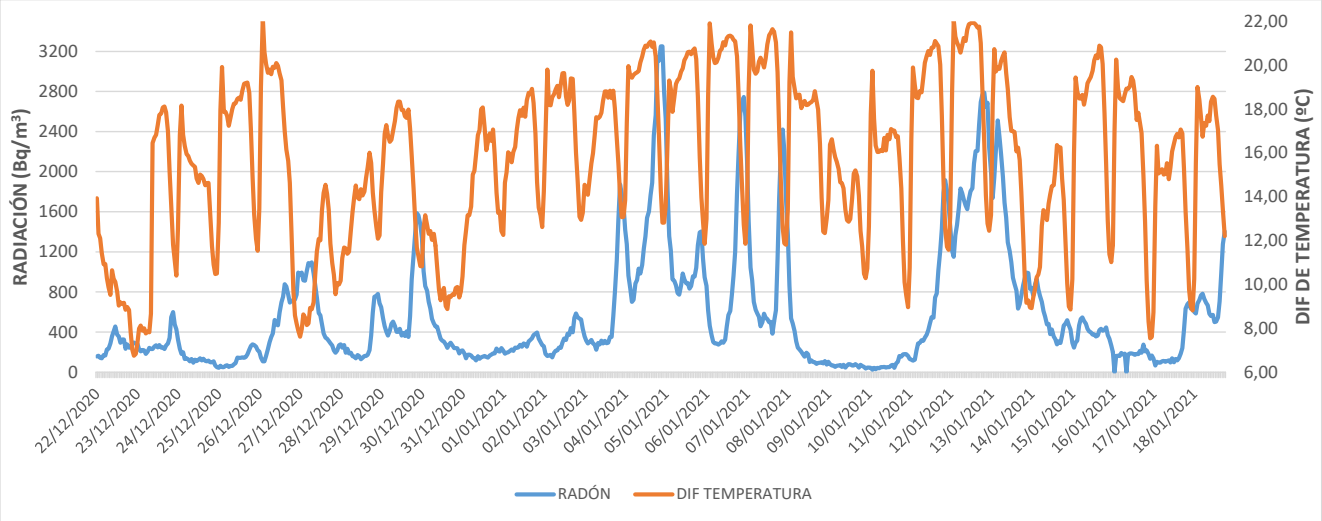


Figura 4-45 Radón-Diferencia de temperatura medidor central alto (2,3 m)

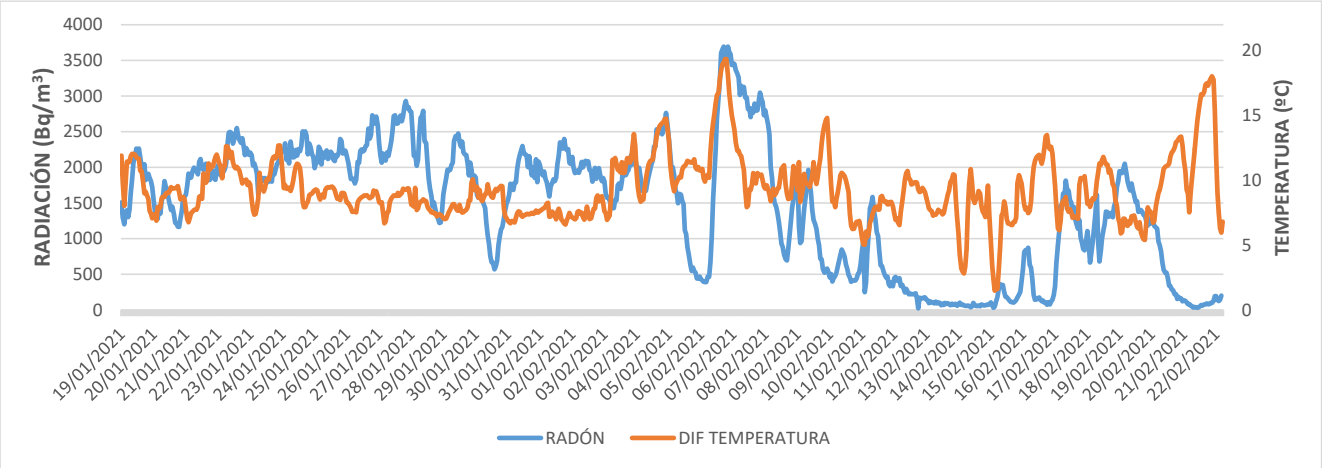


Figura 4-46 Radón-Diferencia de temperatura medidor central alto (2,3 m)

De forma global, el radón y la diferencia de temperaturas muestran una correlación entre el 22 de diciembre y el 22 de febrero de -0,2085 (Figura 4-47).

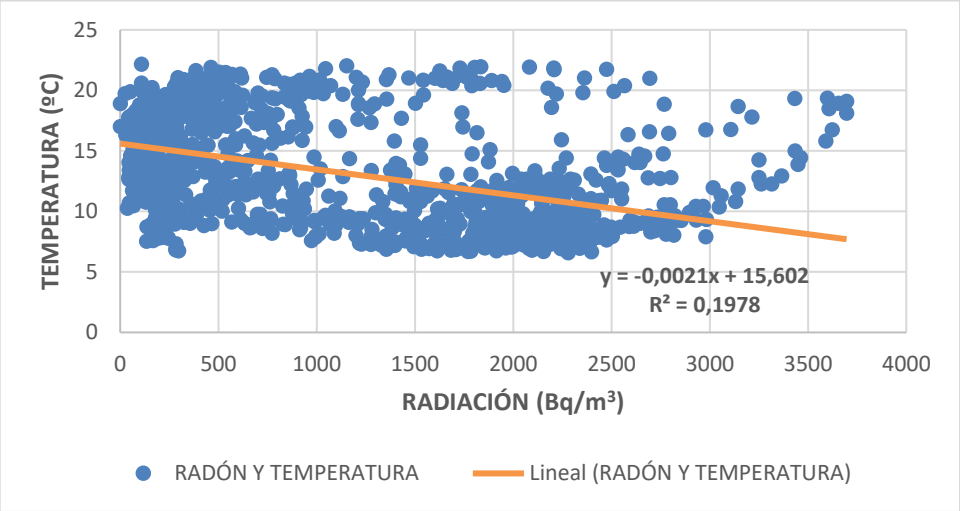


Figura 4-47 Correlación radón-diferencia temperatura 22/12-9/2

El análisis estadístico de correlación muestra una relación entre este factor y el radón especialmente el día 27 de diciembre (Figura 4-48) y el día 4 de enero (Figura 4-49). En la siguiente tabla (Tabla 4-4) se indican los datos de temperaturas obtenidos para ambos días y sus coeficientes de correlaciones:

Día	Temperatura media interior (ºC)	Temperatura exterior (ºC)	Diferencia de temperaturas (ºC)	Coeficiente de correlación
27 diciembre	20,21	2,11	18,1	0,7567
4 enero	20,97	3,26	17,7	0,7973

Tabla 4-4 Datos de temperaturas 27/12 y 4/1

Las correlaciones obtenidas para estos días son las siguientes:

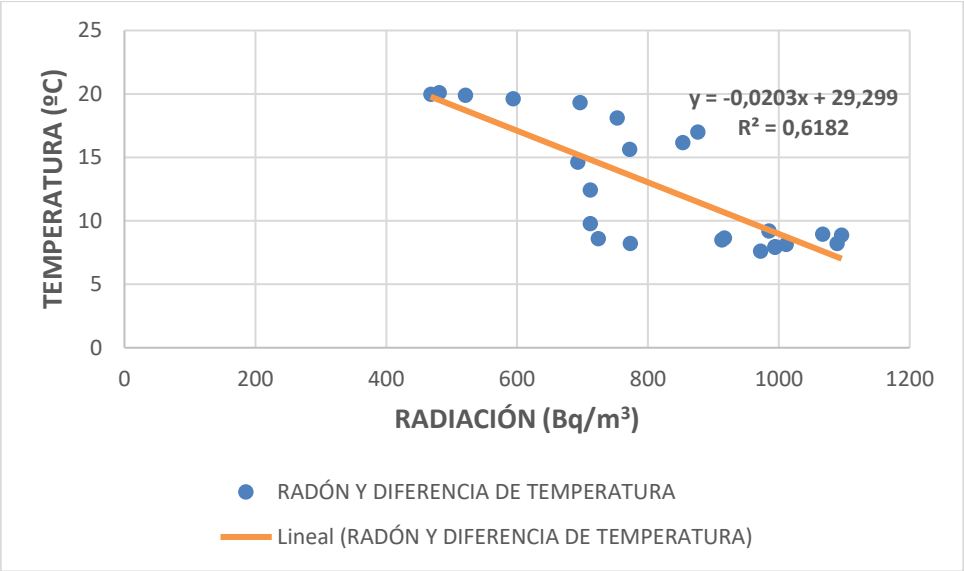


Figura 4-48 Correlación radón-diferencia de temperatura 27 diciembre

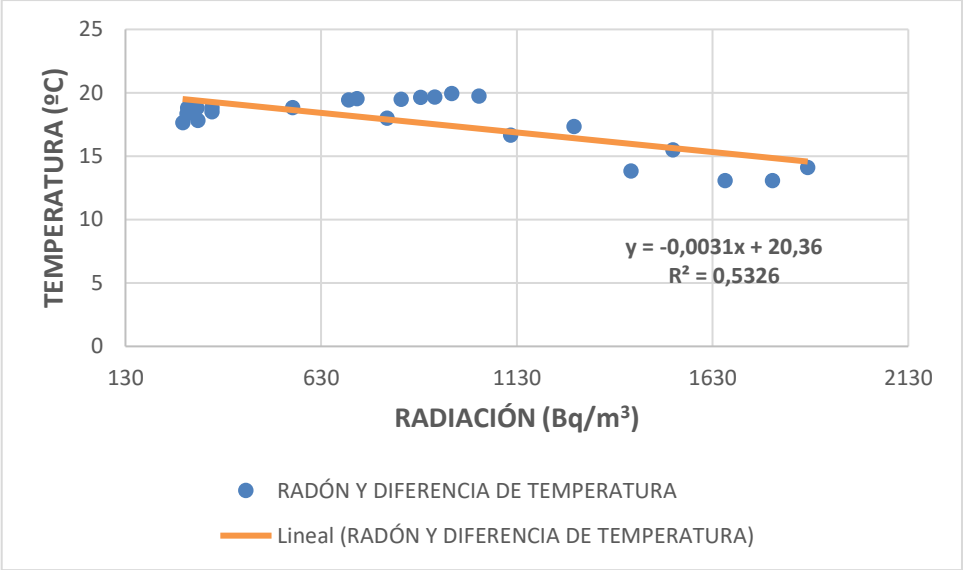


Figura 4-49 Correlación radón-diferencia de temperatura 4 enero

De la misma forma, analizaremos los días 6 de febrero (Figura 4-50) y 7 de febrero (Figura 4-51). Los datos de las temperaturas para estos días aparecen reflejados en la Tabla 4-5.

Día	Temperatura media interior (ºC)	Temperatura exterior (ºC)	Diferencia de temperaturas (ºC)	Coeficiente de correlación
6 febrero	21,05	8,9	12,15	-0,9515
7 febrero	20,38	6,45	13,93	-0,8950

Tabla 4-5 Datos de temperaturas 6/2 y 7/2

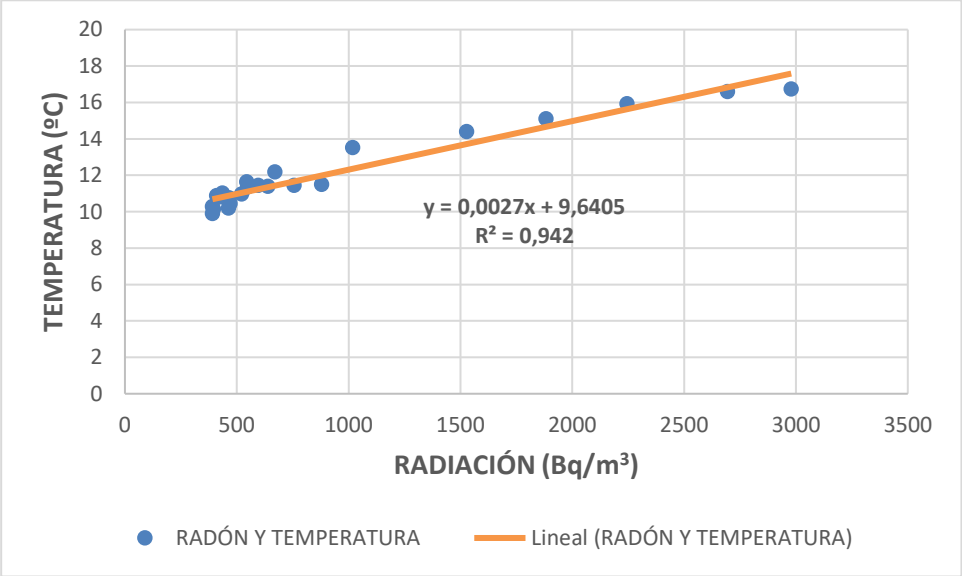


Figura 4-50 Correlación radón-diferencia de temperatura 6 febrero

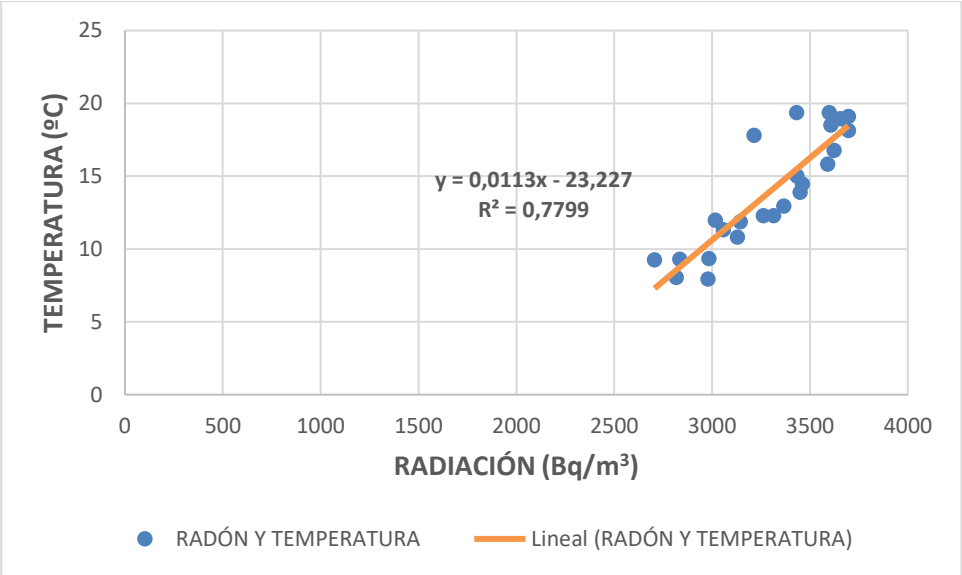


Figura 4-51 Correlación radón-diferencia de temperatura 7 febrero

Con el análisis estadístico, parece observarse que a medida que la diferencia de temperaturas es más grande se obtiene una mayor relación con este factor aunque no es el caso que se produce los días 6 y 7 de febrero donde sucede lo contrario. La diferencia de temperaturas es posible que genere un gradiente de presiones debido al efecto stack y este proceso puede ser el causante de las variaciones en la concentración de radón. Este efecto desarrolla un gradiente de presiones debido a que el aire caliente del interior, se expande e intenta evacuarse a través de orificios naturales del despacho como grietas o ventanas. Como consecuencia de ello, se desarrolla una pequeña depresión que hace succionar aire del terreno que contiene radón y de esta manera aumenta la concentración en el interior. Por tanto, cuanta más grande sea la diferencia de temperaturas, mayor aporte de radón se puede producir.

Sin embargo, estas diferencias de presión que se crean son muy pequeñas comparadas con las que se desarrollan con la presión atmosférica como ya se observó anteriormente.

En conclusión, la diferencia de temperaturas parece tener la mayor influencia de todas en cuanto a temperatura se refiere. Este hecho se debe a que de los tres factores analizados de la temperatura, la diferencia de temperaturas es el que mayores coeficientes de correlación ha obtenido. El desarrollo de

una diferencia de presiones debido al efecto stack parece ser el causante de un aporte de radón al interior del edificio. Sin embargo, en términos absolutos, el factor temperatura no parece tener una gran influencia en las variaciones del nivel de gas radón. Sí se observa que este factor favorezca la inmisión de radón, pero comparado con la presión se puede llegar a considerar insignificante siendo según el CSN [6] hasta 1000 veces menos influyente que la presión atmosférica.

4.3.4 Precipitaciones

En las Figura 4-52 y Figura 4-53 se puede observar los resultados obtenidos de las precipitaciones a lo largo de la fase de muestreo:

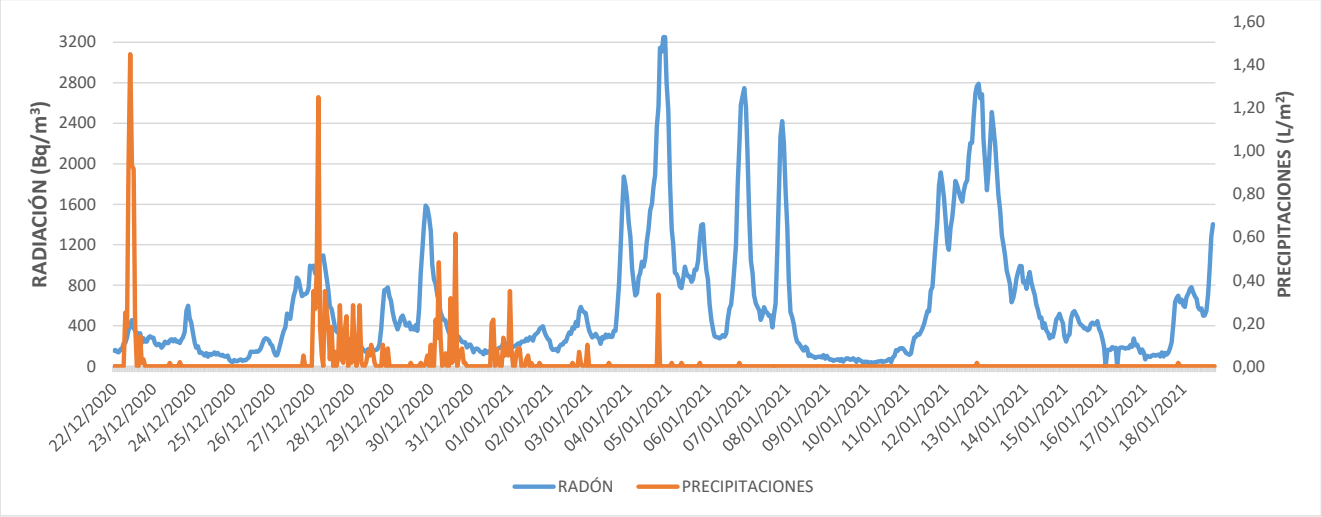


Figura 4-52 Radón-Precipitaciones medidor central alto (2,3 m) 22/12-18/01

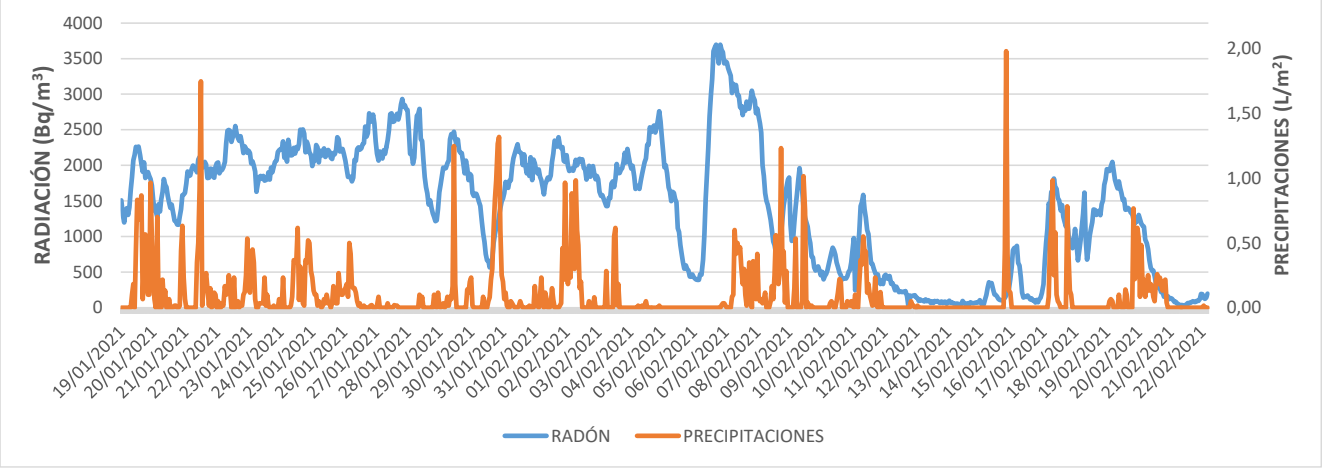


Figura 4-53 Radón-Precipitaciones medidor central alto (2,3 m) 19/01-22/02

A la vista de la gráfica Figura 4-52, se puede observar que las precipitaciones no han sido abundantes durante el primer mes de medida. Únicamente se han desarrollado casos aislados en ciertos días y durante un corto período de tiempo. Sin embargo, en la Figura 4-53 se observa que durante ese periodo las lluvias fueron abundantes.

El análisis de correlación muestra una relación para ambos factores de 0,2572 entre el 22 de diciembre y el 9 de febrero y de 0,1868 para el periodo restante a partir del 9 de febrero.

A pesar de ello, durante el análisis estadístico se observó que las lluvias que se desarrollaron el día 23 de diciembre (Figura 4-54) sí parecieron tener cierta influencia en las concentraciones. Para ese día se obtuvo un coeficiente de 0,7911 con un coeficiente de determinación de 0,626 siendo después de la presión, el factor que mayor influencia ha mostrado este día.

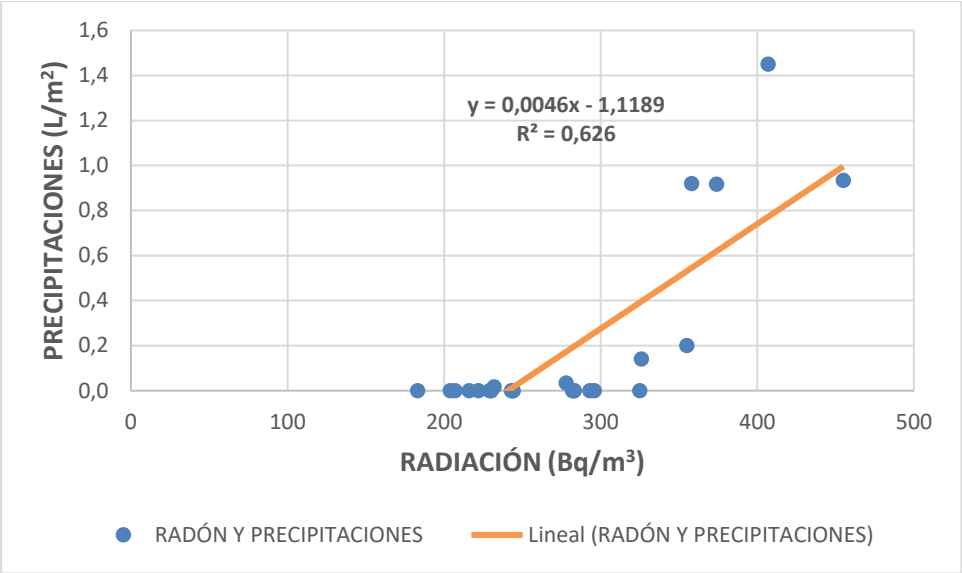


Figura 4-54 Correlación radón-precipitaciones 23 diciembre

De la misma forma, el día 7 de febrero (Figura 4-55) se obtuvo un comportamiento similar donde se obtuvo una correlación con las lluvias de -0,7120 y una certeza de 0,507.

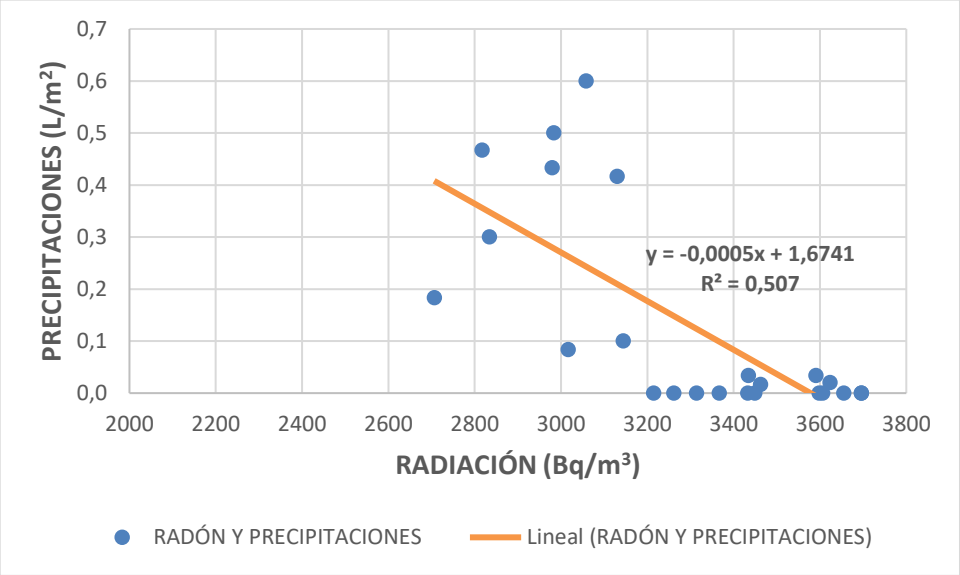


Figura 4-55 Correlación radón-precipitaciones 7 febrero

Sin embargo, los resultados obtenidos en este caso no parecen relacionarse con lo obtenido en las distintas investigaciones. Generalmente cuando se producen precipitaciones, suele disminuir la permeabilidad del suelo del terreno de alrededor mientras que el que se encuentra debajo se mantiene seco. Este proceso haría aumentar las concentraciones de radón.

Para observar el efecto contrario, se analizan los hechos producidos entre los días 30 y 31 de enero. En este caso, las precipitaciones influyen en cierta manera en una disminución en las concentraciones de radón. El análisis estadístico muestra una correlación con las precipitaciones un valor de 0,1157 mientras que ya se observó anteriormente, que para este día, la presión era el factor predominante. Hay que recordar, que las precipitaciones se asocian a periodos de bajas presiones como se produce en este caso. Por tanto, la confluencia de ambos factores provoca estas variaciones en los niveles de radón.

A continuación en la Figura 4-56 se muestran los resultados:

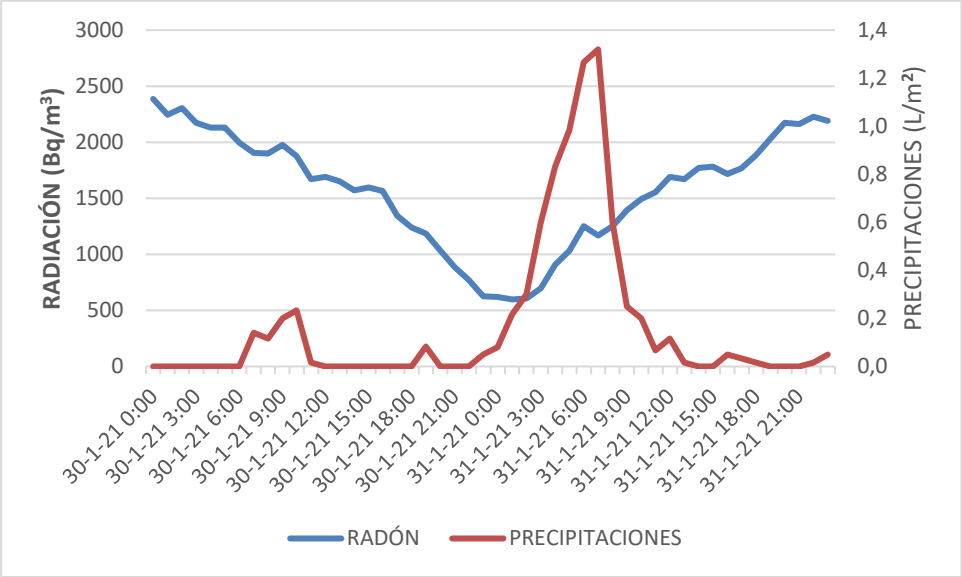


Figura 4-56 Descenso de radón con precipitaciones 30/01-31/01

Este mismo comportamiento se ha obtenido el día 23 de diciembre como se puede observar en la Figura 4-57:

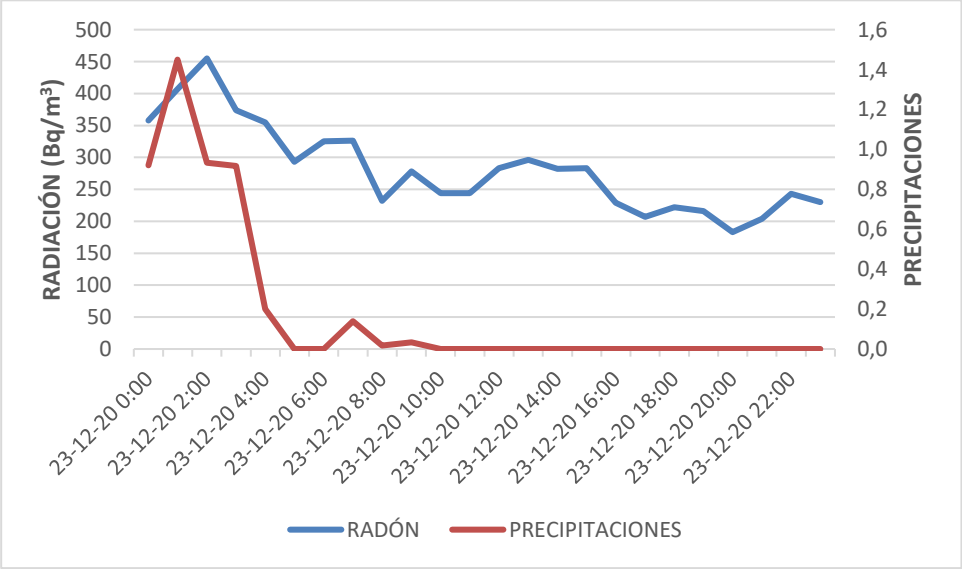


Figura 4-57 Descenso de radón con precipitaciones 23 diciembre

Cabe destacar, que en nuestro caso, el terreno que se encuentra alrededor del despacho también está cubierto. Alrededor del despacho en la zona del patio de aulas, se encuentran unos soportales de 3 metros de ancho que impiden en gran medida que las lluvias afecten al terreno cercano al despacho por lo que no recibe el agua de las lluvias de forma directa y por tanto no afecta al suelo en el sentido de modificar su permeabilidad.

Por consiguiente, la porosidad del suelo representa en este caso una característica a tener en cuenta en este factor meteorológico. Teniendo en cuenta que el granito es uno de los elementos menos porosos y dificulta la absorción del agua se crea por consiguiente un suelo muy compacto [54]. De esta forma, las precipitaciones casi no afectan y las concentraciones de radón serían muy parecidas a que si no se produjeran lluvias. Estas características parecen estar presentes en la zona.

Por otro lado, se observa que en el primer mes (Figura 4-52) durante el cual las precipitaciones fueron escasas, las concentraciones medias de radón son menores respecto a las del segundo mes (Figura 4-53). Durante este último periodo, las lluvias fueron abundantes y los niveles medios de radón son mayores. Por tanto, a corto plazo, el efecto de saturación del terreno no parece tener repercusión salvo en casos aislados. Sin embargo, a medio plazo no se puede descartar la posible influencia de este factor.

Por tanto, a lo largo de este periodo de datos no se aprecia relación entre el radón y las precipitaciones. Esto se debe a que las características del suelo y las estructuras que rodean al despacho hacen que no reciban agua de las lluvias o que lo hagan de forma muy débil y por ello no se aprecie que afecte a las concentraciones de radón. A pesar de ello, la relación entre las lluvias y la presión, mantiene la posibilidad de que el factor saturación del terreno afecte en periodos más extensos y no en casos particulares.

4.3.5 Humedad interior

Cabe destacar, que los resultados de los sensores de humedad entre los días 22 de diciembre y 27 de enero no mostraron fiabilidad ni precisión, por lo que no se mostrarán en este apartado (Véase Anexo 1 para observar la incongruencia en los datos).

En la siguiente gráfica (Figura 4-58) podemos observar los resultados obtenidos:

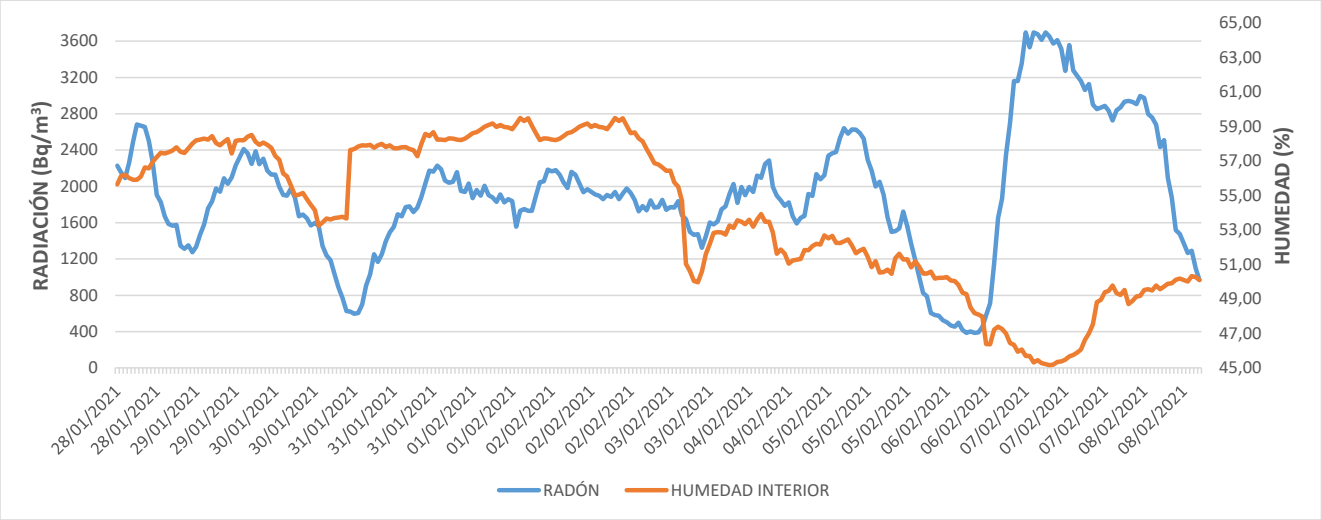


Figura 4-58 Radón-Humedad interior medidor central alto (2,3 m)

Entre el periodo indicado en la Figura 4-58, el análisis estadístico para ambos factores han mostrado una correlación de -0,2269.

Por otro lado, analizando los resultados, se obtiene que los días 7 y 8 de febrero (Figura 4-59) se obtuvieron unos coeficientes de correlación de 0,8556 con una determinación de 0,732 y 0,850 con una certeza de 0,7318 respectivamente. La correlación media para este periodo ha sido de 0,8056 con una determinación de 0,649 (Figura 4-60).

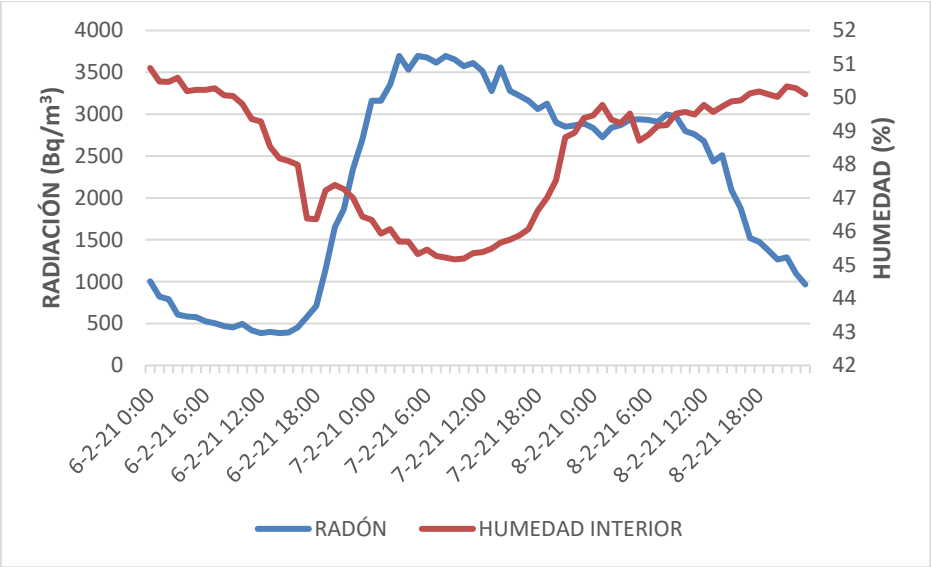


Figura 4-59 Radón-Humedad interior 6 a 8 febrero

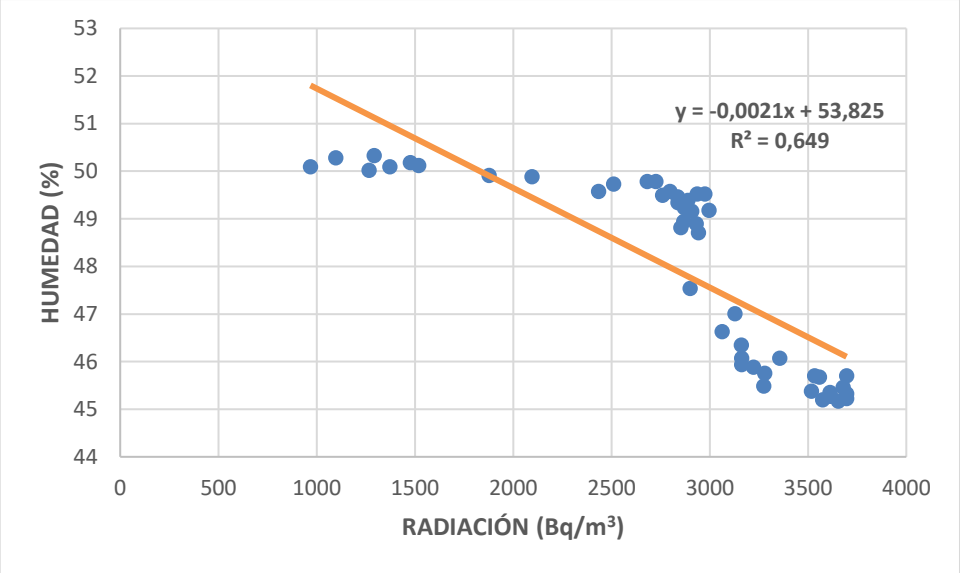


Figura 4-60 Correlación radón-humedad interior 6-8 feb

Parece observarse que un descenso en la humedad interior del ambiente puede afectar en cierta medida a que las concentraciones de radón se incrementen. Un estudio [55] sugiere que un incremento de la humedad interior produce un descenso en el coeficiente de difusión de los materiales de construcción, así como también en la variable de su longitud de difusión. Es decir, a mayor humedad se dificulta la capacidad de exhalación del gas radón de estos materiales.

Para este caso, esta disminución de la humedad favorece la capacidad de estos materiales de liberar radón, ya que mantiene un elevado coeficiente de difusión por lo que el radón puede escapar a través de los poros de estos materiales con mayor facilidad. Este proceso parece tener cierta concordancia con los resultados, debido a que se observa un incremento en la concentración de radón donde la humedad parece ser uno de los factores que ha mostrado cierta relación. A pesar de ello, hay que resaltar que en este periodo este gran ascenso en la concentración de radón puede deberse a la confluencia de distintos factores.

Por otro lado, se muestra a continuación lo producido entre los días 1 y 2 de febrero (Figura 4-61). Hay que tener en cuenta que estas variaciones de humedad que se producen en este periodo son muy bajas (cambios de 1% de humedad), por lo que no se espera obtener un cambio sustancial en la

permeabilidad de los materiales. Además, los cambios de humedad están sujetos a modificaciones en las temperaturas, por lo que la confluencia de ambos factores puede ser el origen de estas variaciones en los niveles.

A continuación, se exponen estas variaciones en la siguiente figura:

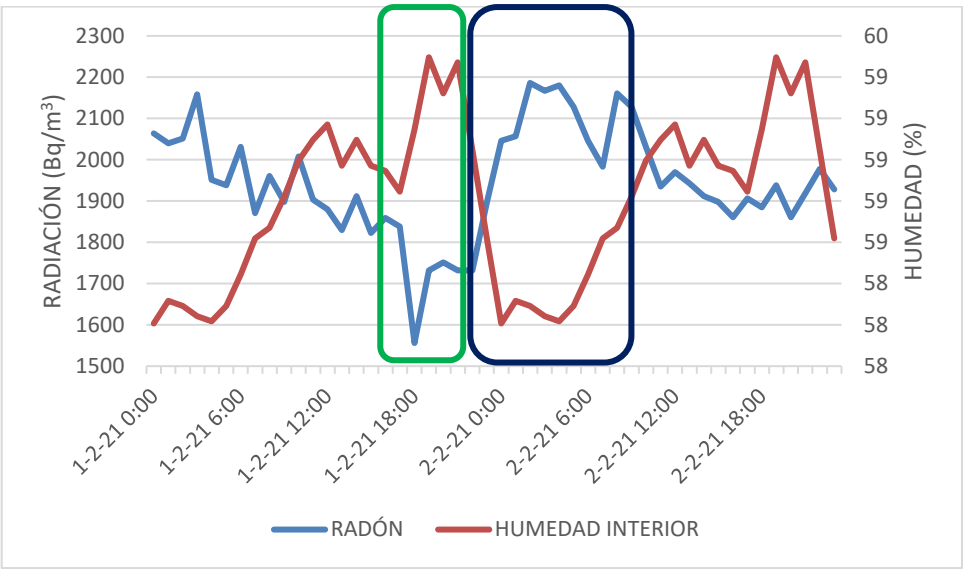


Figura 4-61 Radón-Humedad interior 1 a 2 febrero

Durante estos días se obtuvo una correlación con el radón de 0,772 con un coeficiente de determinación de 0,596 y 0,7471 con una bondad de ajuste de 0,5581 respectivamente. La correlación para todo este periodo ha sido de 0,6869 con una determinación de 0,4718 (Figura 4-62).

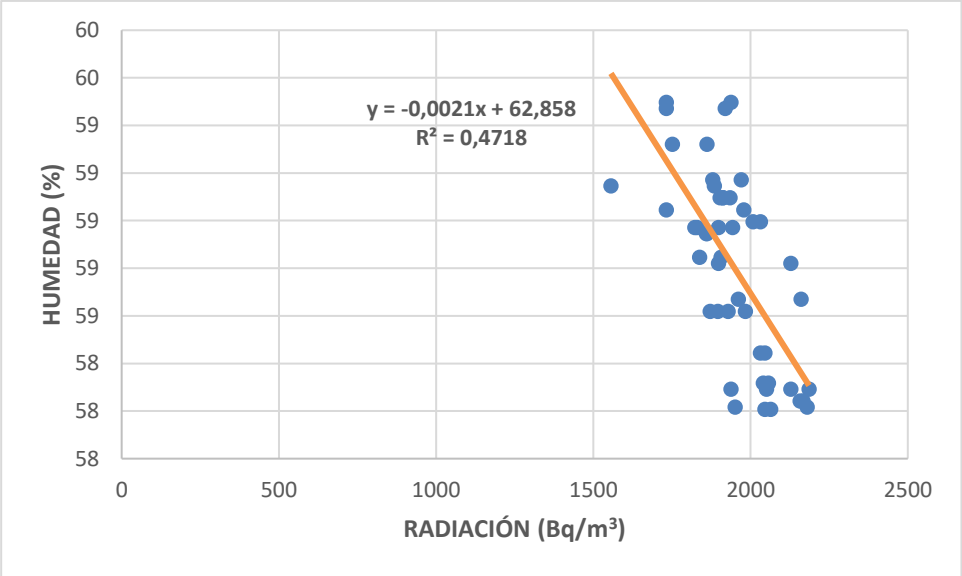


Figura 4-62 Correlación radón-humedad interior 1 feb

Al igual que en el caso anterior, se suele mostrar un comportamiento similar a lo enunciado en el estudio. Los incrementos de radón parecen relacionarse en pequeña medida con descensos de humedad (encuadrado en verde) al igual que los incrementos de este factor meteorológico dificultan la exhalación de radón (encuadrado en azul). Estos procesos también pueden deberse a los motivos mencionados anteriormente.

Además, hay que tener en cuenta que, como se destacó en el apartado 3.1.2, el despacho se compone principalmente de ladrillo y cemento, por lo que la humedad puede interferir en la capacidad de exhalar radón que tienen estos materiales (Tabla 2-3).

Por tanto, en base a los resultados obtenidos, la humedad podría influir en pequeña medida y en casos muy aislados en las concentraciones de radón. Parece observarse que influye en la capacidad de exhalación de los diferentes materiales constructivos.

4.4 Influencia de las mareas terrestres y oceánicas

Las mareas terrestres y oceánicas han sido objeto de estudio en diversos estudios para hallar su posible relación con la concentración de este nocivo gas. Para analizar este factor, esta sección se dividirá en dos apartados. Por un lado, se examinarán las mareas terrestres. Más tarde, se analizarán las mareas oceánicas de la zona de la ENM. En ambos casos se observará su posible influencia sobre el gas radón.

4.4.1 Mareas terrestres

Para poder estudiar este factor, en primer lugar se van a exponer las fases de la Luna con sus correspondientes fechas ya que según los estudios, ciertos picos de radón coinciden en cierta medida con las fases de la Luna [45].

El motivo de este hecho parece tener relación con las deformaciones que se producen en la corteza terrestre, la cual se comporta como un sólido elástico. Estas deformaciones se producen como respuesta al movimiento de la Luna orbitando alrededor de la Tierra y también de la rotación que produce nuestro planeta con el Sol. Estas deformaciones hacen que la corteza se puede desplazar una cierta longitud (unos pocos cm). Debido a este motivo, este hecho parece ser el responsable de la expulsión periódica del radón, principalmente a través del bombeo de agua subterránea como respuesta a los efectos del desplazamiento de la corteza terrestre [56]. De la misma forma, hay que tener en cuenta que esta fuerza de bombeo es una combinación de las compresiones y extensiones de los estratos rocosos y también de las variaciones del nivel freático entre otros factores. Sin embargo, también puede deberse a cambios en la permeabilidad de la corteza terrestre cuando se producen seísmos o choques de placas tectónicas.

Por tanto, estas compresiones y dilataciones que se producen en la corteza terrestre parecen afectar a las concentraciones de radón. La interacción gravitacional entre los cuerpos parece producir una mayor cantidad de radón en el interior de los edificios.

A continuación, se muestran las fases de la Luna tanto para el mes de diciembre como para el mes de enero [52]:

Mes	Cuarto menguante	Luna nueva	Cuarto creciente	Luna Llena
Diciembre	8 diciembre 01:36 horas	14 diciembre 17:16 horas	22 diciembre 00:41 horas	30 de diciembre 04:28 horas
Enero	6 enero 10:37 horas	13 enero 06:00 horas	20 enero 22:01 horas	28 enero 20:16 horas
Febrero	4 febrero 18:37 horas	11 febrero 20:06 horas	19 febrero 19.47	27 febrero 09:17 horas

Tabla 4-6 Fechas de las fases de la Luna diciembre a febrero

Una vez que se han observado cuándo se producen dichas fases (Tabla 4-6), se muestra un gráfico comparativo entre la concentración de radón del medidor central alto y la iluminación de la Luna durante el periodo completo de datos (Figura 4-63).

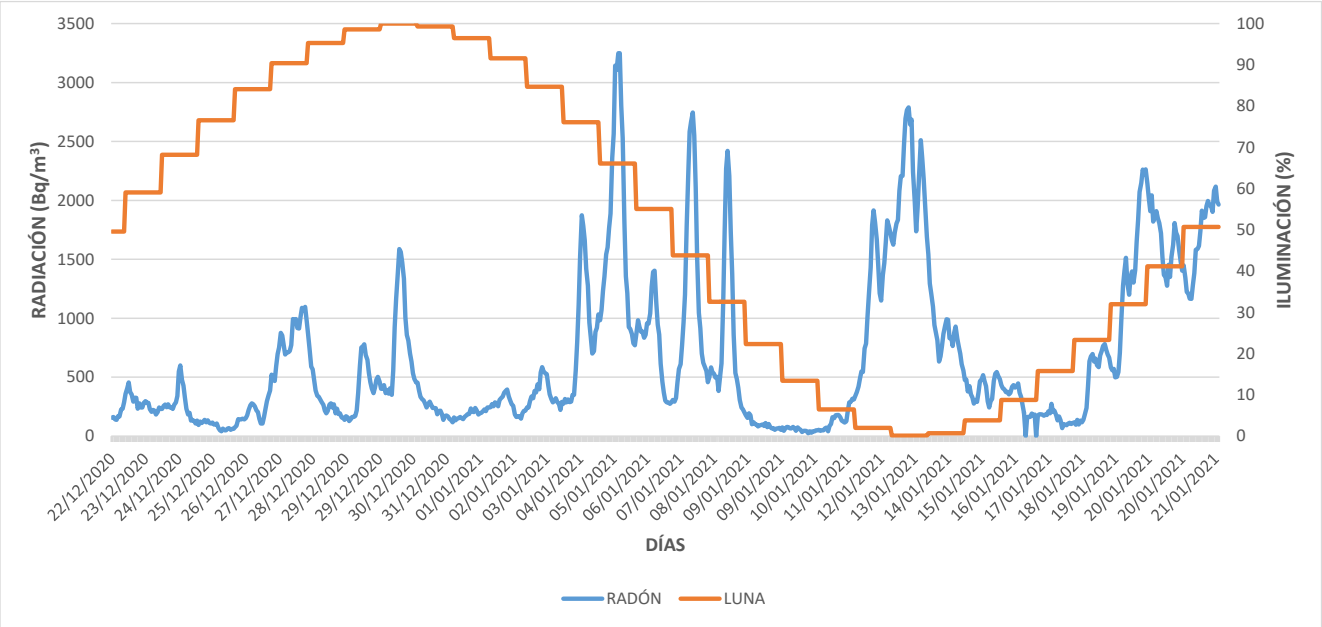


Figura 4-63 Radón-Iluminación Luna 22/12-22/2

Para realizar un análisis con mayor profundidad, a continuación se observará el comportamiento del radón cuando encontramos Luna llena o Luna nueva (Figura 4-64).

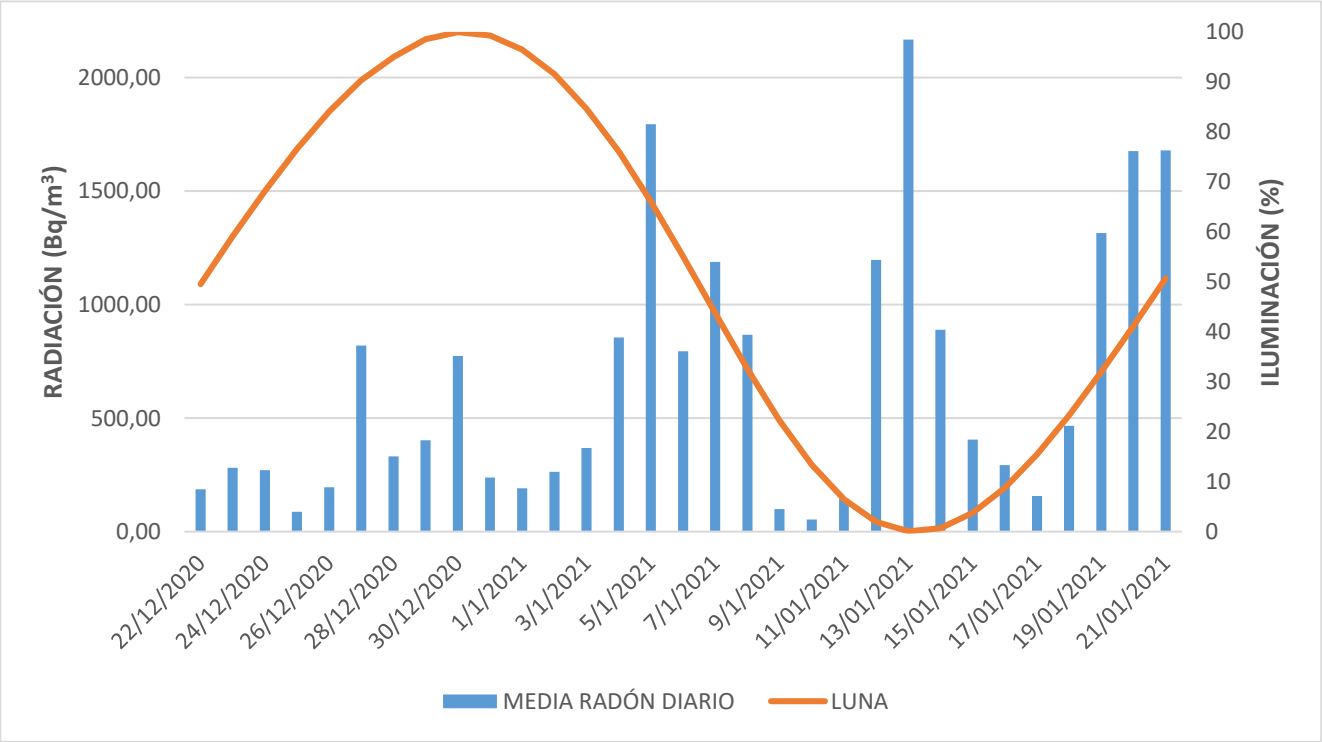


Figura 4-64 Relación entre concentración media diaria de radón-iluminación Luna (inicio 53 % iluminación)

Como se puede observar, cuando la Luna se encuentra en la fase de la Luna Nueva especialmente, se observa un incremento de radón para esos días. Ya se observó anteriormente que para los días 12 a 15 de enero se obtuvo correlaciones con otros factores meteorológicos. Sin embargo, la Luna parece

también afectar en cierta forma a las variaciones del nivel del gas radón. En este caso, analizaremos un periodo comprendido entre el día 12 de enero y el día 21.

Realizando el análisis estadístico de correlación, obtenemos que para el periodo comprendido entre el 12 y 15 de enero, el factor de correlación obtenido ha sido de -0,7032 (Figura 4-65). Por tanto, en base a estos resultados, para este periodo se muestra una relación inversa, es decir, cuando la iluminación de la Luna se hace más tenue (en este caso se produce Luna nueva) las concentraciones de radón aumentan.

Cabe destacar, que la correlación máxima (15 de enero con 3,8 % de iluminación) se ha obtenido poco después de que se desarrollara esta fase. Este retardo puede deberse a la profundidad a la que se encuentre el estrato de la roca, cuanto más profundo se encuentre, mayor retardo se producirá entre la fase de la Luna y las correspondientes variaciones de los niveles de radón.

Asimismo, los días 16 y 17 de enero donde se observan niveles de radón reducidos, no se obtiene en este caso relación entre la iluminación de la Luna y el radón. En cambio, para los días siguientes, 19 al 21 de enero, el análisis estadístico indica cierta relación con este factor con un valor de 0,3314 (Figura 4-66). Por tanto, aunque la iluminación de la Luna puede influir en cierta forma en estos elevados niveles de radón, estos incrementos pueden deberse también a una confluencia de otros factores meteorológicos.

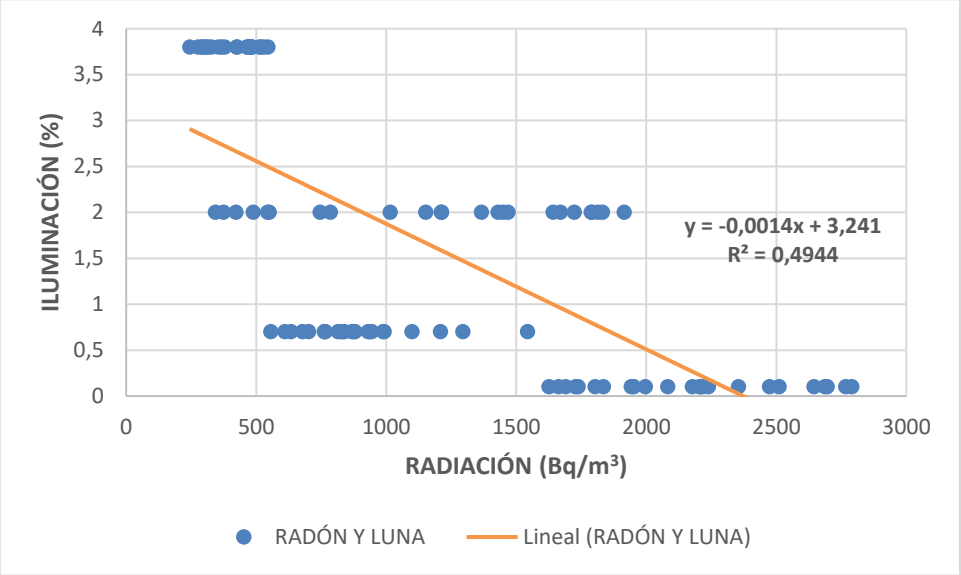


Figura 4-65 Correlación radón-mareas terrestres 12-15 enero

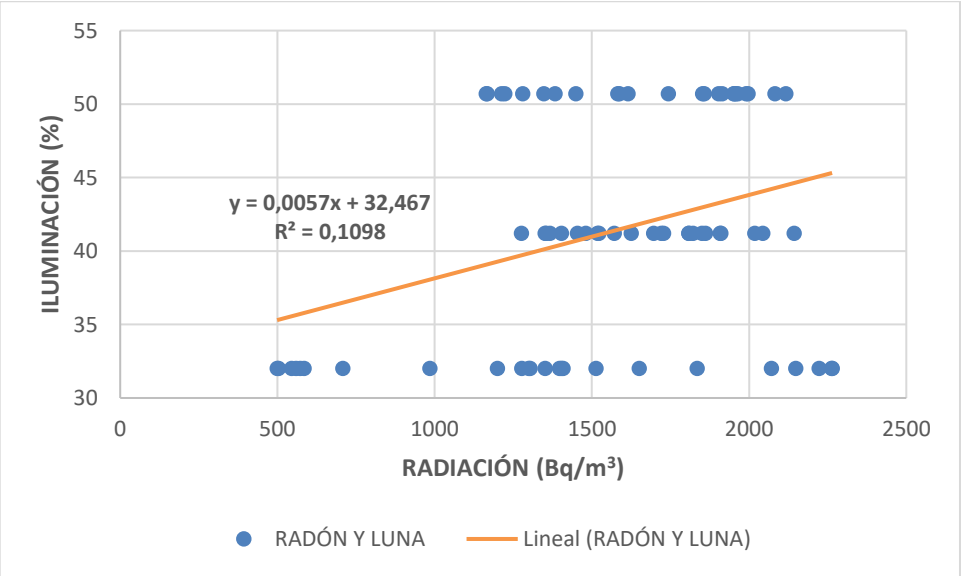


Figura 4-66 Correlación radón-mareas terrestres 19-21 enero

A continuación, llevaremos el mismo análisis para el caso de las otras dos fases de la Luna cuarto creciente y cuarto menguante. Los resultados se muestran a continuación (Figura 4-67):

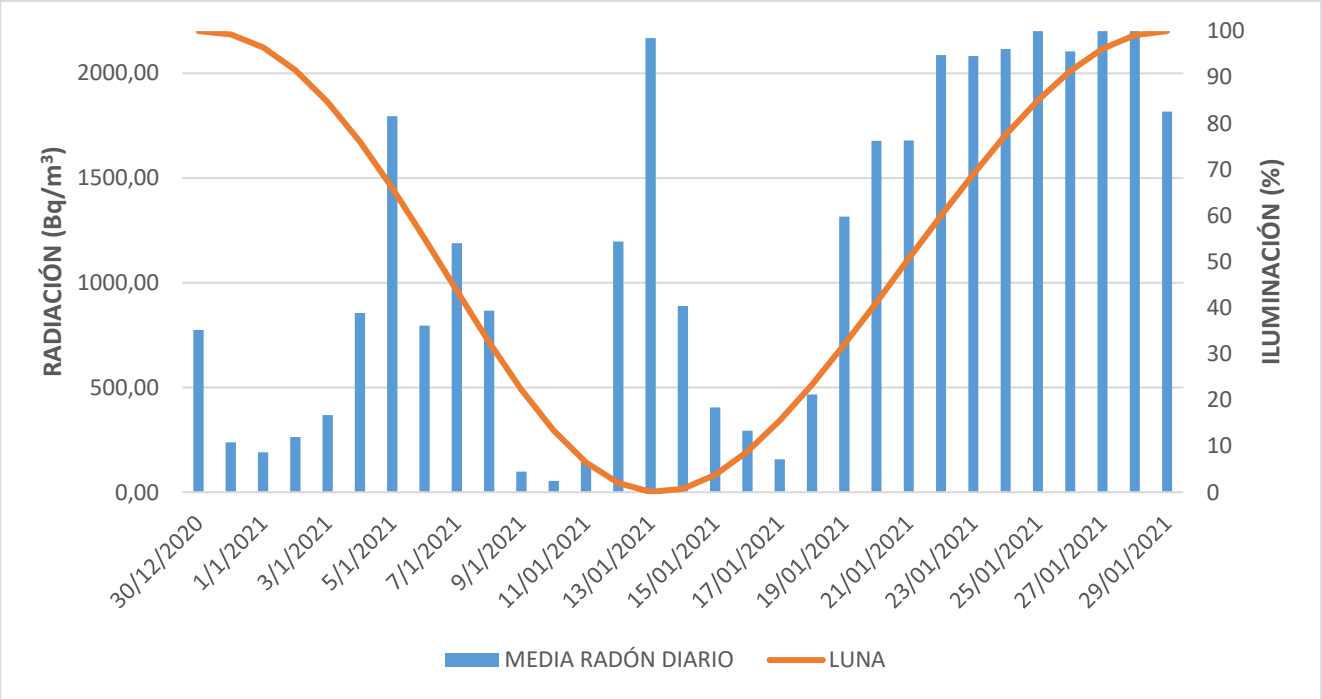


Figura 4-67 Relación entre concentración media diaria de radón-iluminación Luna (inicio 100 % iluminación)

Al igual que en el caso anterior, parece observarse también cierta correlación entre estas fases de la Luna y el radón. Entre los días 21 y 27 de enero se observa un incremento en la concentración de radón correspondiente a la fase de cuarto creciente. Para este periodo, la correlación obtenida ha sido de 0,5721 Por consiguiente, para este periodo, las mareas terrestres a través del proceso mencionado anteriormente podrían haber influido ligeramente en las concentraciones de radón.

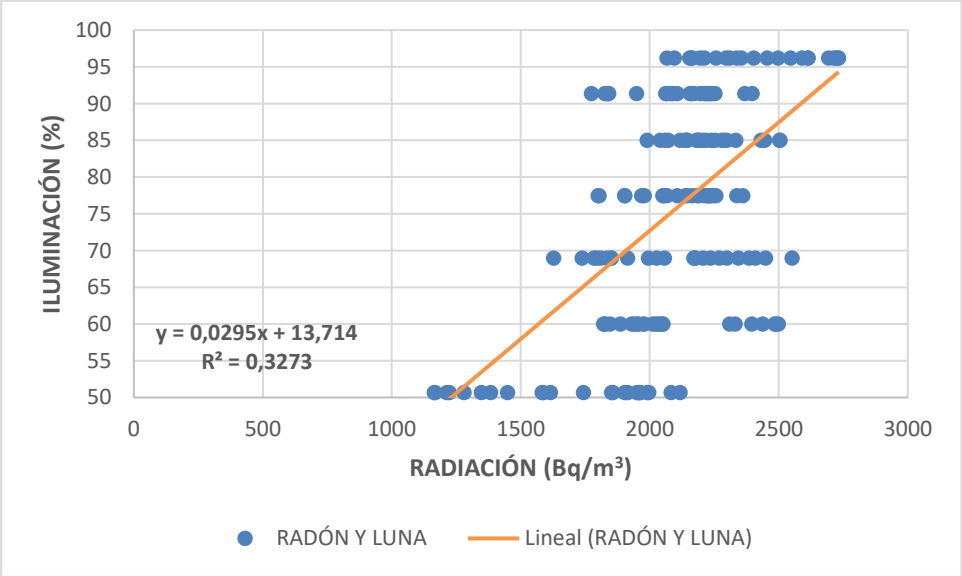


Figura 4-68 Correlación radón-mareas terrestres 21-27 enero

De forma similar que en el análisis de Luna llena y nueva, parece observarse también cierto retardo entre esta fase de la Luna y el incremento de la concentración de radón. El motivo de esto puede ser el mismo que el caso anterior, la profundidad a la que se encuentre el estrato de la roca hará que el radón tarde más o menos en liberarse.

Sin embargo, las variaciones del nivel freático debido a la acción de las mareas oceánicas pueden ser también el causante del incremento de estos niveles como observaremos en el siguiente apartado.

4.4.2 Mareas oceánicas

Las mareas oceánicas pueden ser un condicionante más en las concentraciones de radón. En aquellas zonas más cercanas al mar la influencia de este fenómeno puede producir variaciones en los niveles de freáticos y por tanto en las concentraciones de este gas. Hay que recordar, que las mareas terrestres, es decir las interacciones que realiza la Luna con la Tierra, también influyen sobre el comportamiento de las mareas oceánicas.

A continuación, en las Figura 4-69 y Figura 4-70 podemos observar los resultados obtenidos a lo largo de todo nuestro periodo de medición para el despacho 114:

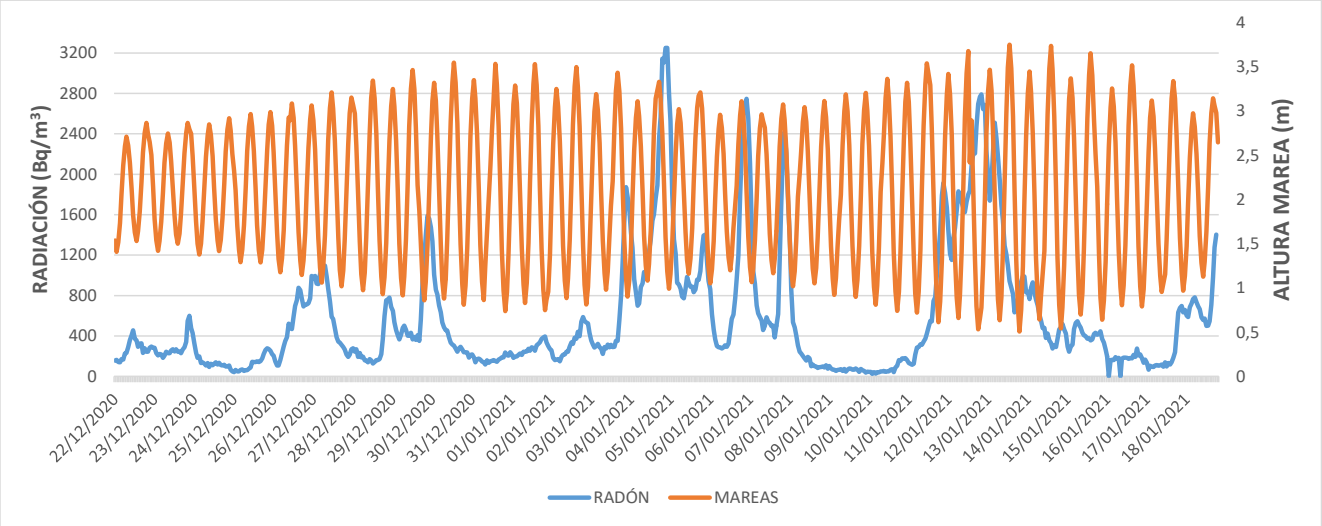


Figura 4-69 Radón-Mareas oceánicas 22/12-18/01 medidor central alto (2,3 m)

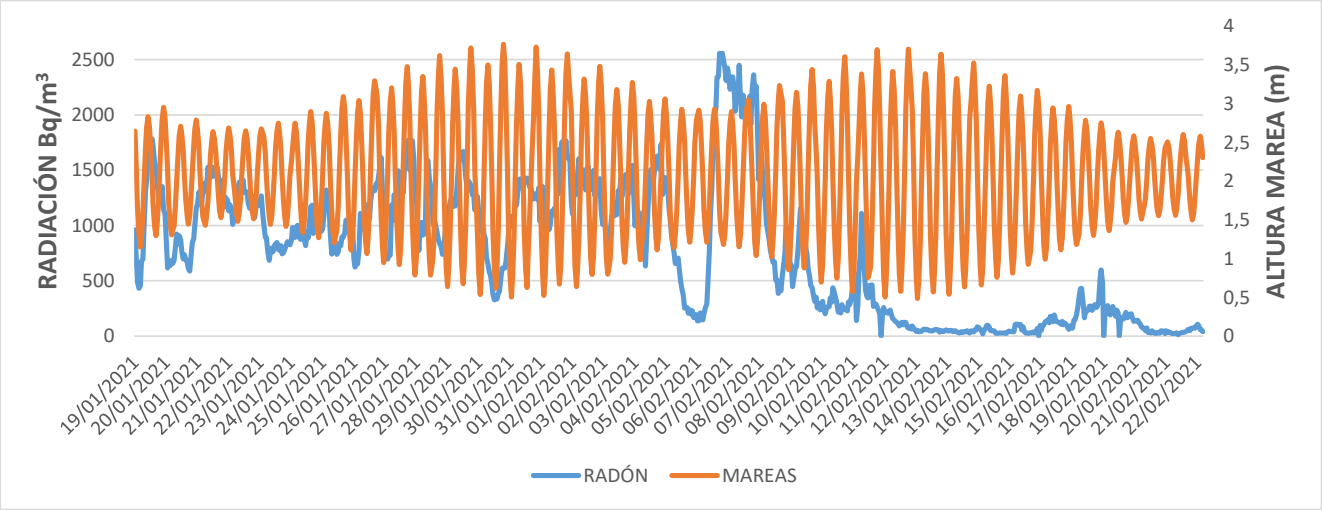


Figura 4-70 Radón-Mareas oceánicas 18/01-22/02 medidor central alto (2,3 m)

El análisis de correlación ha mostrado un coeficiente de -0,0244 de media en los dos meses de medición. Por lo que a medio plazo parece no haber una relación entre ambos factores, pero sí podría haberla en espacios temporales más cortos. Además, el signo negativo indica una relación inversa entre ambos factores, es decir, cuando uno aumenta el otro disminuye.

En primer lugar, las mareas oceánicas han mostrado cierta correlación la semana comprendida entre los días 24 de diciembre y 2 de enero (Figura 4-71). A continuación, se describen los días, 24 de diciembre con un valor de 0,2984 (Figura 4-72), el 27 de diciembre con un valor de 0,2421 (Figura

4-73), 28 de diciembre con un coeficiente de 0,2101 (Figura 4-74), 1 de enero de 0,2942 (Figura 4-75) y por último el 2 de enero con una relación de 0,2142 (Figura 4-76). Como se puede observar, en estos días se han obtenido correlaciones positivas contrarias a lo obtenido globalmente. Hay que recordar, que entre los días 22 y 30 de diciembre, la Luna cambia de fase de cuarto creciente a Luna llena, por lo que este hecho puede influir sobre las mareas oceánicas, ya que las interacciones que ejerce la Luna sobre la corteza terrestre son más importantes en fase de Luna llena. Por tanto, estas acciones producen efectos sobre estas mareas que a su vez parecen modificar los niveles de radón.

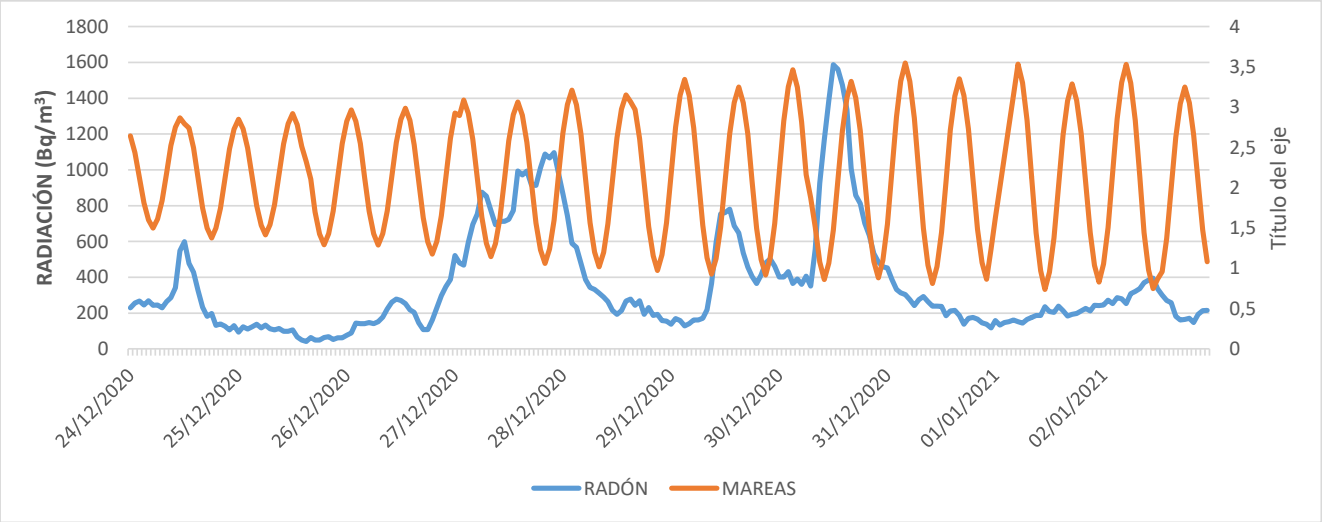


Figura 4-71 Radón-mareas oceánicas 24/12-2/1

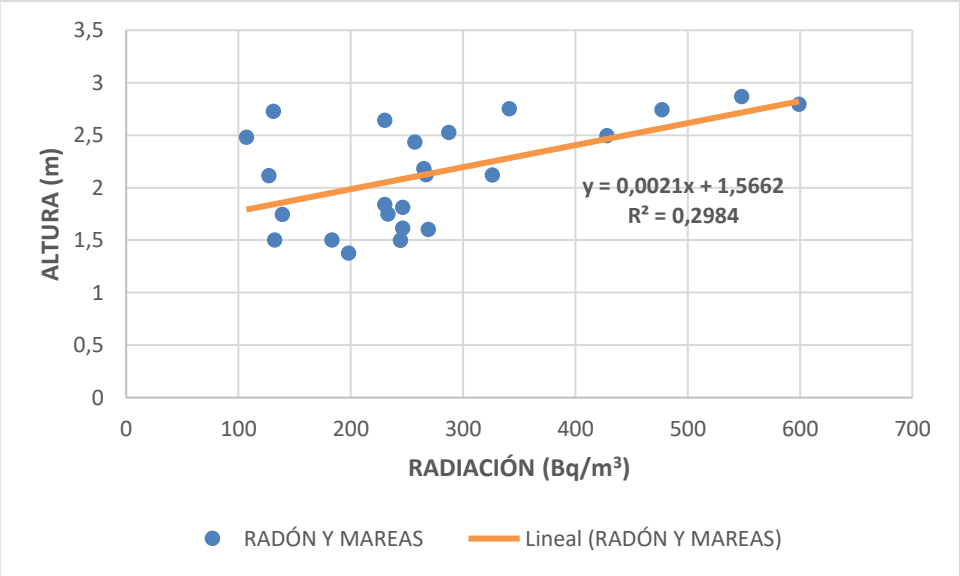


Figura 4-72 Correlación radón-mareas oceánicas 24 diciembre

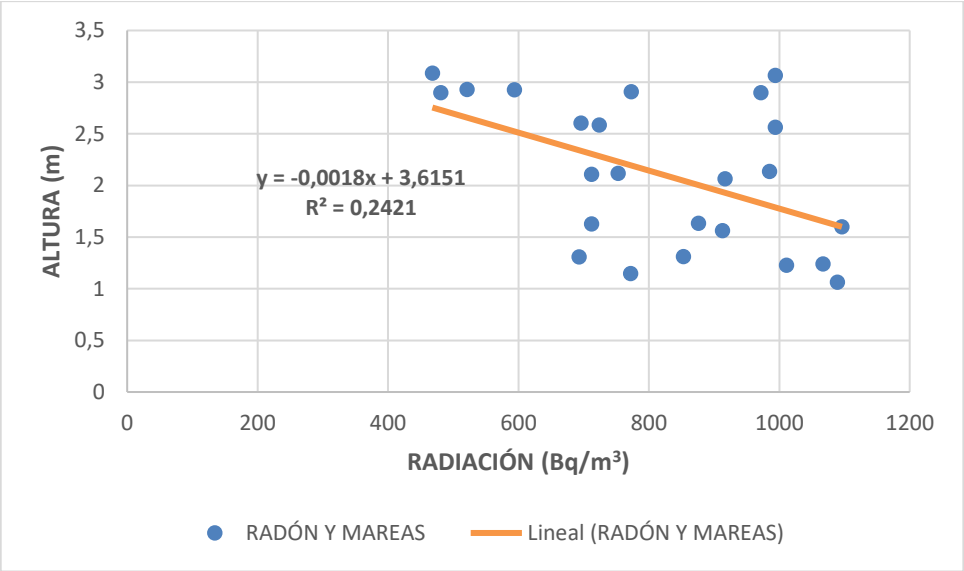


Figura 4-73 Correlación radón-mareas oceánicas 27 diciembre

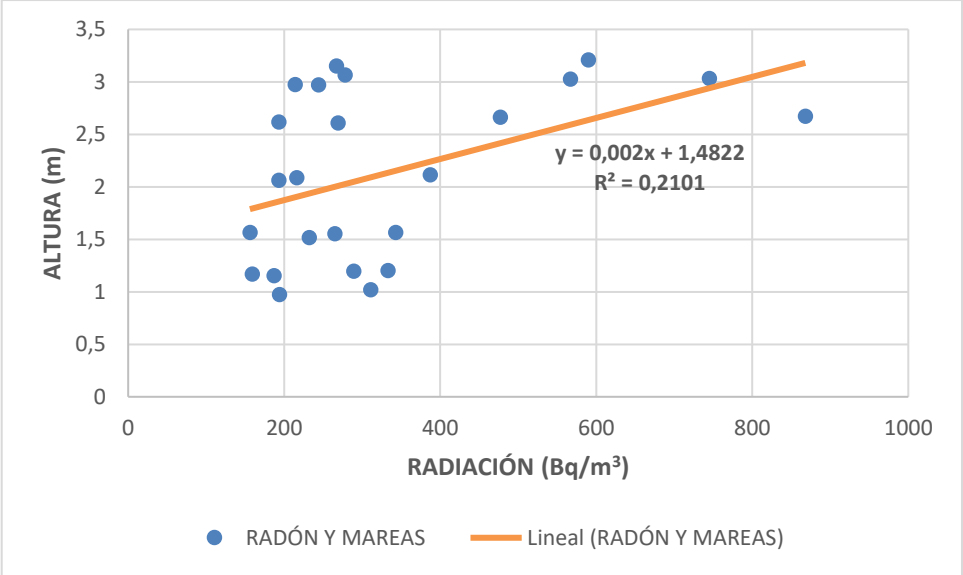


Figura 4-74 Correlación radón-mareas oceánicas 28 diciembre

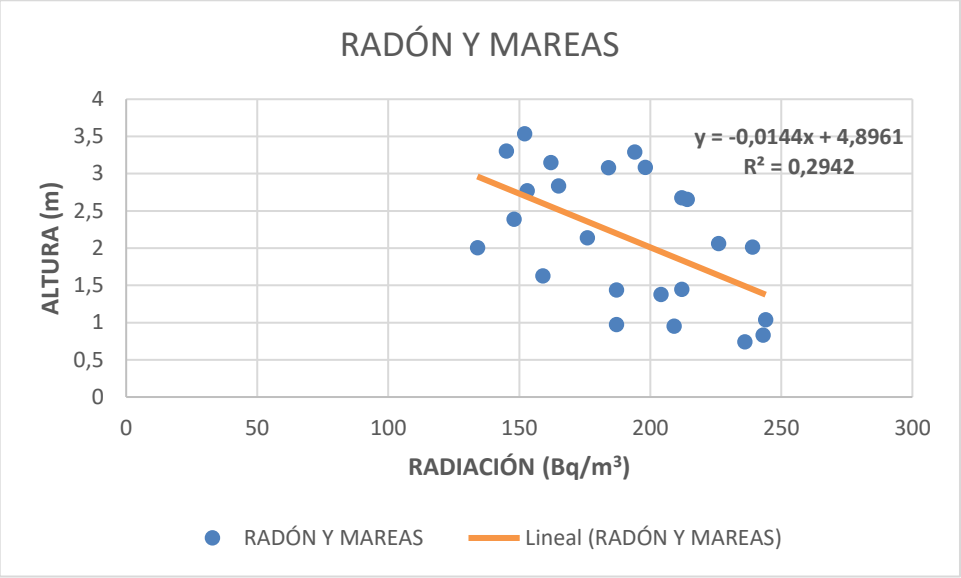


Figura 4-75 Correlación radón-mareas oceánicas 1 enero

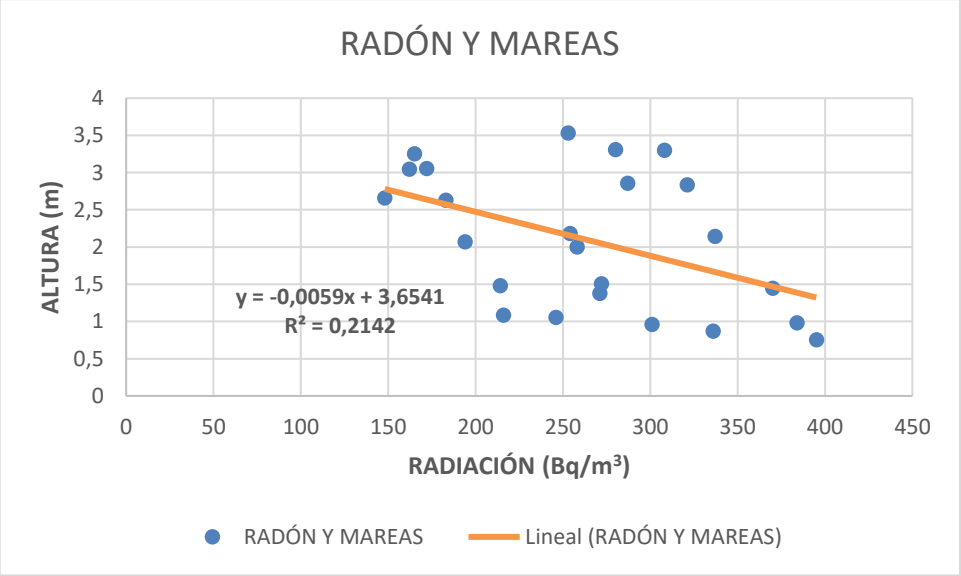


Figura 4-76 Correlación radón-mareas oceánicas 2 enero

Para continuar con el estudio más en detalle, se analizará entre el 12 y 15 de enero (Figura 4-77), periodo en el que se obtuvo también correlación con la concentración de radón. El día 12 de enero, las mareas oceánicas han mostrado una correlación con los niveles de radón, siendo el coeficiente de correlación obtenido para este día 0,5172 (Figura 4-78).

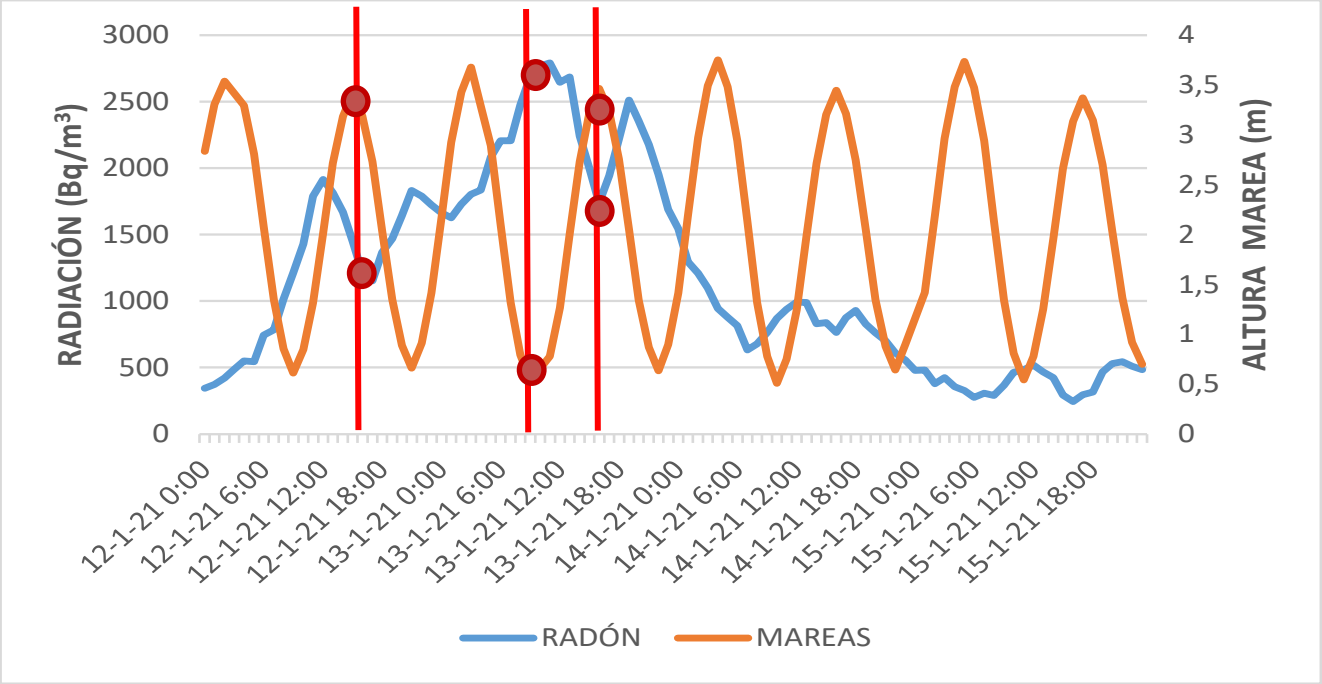


Figura 4-77 Radón-Mareas oceánicas 12-15 enero

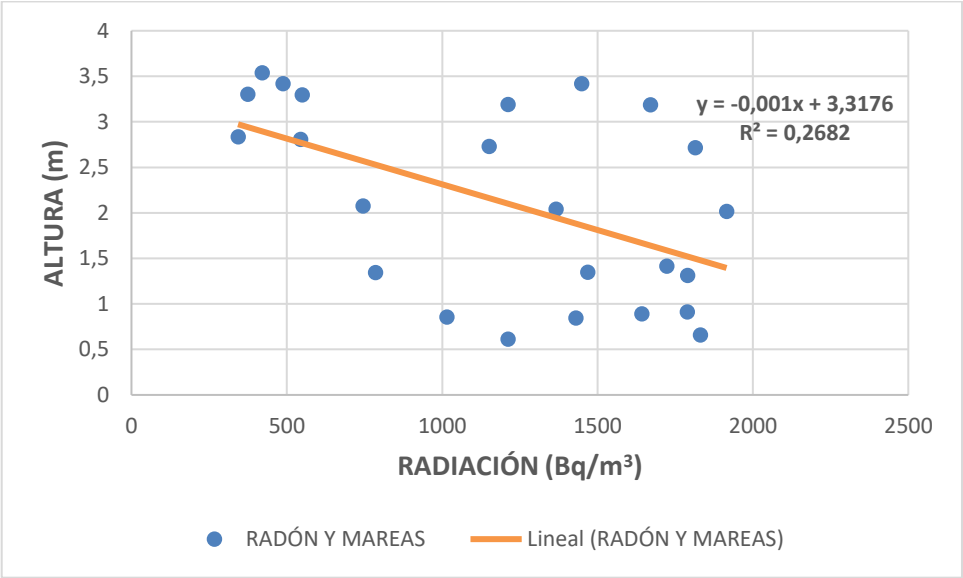


Figura 4-78 Correlación radón-mareas oceánicas 12 enero

En la Figura 4-77 puede observarse los periodos que desarrolla la marea cada 6 horas entre la bajamar y la pleamar. Parece hallarse una cierta relación entre estos periodos y las variaciones del nivel de radón. Es decir, cuando la marea se dirige hacia la bajamar, se produce un incremento en las concentraciones de radón. De la misma forma, cuando estas se dirigen hacia la pleamar, los niveles de radón descienden. Por tanto, parece obtenerse en cierta medida una correlación entre estos dos factores, con un cierto retardo temporal.

Por otro lado, se emplearon las mediciones de otro TFG de un medidor situado en el aula 21 (simulador de navegación) que se encuentra a 20 m de nuestro despacho (Figura 3-15 Situación aula 21 (simulador de navegación). En las medidas de este lugar, se pudo observar variaciones cíclicas en los niveles de radón y que por tanto se han decidido incluir su estudio en este TFG para completar el análisis de este factor. En color rojo recuadrado, aparecen los períodos de bajamar. En color verde, los periodos

de pleamar (Figura 4-79). Además, se han indicado con círculos en rojo los puntos en los que este proceso parece más claro:

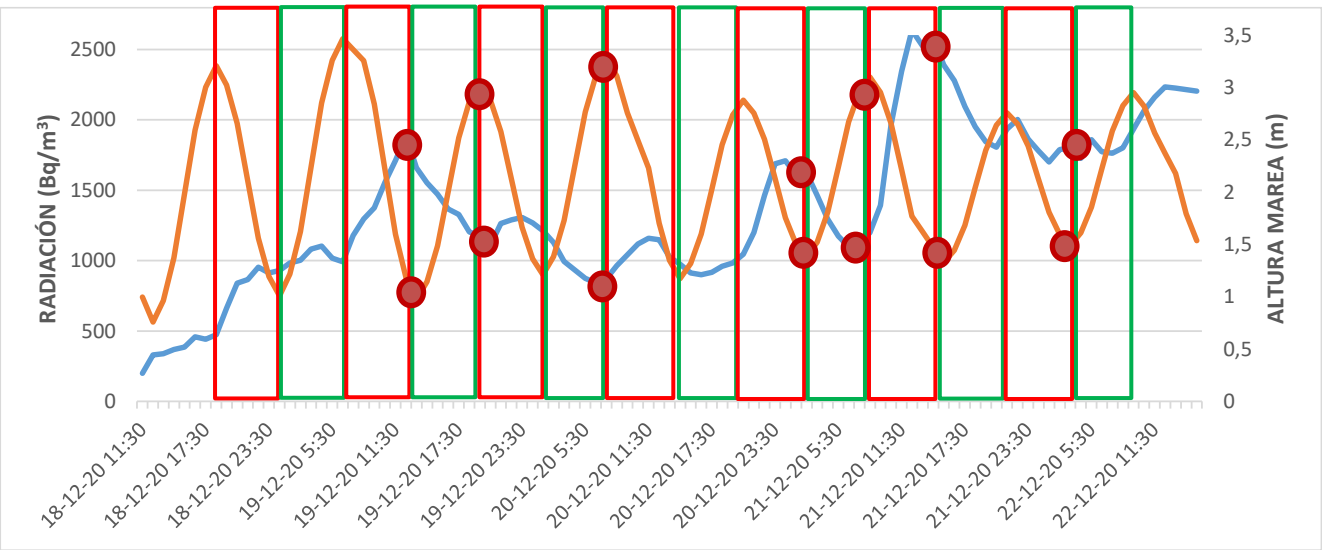


Figura 4-79 Radón-Mareas oceánicas 18-21 diciembre aula 21

Los resultados obtenidos en el aula 21 permiten observar que los picos de radón se producen cuando la marea se encuentra en su altura mínima (bajamar). Asimismo, cuando la marea incrementa su altura, parece observarse una disminución de la concentración de radón, llegando al nivel mínimo cuando la marea se encuentra en pleamar. Por consiguiente, sí se confirma una estrecha relación entre ambos factores en estos días, lo que es un aspecto muy novedoso de este trabajo, pues no se han encontrado estudios previos que describan esta relación. Además, para el caso de este espacio en particular, no se aprecia un retardo en tiempo entre las variaciones en altura de la marea y el incremento o descenso en las concentraciones de radón. Hay que recordar, que en el despacho 114 sí se apreciaba un cierto retardo al contrario que en el aula 21. Este hecho puede deberse a diferencias geológicas entre estos espacios que con los medios disponibles en este trabajo no es posible describir.

Hay que destacar que las deformaciones en la corteza terrestre (principalmente dilataciones) también producen que el agua subterránea se acerque más a la superficie. Como el volumen de aire en el suelo que contiene una alta cantidad de radón está limitado por las aguas subterráneas, cuando el agua subterránea aumenta su altura produce que este gas sea impulsado hacia los estratos de las rocas más altas y de este lugar, se exhala libremente o bien a la atmósfera o al interior de los edificios. Por tanto, el efecto aquí expuesto es diferente al que se desarrolla en el aula 21, ya que un incremento de la altura de la marea implicaría un incremento en los niveles de radón.

Por otro lado, la carga superficial de la corteza terrestre que producen las mareas oceánicas induce una deformación en la corteza terrestre como si fuera un sólido elástico que depende en el tiempo y genera deformaciones tanto verticales como horizontales. Por ello, la fuerza de las mareas oceánicas puede afectar por sí sola a la corteza terrestre produciendo dilataciones y compresiones cíclicas en los estratos de las rocas debido a las variaciones cíclicas que desarrolla la marea en el nivel freático.

Por tanto, en base a los resultados obtenidos, hay que resaltar que la Luna influye sobre las mareas oceánicas y son estas las que generan parte de las deformaciones que se producen en la corteza terrestre. Nuestro despacho se encuentra situado a escasos 100 metros del mar. Por ello, el radón puede mezclarse con otros gases del sustrato de las rocas. El agua subterránea impulsa este volumen de aire hacia los estratos más cercanos a la superficie como consecuencia de las variaciones del nivel freático que producen las mareas oceánicas. Esta relación encontrada parece tener relación con un estudio [45]

analizado en el apartado 2.4.2. En conclusión, se puede obtener que para este caso, las mareas oceánicas sí parecen mostrar cierta relación en las variaciones de la concentración de radón.

Cabe destacar que el efecto de las mareas, como se ha indicado en apartados previos, puede verse enmascarado por la influencia conjunta de otros factores en la concentración de radón.

Para concluir, por tanto, se pueden distinguir dos efectos que producen las mareas:

1) El ciclo de las mareas varía con la Luna, como se puede observar en las Figura 4-69 y Figura 4-70, hay momentos de mareas más bajas y más altas que están ligados al ciclo lunar y por tanto parece observarse que contribuyen a ese efecto de deformación.
2) El otro efecto independiente del anterior, es la forma en la que las pleamares y bajamares cada 6 horas afectan ya que dentro de un mismo día también se han observado variaciones, como parece observarse en las Figura 4-77 y Figura 4-79. Este efecto, no se ha encontrado en estudios previos y el motivo de ello podría ser la cercanía al mar de los edificios monitorizados, donde la marea podría producir un efecto inmediato sobre el nivel freático y este a su vez sobre las concentraciones de radón.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente TFG se ha desarrollado a lo largo de una serie de secciones de las que se pueden extraer diferentes conclusiones. En primer lugar, se ha podido comprobar que existe una creciente preocupación social acerca del radón a nivel mundial, debido a que las altas concentraciones de este gas radioactivo producen efectos perjudiciales sobre la salud. En segundo lugar, se llevó a cabo una revisión de diferentes estudios científico-técnicos relacionados con el gas radón. Aunque estos estudios no son muy numerosos ni concluyentes, han permitido resaltar la influencia de los factores geológicos (composición y permeabilidad del terreno) y atmosféricos en la concentración de radón. Además, se han encontrado otros factores que pueden contribuir a que los niveles de radón varíen de forma cíclica como son las mareas barométricas, oceánicas y terrestres.

Con el fin de contribuir a comprender mejor cómo se comporta el gas radón y cuáles son las variables que más pueden influir en las fluctuaciones de sus concentraciones, se llevaron a cabo mediciones de radón en un despacho del edificio del CUD durante dos meses. Estos datos y su correspondiente análisis estadístico permiten extraer las siguientes conclusiones:

1) El equipo de medición empleado, RadonEye RD200, presenta una precisión (10%) y campo de aplicación limitados. Por otro lado, tiene un límite de medición de concentraciones relativamente bajo permitiendo sólo medir hasta 3696 Bq/m^3. Si bien ha sido válido para llevar a cabo los objetivos planteados en este TFG, puede llegar a resultar limitado para llevar a cabo investigaciones de mayor detalle, como por ejemplo conocer la exhalación de radón por el suelo, emisión de radón de materiales de construcción. Debido a estos hechos, se sugiere la necesidad de equipar al CUD de la ENM con otro equipo que posea mejores características y especialmente que muestre un límite de medida superior al actual.

2) Durante los dos meses de medición realizados en el edificio del CUD, se ha podido observar que el despacho 114 ha mostrado una concentración media mayor de lo permitido por las normativas tanto a nivel nacional como europeo, que establecen un máximo de 300 Bq/m^3. Además, durante algunos períodos de tiempo sostenidos de varios días, se han podido obtener concentraciones muy elevadas de hasta 3000 Bq/m^3 aumentado así el riesgo contra la salud.

3) De acuerdo a los resultados obtenidos y en relación a los factores geológicos que afectan a la concentración de radón, bajo el edificio del CUD parece observarse algún tipo de modificación física del terreno, como pudiera ser alguna grieta, fisura o desnivel en el terreno, que produce valores muy elevados de este gas. Este foco parece situarse en el subsuelo del despacho 114 ya que las concentraciones obtenidas en este lugar, contrastan en gran medida con otros despachos

que se encuentran a muy escasos metros de este (el despacho 112, se encuentra a menos de 10 m de este y presenta unos valores que cumplen en gran medida la normativa). Además, estos espacios poseen los mismos materiales de construcción y sufren el mismo tipo de influencia de los factores meteorológicos. Asimismo, el análisis geológico de la zona ha indicado la existencia de dos tipos de terrenos en la ENM, lo que puede justificar las diferencias en el comportamiento del radón entre edificios próximos.

4) La ventilación ha mostrado relevancia en las concentraciones, pues el intercambio de aire con el exterior permite disminuir los niveles de radón. En cambio, el cierre del sistema de ventilación y un incremento de hermeticidad en el despacho podrían producir un aumento considerable en los niveles de radón.
   Además, la apertura de la ventilación mecánica, favorece la ventilación del falso techo gracias al aire fresco que circula, reduciendo así las concentraciones en esta zona. Sin embargo, aunque en el despacho las concentraciones también se reducen por este efecto, no lo hacen en la misma medida. El motivo de ello puede ser la barrera que ejerce el falso techo contra el aire, no permitiendo a éste introducirse en las zonas bajas del despacho. Por consiguiente, será necesario facilitar el flujo del aire hacia el despacho lo que se podría mejorar mediante el uso del fancoil instalado.
   Por consiguiente, mantener un buen hábito de ventilación contribuye a que los niveles de radón se mantengan por debajo del límite establecido por las normativas. Estos resultados obtenidos están de acuerdo a la literatura reflejada en los distintos estudios.
5) El análisis estadístico ha mostrado que para la zona en la que se encuentra la ENM, la presión atmosférica es el factor meteorológico que afecta en mayor medida a las concentraciones de radón. Las variaciones en la presión así como el efecto de la marea barométrica han producido aportes significativos de radón al interior de los edificios. Los resultados obtenidos en el análisis estadístico acerca de este factor concuerdan con lo establecido por el CSN.
   Otros factores que mantienen relación con la concentración de radón ordenados de mayor a menor en cuanto a influencia sobre los niveles de este gas son: las temperaturas, el viento, la humedad y las precipitaciones.
6) Durante el periodo de medición, se ha llevado a cabo un análisis de las mareas terrestres y oceánicas y su posible influencia en las concentraciones. Este proceso se considera como una de las principales aportaciones de este trabajo, pues no había sido evaluado con anterioridad. Para ello, se obtuvieron datos de las fases de la Luna, así como de las mareas de forma diaria. Los resultados obtenidos han permitido determinar que las mareas oceánicas muestran relación en la concentración de radón siendo esta relación de forma inversa, es decir, cuando uno aumenta el otro disminuye. En el caso de las mareas oceánicas, este hecho se podría ver influenciado por la cercanía de la ENM al mar, dónde las variaciones del nivel freático asociadas a las mareas son posibles y podrían explicar las variaciones cíclicas en las concentraciones de radón. De la misma forma, el radón ha mostrado correlación directa con la Luna en sus diferentes fases, destacando una mayor relación en la fase de Luna nueva mostrando así también la influencia de las mareas terrestres sobre los niveles de radón.
7) Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser utilizados como datos de partida en caso de que se dese optimizar, en un futuro, el funcionamiento del sistema mecánico de renovación del aire.

5.2 Líneas futuras

Este TFG ha desarrollado mediciones en un despacho del edificio del CUD, donde se han evaluado las relaciones de los diferentes factores que afectan a su concentración y que pueden servir como precedente a líneas futuras tanto en este edificio como en la ENM.

Por tanto, el presente TFG sirve de motivación para llevar a cabo las siguientes líneas futuras:

1) Uso de un medidor con mejores especificaciones técnicas que el empleado en el presente trabajo. Por este motivo, se sugiere la obtención de un equipo *ALPHAGUARD*. Este equipo portátil permite medir radón con un límite muchísimo superior al actual (hasta 2000000 Bq/m^3). Además, posee diferentes sondas que permiten medir concentraciones de este gas tanto en el suelo, agua, materiales de construcción y aire. Asimismo, también permite llevar un registro de diferentes datos meteorológicos como presión y humedad. Por tanto, la posible obtención de uno de estos equipos permite abrir diferentes líneas de investigación, entre ellas la medición de radón en el agua en la ENM.

2) Una vez esté en funcionamiento la estación meteorológica de la ENM, se podría repetir el estudio de correlacionar la concentración de radón con variables meteorológicas más precisas de la zona. Además, sería de interés realizar un análisis multivariable de estos factores, ya que muchos de ellos pueden estar interrelacionados y a pesar de que se ha avanzado en el conocimiento del comportamiento del radón en el presente trabajo, las conclusiones son limitadas. Por tanto, es necesario el desarrollo de un análisis multivariable.

3) Posibilidad de emplear un escáner GPR (Ground Penetrating Radar) en el suelo del edificio del CUD. De esta forma, se podrá obtener un perfil del terreno de este edificio que permita hallar posibles anomalías por las que se facilite la liberación del gas radón.

4) Desarrollo de mediciones en una zona de la ENM con terreno ganado al mar. Se podría llevar a cabo un estudio exhaustivo de las mareas oceánicas en esta zona. Asimismo, si se compara con un lugar que se encuentre en terreno firme se podría determinar en qué lugar se produce una mayor influencia.

5) Desarrollo de un módulo experimental dentro de la ENM donde se instalarán distintos tipos de medidas de mitigación. Este proceso permitirá observar cual es la medida más efectiva dada las condiciones y la localización del terreno. Por consiguiente, con los resultados obtenidos se podrá actuar en consecuencia en aquellas zonas donde más concentrado se halle este gas.

6) Estudio del caudal de aire necesario para controlar las concentraciones de radón en un edificio. Se llevarán a cabo experimentos de distinto tipo como pudiera ser el cierre de algún tramo de ventilación, cortes de este sistema en algún despacho en el sistema de ventilación de alguna edificación. Se sugiere su realización en el despacho del edificio del CUD.

7) Investigaciones en otros arsenales y dependencias de la Armada para obtener las concentraciones de radón en dichos lugares. Para ello, se llevarán a cabo mediciones para observar si dichos establecimientos cumplen con las normativas con el fin de prevenir riesgos laborales para el personal que trabaje en dichos edificios.

8) Análisis físico-químico de la composición del subsuelo en la zona de estudio. De esta forma, será posible analizar los tipos de rocas presentes en este lugar y hallar su capacidad de exhalar gas radón.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] O.M.S, «Web de OMS Radon y efectos en la salud,» 30 Junio 2016. [En línea]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health. [Último acceso: 23 Diciembre 2020].

[2] U. de Concepción, «Web de tabla periódica de elementos,» [En línea]. Available: https://www.udt.cl/la-tabla-periodica-de-los-elementos-cumple-150-anos/. [Último acceso: 22 Diciembre 2020].

[3] O.M.S, «Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública,» 2015.

[4] B. Frutos Vázquez, «Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones Tesis Doctoral,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.

[5] J. Iglesias y A. Orozco, «Web de control y gestion de obras,» [En línea]. Available: https://controlygestiondeobras.es/gas-radon/. [Último acceso: 23 Diciembre 2020].

[6] C. de Seguridad Nuclear, «Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios,» Madrid, 2010.

[7] «Web de Info salus Gas radon puede suponer un problema de salud publica,» 31 Enero 2018. [En línea]. Available: https://www.infosalus.com/salud-investigacion/noticia-gas-radon-problema-salud-publica-puede-llegar-provocar-mas-muertes-accidentes-trafico-20180131141120.html. [Último acceso: 27 Diciembre 2020].

[8] O.M.S, «Web de la OMS El radón y sus efectos en la salud,» 2 Febrero 2021. [En línea]. Available: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health. [Último acceso: 1 Marzo 2021].

[9] M. de Trabajo y Asuntos Sociales, «NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud,» 1999.

[10] C. López Schlichting, «Web de cadena radio COPE,» 21 Febrero 2020. [En línea]. Available: https://www.cope.es/programas/fin-de-semana/noticias/radon-segunda-causa-del-cancer-pulmon-puede-estar-casa-20200221_627247. [Último acceso: 27 Diciembre 2020].

[11] B. Iglesias, «Web de La Región,» 13 Febrero 2020. [En línea]. Available: https://www.laregion.es/articulo/ourense/medidas-radon-seran-obligatorias-partir-verano/20200212224853925024.html. [Último acceso: 24 Diciembre 2020].

[12] C. Quian, « Web de La Voz de Galicia,» 18 Febrero 2020. [En línea]. Available: https://www.lavozdegalicia.es/noticia/coruna/2020/02/17/exigen-mediciones-gas-radon-edificios-xunta-coruna/00031581961181999781633.htm. [Último acceso: 24 Diciembre 2020].

[13] A. Alba Cabareño, «Web de Madrid Diario,» 9 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.madridiario.es/gas-radon-vecino-inevitable-comunidad-madrid. [Último acceso: 24 Diciembre 2020].

[14] «Web de world nuclear news,» 28 Septiembre 2020. [En línea]. Available: https://world-nuclear-news.org/Articles/EU-research-project-focuses-on-radon-and-NORM. [Último acceso: 31 Enero 2021].

[15] «Web de El Diario,» 21 Noviembre 2020. [En línea]. Available: https://www.eldiario.es/extremadura/sociedad/guia-informa-riesgos-gas-radon-viviendas-principales-causas-cancer-pulmon_1_6450419.html. [Último acceso: 24 Diciembre 2020].

[16] S. Lara, «Web de Diario de León,» 15 Diciembre 2020. [En línea]. Available: https://www.diariodeleon.es/articulo/sociedad/plan-gas-radon/202012150819242070002.html. [Último acceso: 24 Diciembre 2020].

[17] B. Lerten, «Web de KTVZ news channel,» 12 Enero 2021. [En línea]. Available: https://ktvz.com/health/2021/01/12/testing-homes-for-radon-gas-now-more-important-than-ever-oha-says/. [Último acceso: 31 Enero 2021].

[18] EURATOM, «Web de Directiva 2013/29/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013,» 2013. [En línea]. Available: https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf. [Último acceso: 1 Febrero 2021].

[19] CTE, «Web de Sección DB-HS-6 Protección frente a la exposición al radón,» 2019. [En línea]. Available: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/audienciainfopublica/recursos/proyecto_rd_anejo_iidbhs6.pdf. [Último acceso: 1 Febrero 2021].

[20] G. M. Yébenes, «Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar,» Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Marín, 2019.

[21] Á. García Denia, «Medición de la concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación,» Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Marín, 2020.

[22] A. Fernández Villar, «El mapa español de radón: Análisis de factores indicativos del riesgo de exposición al radón,» Santander, 2017.

[23] C. de Seguridad Nuclear, «Proyecto MANRA. Mapa de radiación gamma natural,» Madrid, 2000.

[24] J. Chen y K. L.Ford, «A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potencial in Canadian cities,» Journal of Enviromental Radioactivity, 2017.

[25] L. S. Quindós Poncela, «El radón, un gas radioactivo de orígen natural,» CSN, 1995.

[26] R. Coppens, «La radiactividad de las rocas,» 1963.

[27] C. Menor Salván, «La radiactividad natural y los minerales radiactivos».

[28] M. Neznal y M. Neznal, «The new method for assessing the radon risk of building sites,» Praga, 2004.

[29] M. García-Talavera San Miguel y F. J. López Acevedo, «INT-04.41 Cartografía del potencial de radón de España,» Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid.

[30] P. Linares Alemparte y S. García Ortega, «Guía rehabilitación frente al radón,» Ministerio de Ciencia e innovación, 2020.

[31] C. Nuccetelli, F. Leonard y R. Trevisi, «Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the european database analysis,» Journal of Enviromental Radioactivity, 2020.

[32] C. de la Construction Scientifique et Technique, «Le radon dans les habitations,» 1999.

[33] C. de Vivenda e Solo, «Decreto 262/2007, de 20 de diciembre por el que se aprueban las Normas do Hábitat Galego,» Xunta de Galicia, 2008.

[34] B. Collignan y E. Powaga, «Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration,» Journal of Enviromental Radioactivity, 2019.

[35] J. R.Milhelcic y M. T.Auer, «Ingeniería Ambiental,» 2011.

[36] C. Y.H.CHAO, «Influence of Ventilation on Indoor Radon Level,» Building and Enviroment, Hong Kong, 1997.

[37] CIEMAT, «Influencia de las condiciones meteorológicas en la variación anual de la actividad de Rn Ambiental,» Ministerio de Energía y competitividad, Madrid, 2015.

[38] A. Latham Robinson, «Radon Entry into Buildings: Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations and Building Structural Factors,» University of California, 1996.

[39] L. Neves, B. S.M y A. Pereira, «Indoor radon periodicities and their physical constrains: a study in the Coimbra region (Central Portugal),» Departament of Earth Sciences, University of Coimbra, Coimbra, 2009.

[40] W. Tsang y T. Narasimhan, «Effects of periodic atmospheric pressure variation on radon entry into buildings,» 1992.

[41] G. Mentes y I. Eper-Pápai, «Investigation of temperature and barometric pressure variation effects on radon concentration in the Sopronbánfalva Geodynamic Observatory,» Journal of Enviromental Radioactivity, Hungría, 2015.

[42] F.Kulali, I.Akkurt y N. Özgur, «The Effect of Meteorological Parameters on Radon Concentration in Soil Gas,» Acta Physica Polonica, Isparta, 2016.

[43] «Web de el tiempo,» 27 Agosto 2014. [En línea]. Available: https://www.tiempo.com/ram/95722/las-mareas-terrestres/. [Último acceso: 2 Febrero 2021].

[44] M. Barbeiro y M. Barbieri, «Diurnal and Semidiurnal Cyclity of Radon in Groundwater, Giardino Spring, Central Apennines, Italy,» 2018.

[45] R. Crockett, G. Gillmore y P. Phillips, «Tidal sychronity of built-enviroment radon levels in the UK,» Geophysical Research Letters, Northampton, 2006.

[46] A. Española, «La Escuela Naval Militar de Marín, 50 años, 1943-1993,» Marín, 1993.

[47] B. Pereira Rascado, «Estudio geotécnico en Alcalde Antonio Blanco, Marín, Pontevedra,» Marín, 2020.

[48] RadonEye, «Web de Manual de usuario RadonEyeRD200,» [En línea]. Available: http://radonftlab.com/wp-content/uploads/2016/download/(20160706)_OPERATION_MANUAL_%EC%98%81%EB%AC%B8(web).pdf. [Último acceso: 15 Enero 2021].

[49] ibutton, «Web de especificaciones de sensores de temperatura y humedad,» [En línea]. Available: https://ibutton.cl/product/datalogger-temperatura-humedad-hygrochron-ds1923/. [Último acceso: 20 Enero 2021].

[50] «Web de Meteo Galicia,» [En línea]. Available: https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action#. [Último acceso: 3 Enero 2021].

[51] I. Hidrográfico de la Marina, «Web del IHM,» [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/ihm/Aplicaciones/Mareas/puerto_mareas.html?puerto=28. [Último acceso: 7 Enero 2021].

[52] «Web de Calendario Lunar,» [En línea]. Available: https://www.vercalendario.info/es/luna/espana-mes-diciembre-2020.html. [Último acceso: 7 Febrero 2021].

[53] IGME, «Web de IGME Hoja 16 (Pontevedra) Mapa Geológico 200k,» 1971.

[54] Mármoles y granitos Izarri, «Web de Mármoles y granitos Izarri,» [En línea]. Available: https://izarri.es/granitos/. [Último acceso: 7 Febrero 2021].

[55] F. S. Ali, K. H.Mahdi y E. A.Jawad, «Humidity effect on diffusion and length coefficient of radon in soil and building materials,» Energy Procedia, 2019.

[56] IRPA, «Consideration Of Tidal Influences In Determining Measurement Periods When Monitoring Built-Enviroment Radon Levels,» Paris, 2006.

ANEXO I: GRÁFICAS DE LOS DISTINTOS MEDIDORES DE LA FASE DE MUESTREO

En el presente anexo se mostrarán las gráficas de los distintos medidores que se han empleado a lo largo de la fase de muestreo. Al igual que en la sección resultados, el eje vertical primario representa lo valores de concentración de radón (izquierda), en el eje horizontal primario se indica el tiempo en horas o días (abajo) y en el eje vertical secundario, las distintas variables en las que se ha analiza su relación con el radón (derecha).

Medidor ventana:

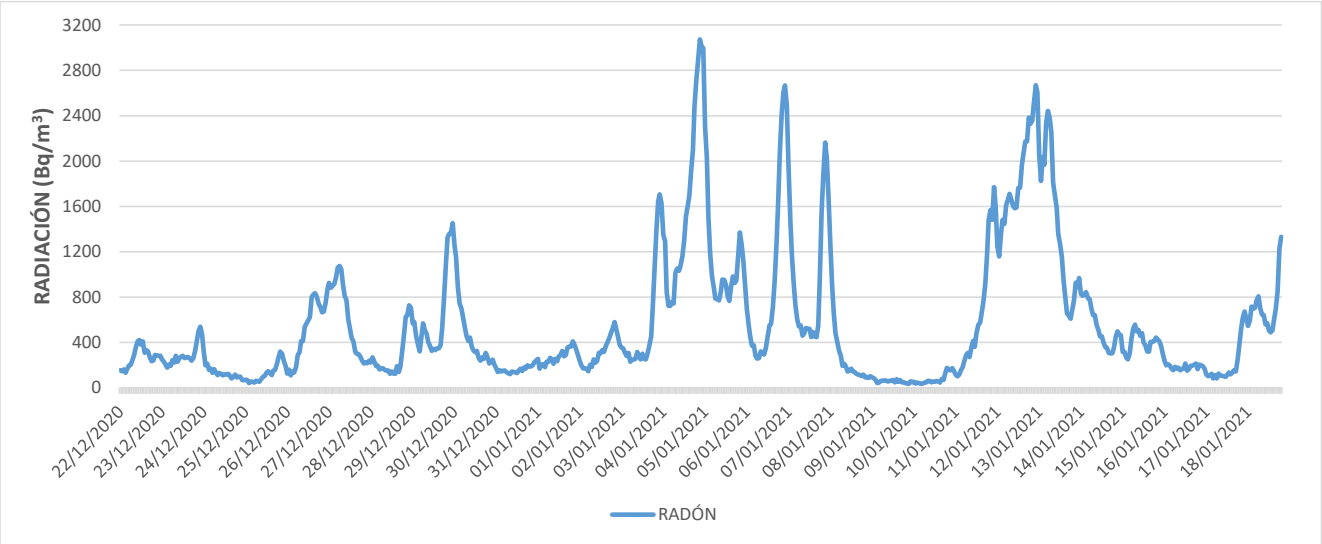


Figura A1-0-1 Concentración de radón medidor ventana (0,8 m)

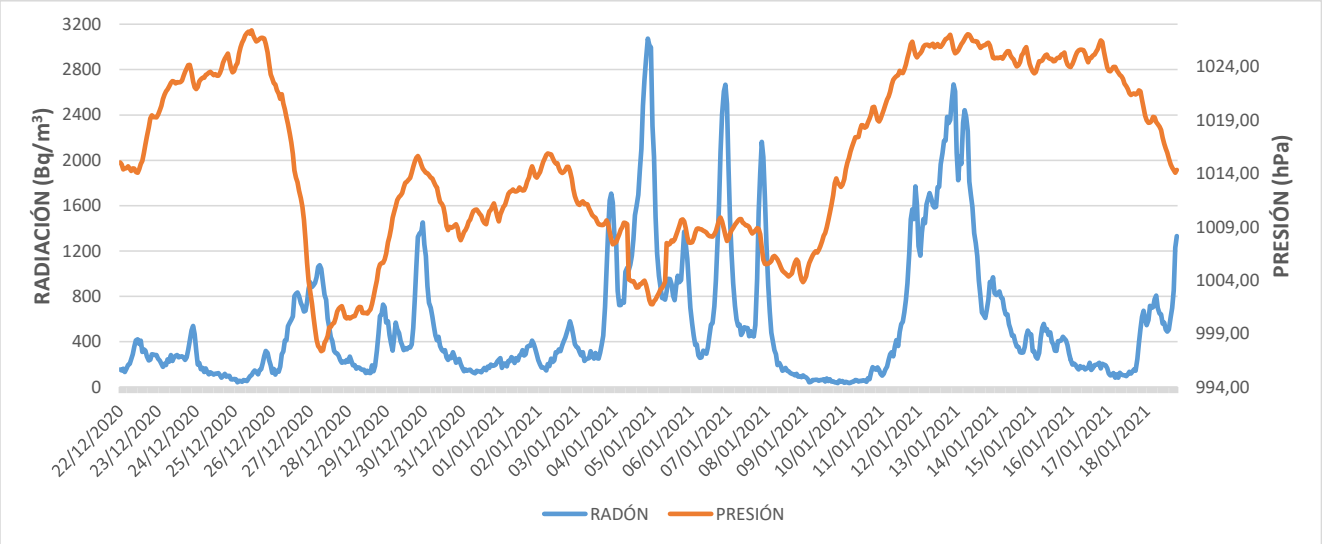


Figura A1-0-2 Radón-Presión atmosférica medidor ventana (0,8 m)

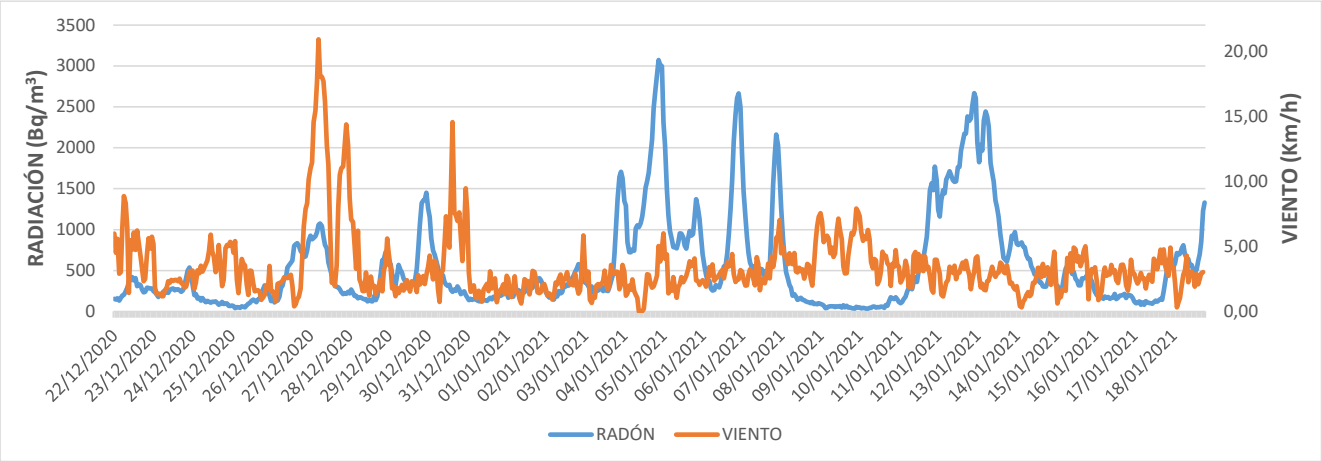


Figura A1-0-3 Radón-Viento medidor ventana (0,8 m)

Figura A1-0-4 Radón-Precipitaciones medidor ventana (0,8 m)

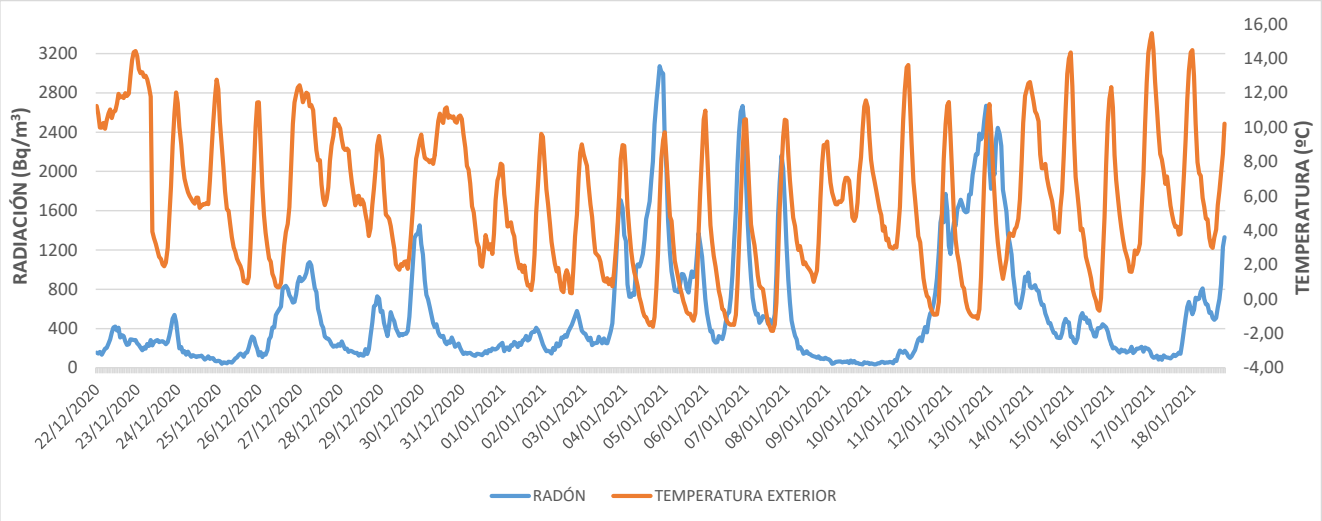


Figura A1-0-5 Radón-Temperatura exterior medidor ventana (0,8 m)

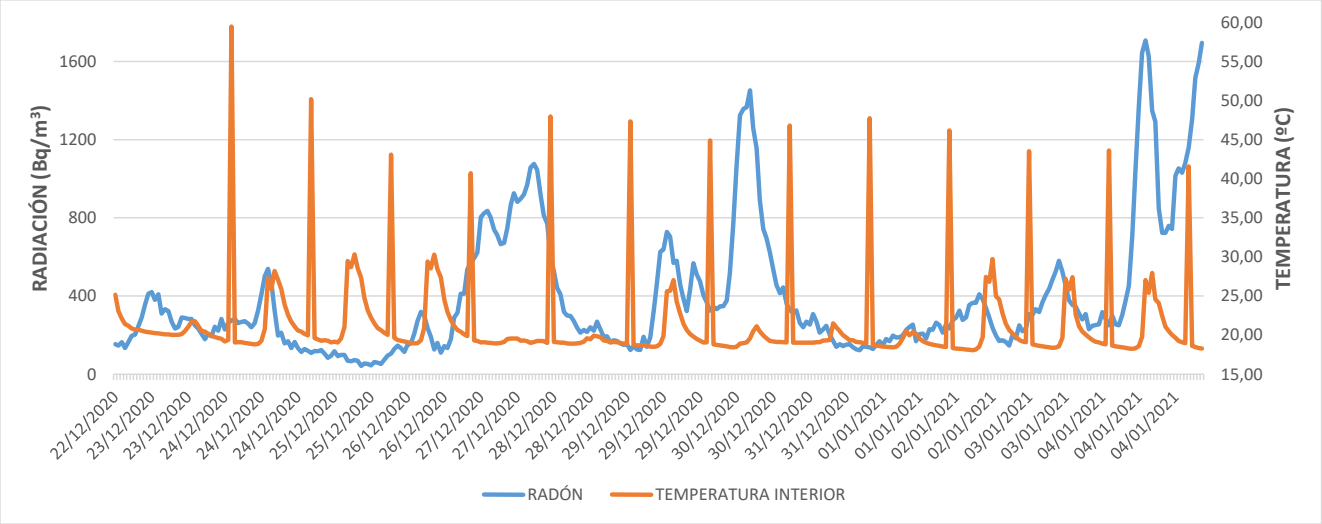


Figura A1-0-6 Radón-Temperatura interior medidor ventana (0,8 m)

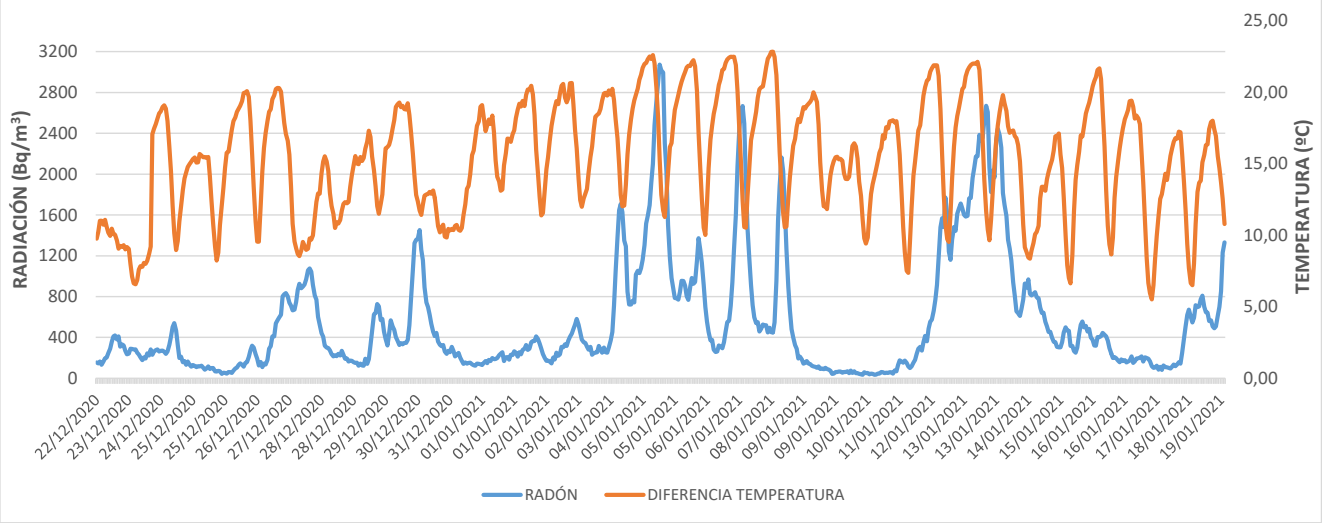


Figura A1-0-7 Radón-Diferencia temperatura medidor ventana (0,8 m)

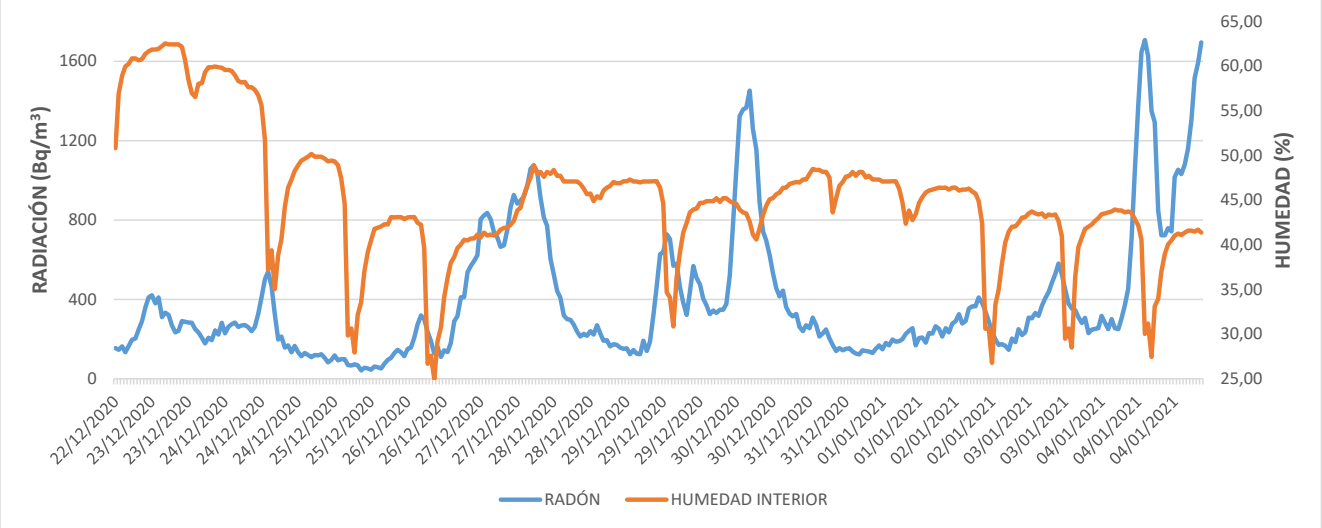


Figura A1-0-8 Radón-Humedad interior medidor ventana (0,8 m)

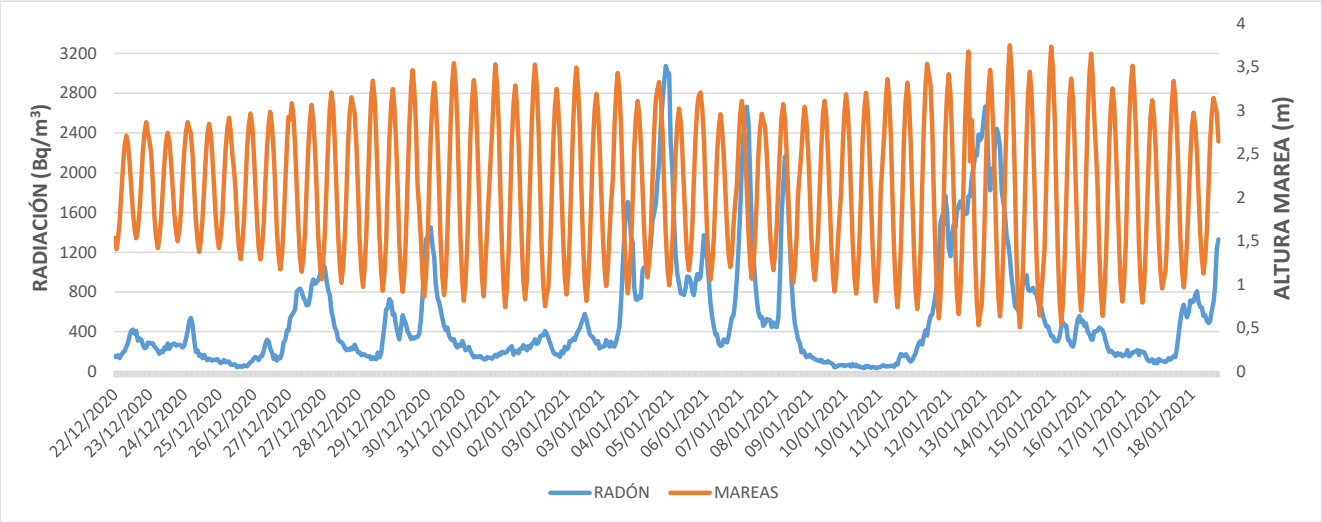


Figura A1-0-9 Radón-Mareas oceánicas medidor ventana (0,8 m)

Medidor puerta:

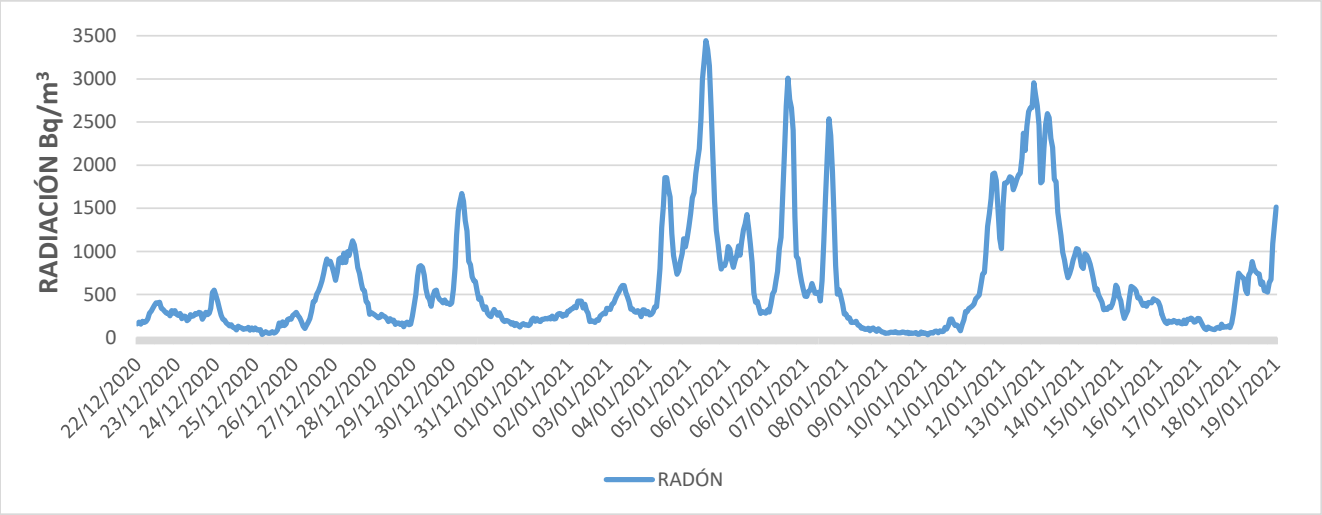


Figura A1-0-10 Concentración de radón medidor puerta (1 m)

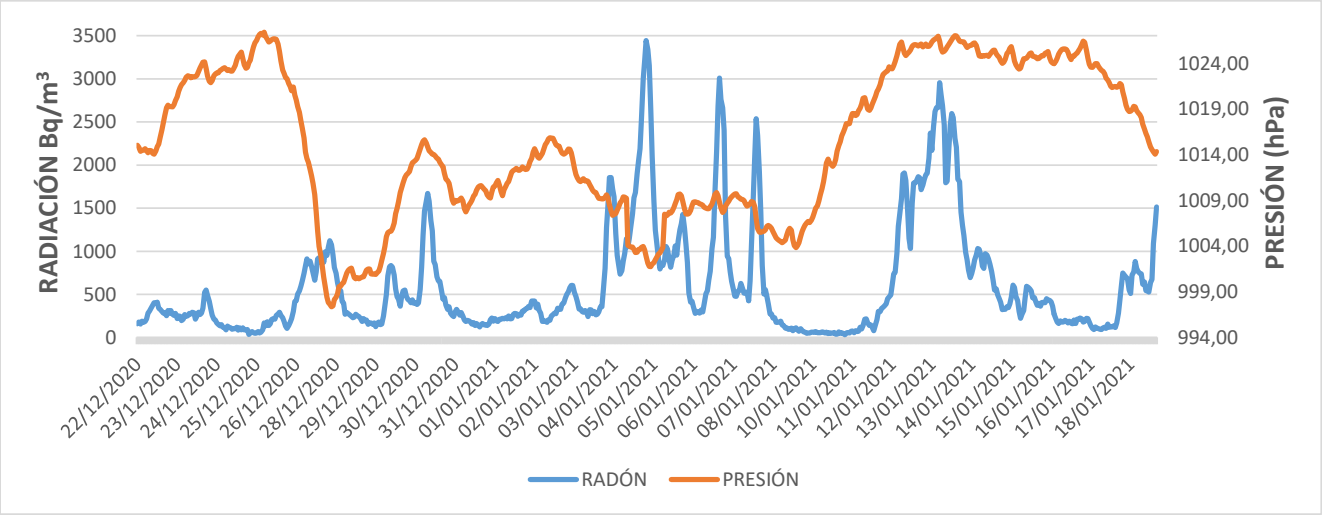


Figura A1-0-11 Radón-Presión atmosférica medidor puerta (1 m)

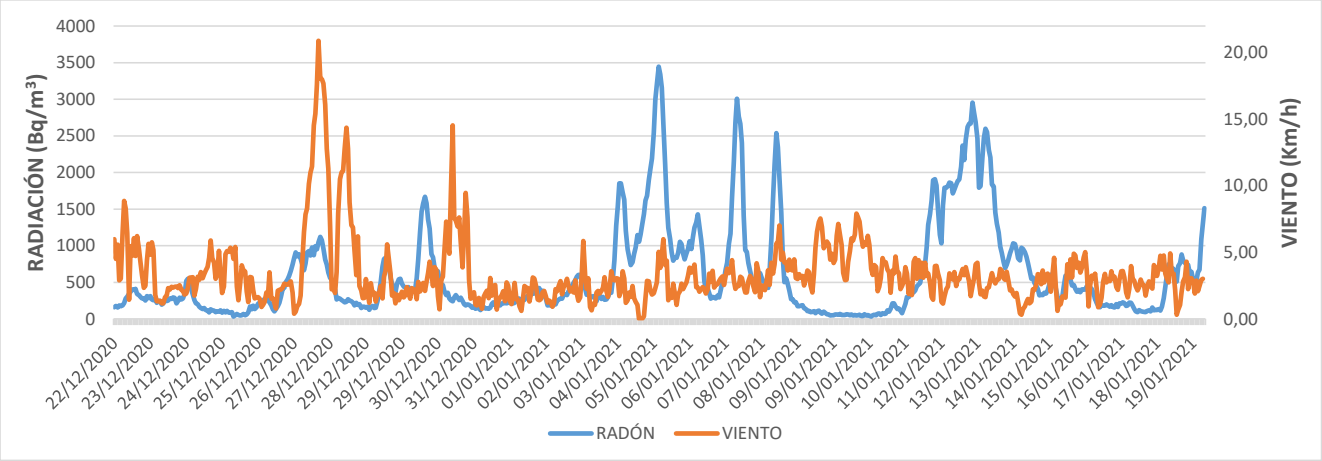


Figura A1-0-12 Radón-Viento medidor puerta (1 m)

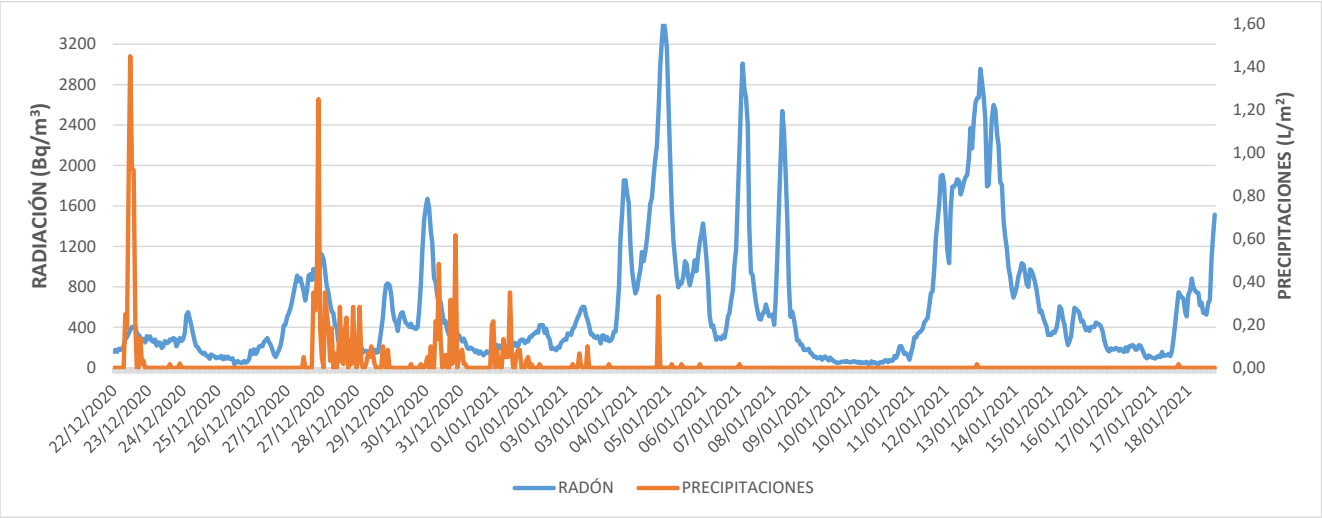


Figura A1-0-13 Radón-Precipitaciones medidor puerta (1 m)

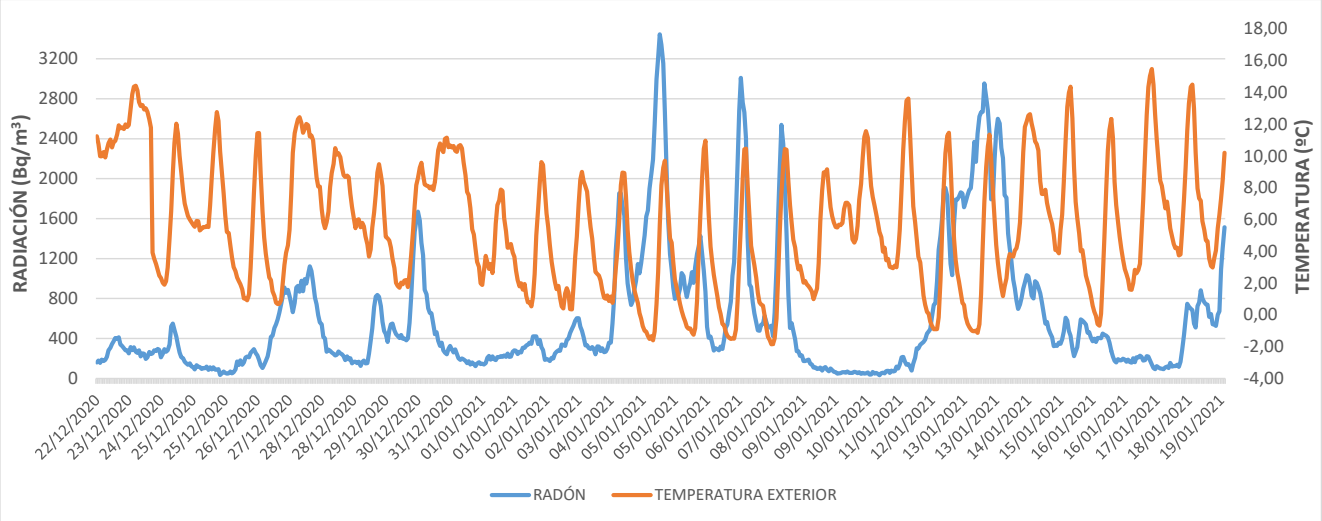


Figura A1-0-14 Radón-Temperatura exterior medidor puerta (1 m)

Medidor falso techo:

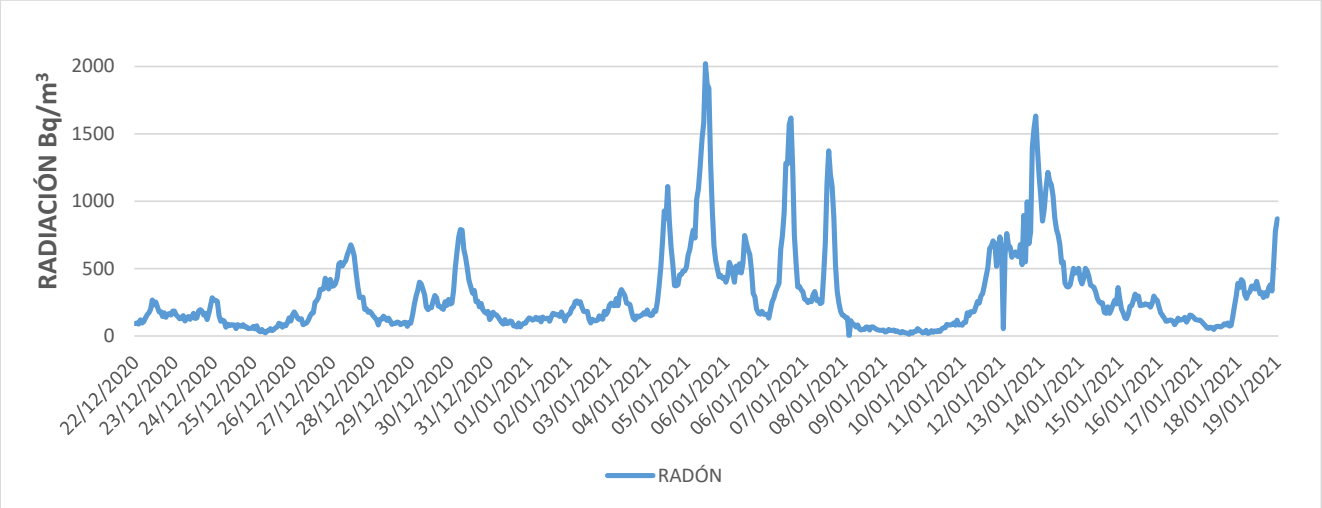


Figura A1-0-15 Concentración de radón medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m)

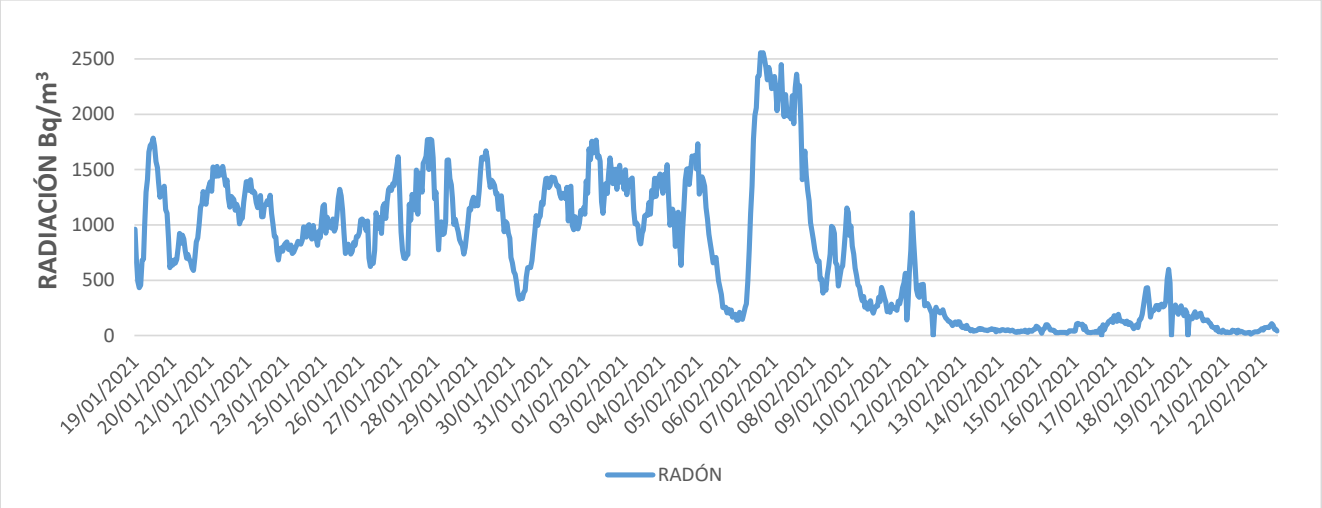


Figura A1-0-16 Concentración de radón medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m)

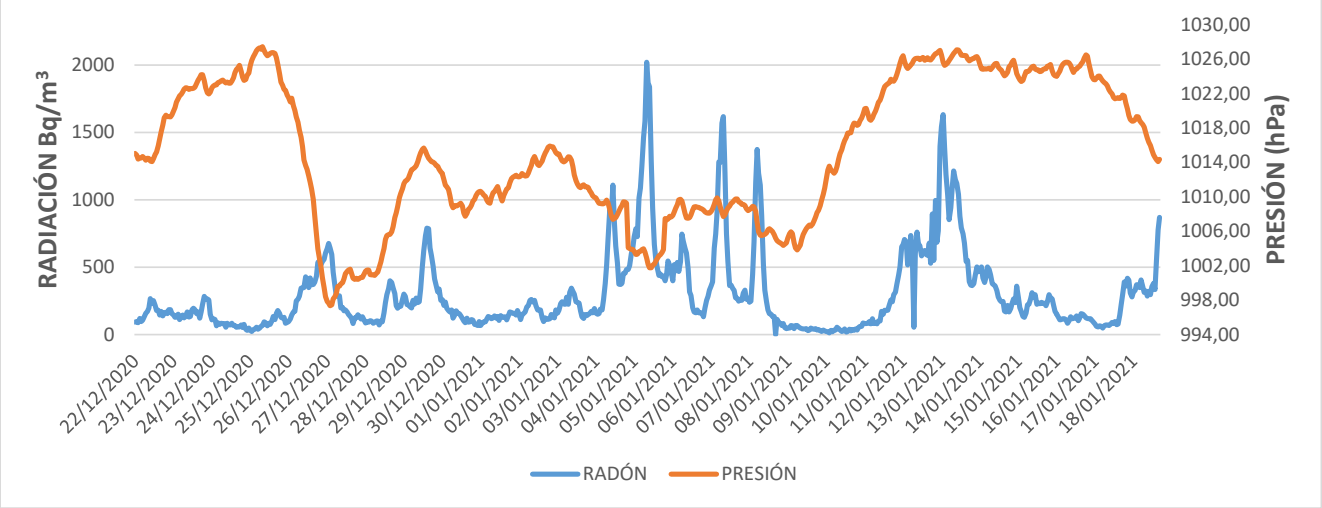


Figura A1-0-17 Radón-Presión atmosférica 22/12-18/01 medidor falso techo (3,75 m)

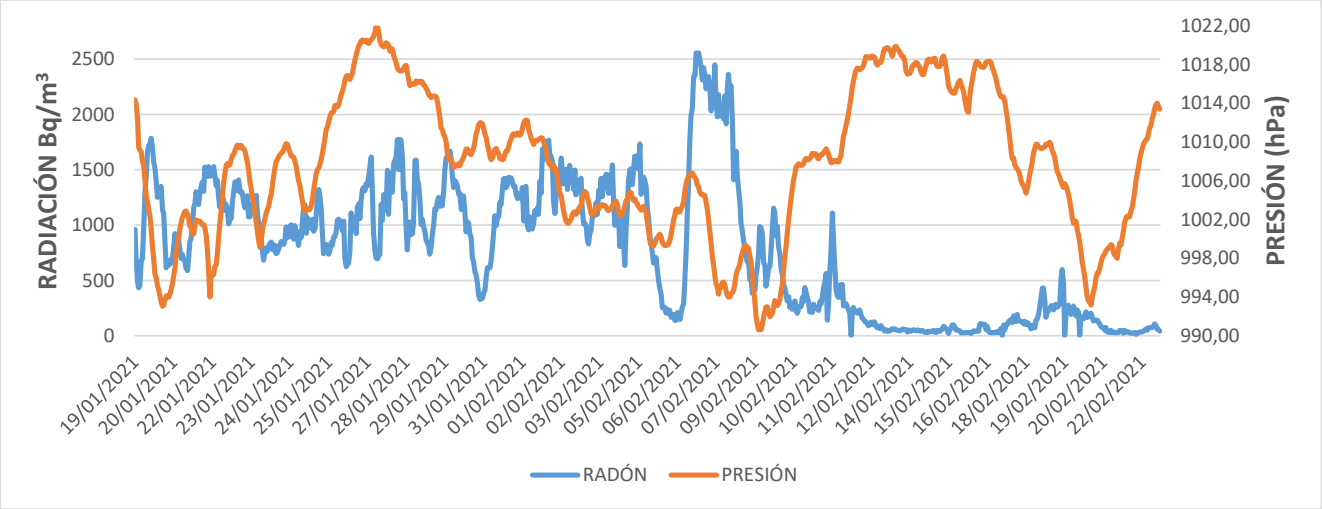


Figura A1-0-18 Radón-Presión atmosférica 19/01-22/02 medidor falso techo (3,75 m)

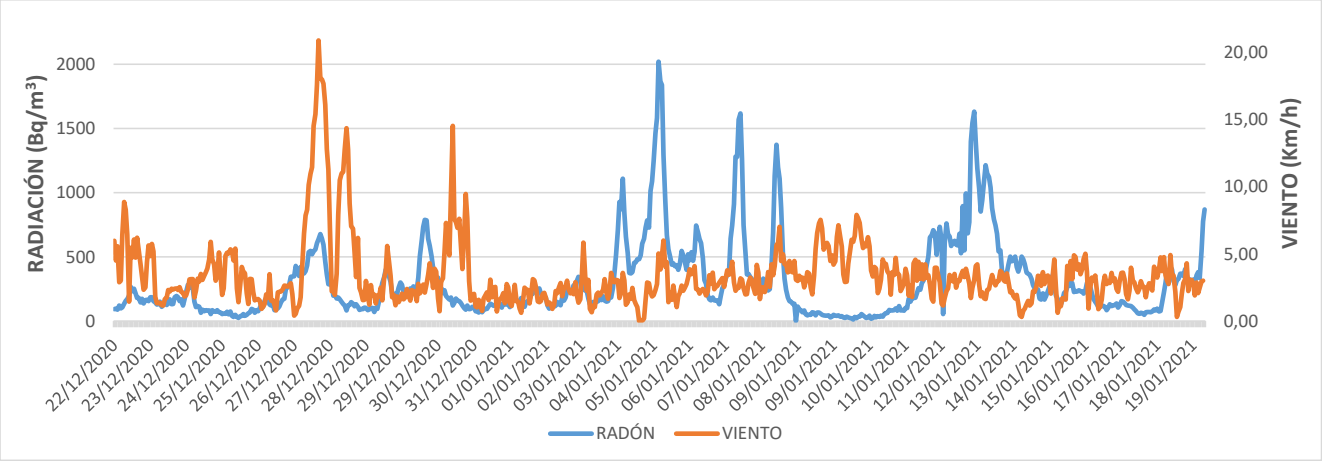


Figura A1-0-19 Radón-Viento medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m)

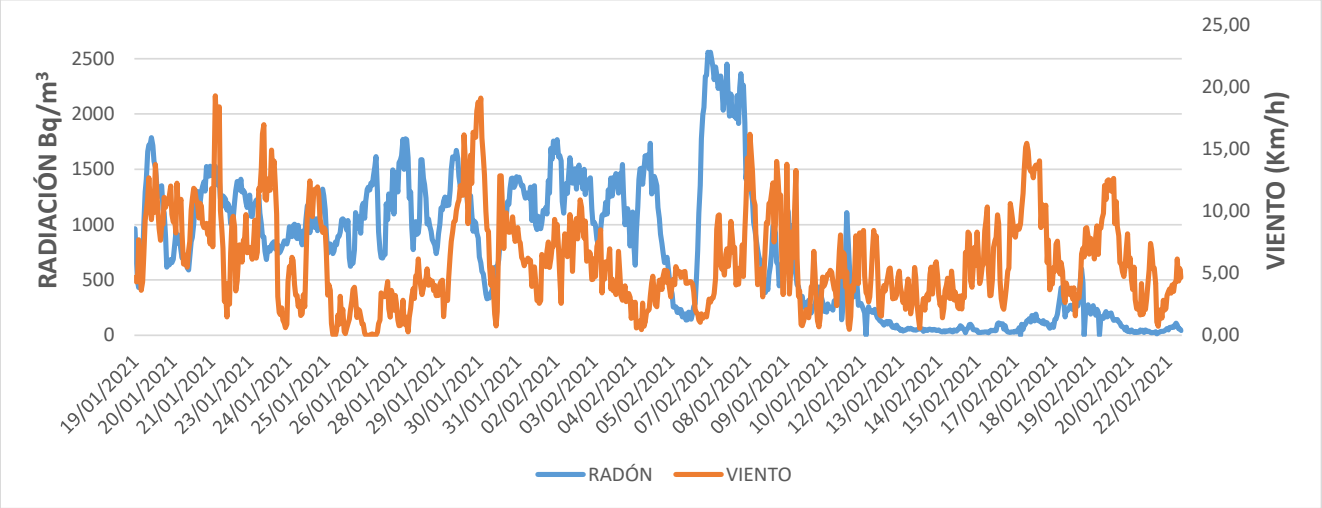


Figura A1-0-20 Radón-Viento medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m)

Figura A1-0-21 Radón-Precipitaciones medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m)

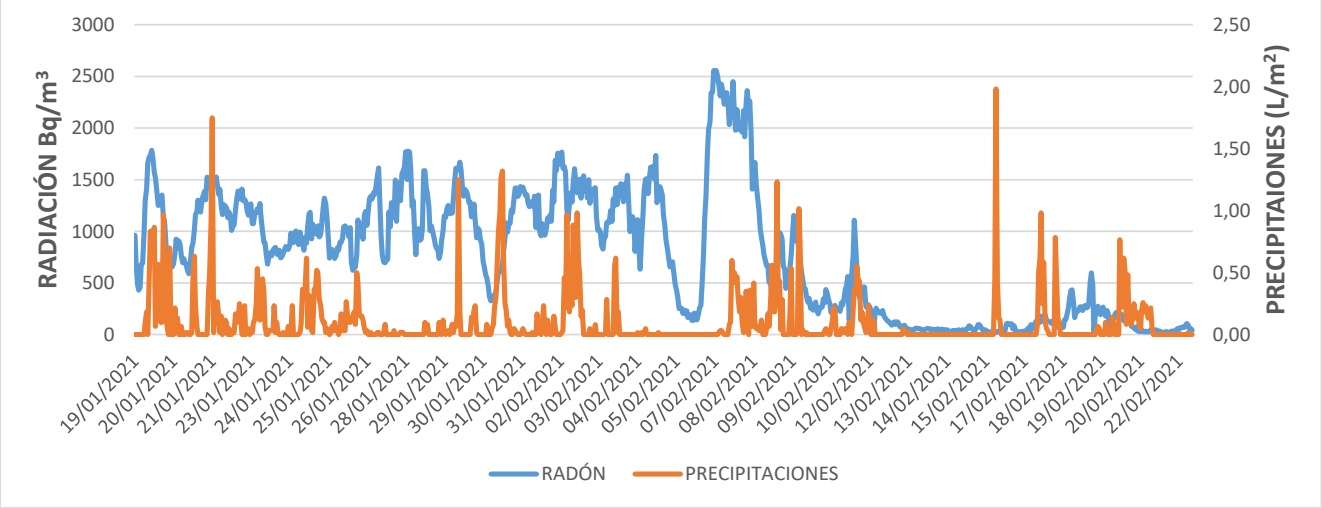


Figura A1-0-22 Radón-Precipitaciones medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m)

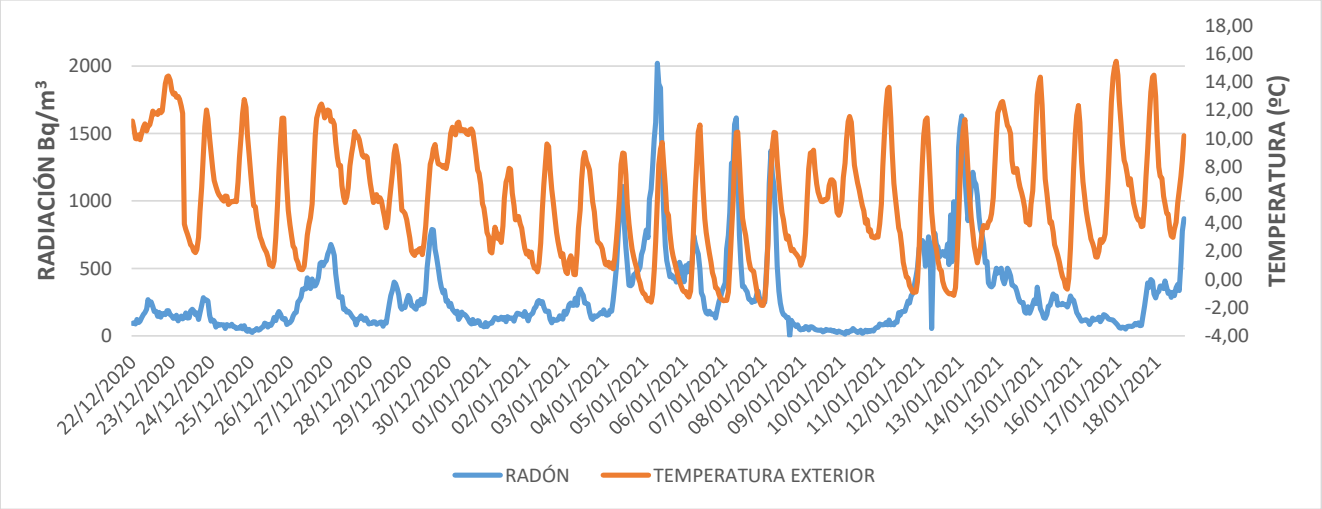


Figura A1-0-23 Radón-Temperatura exterior medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m)

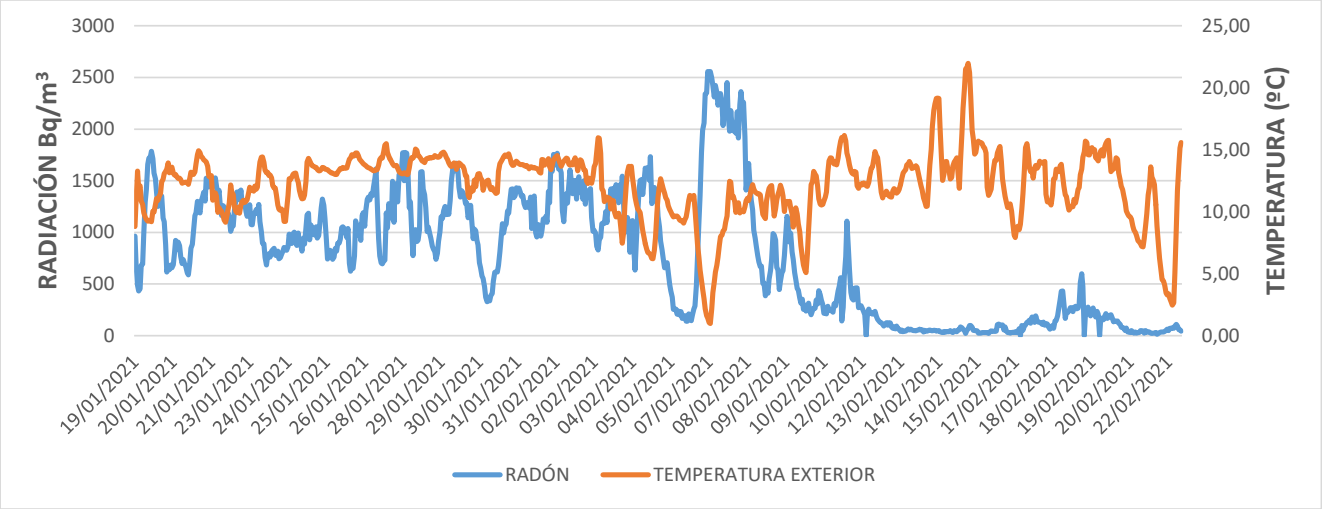


Figura A1-0-24 Radón-Temperatura exterior medidor falso techo 18/01-22/02 (3,75 m)

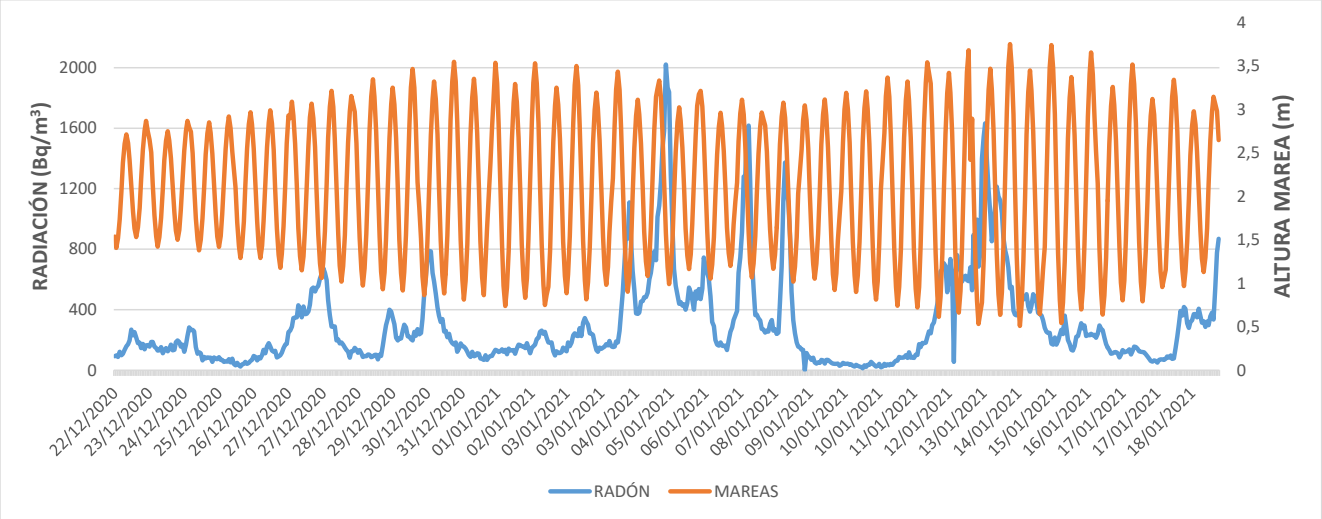


Figura A1-0-25 Radón-Mareas oceánicas medidor falso techo 22/12-18/01 (3,75 m)

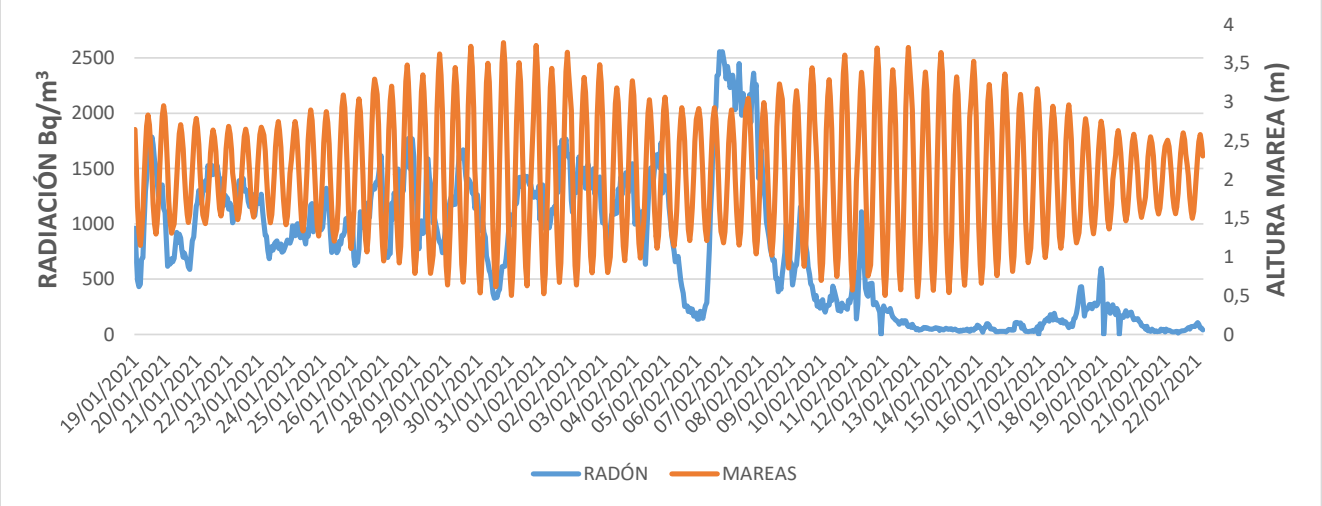


Figura A1-0-26 Radón-Mareas oceánicas medidor falso techo 19/01-22/02 (3,75 m)

Medidor central bajo:

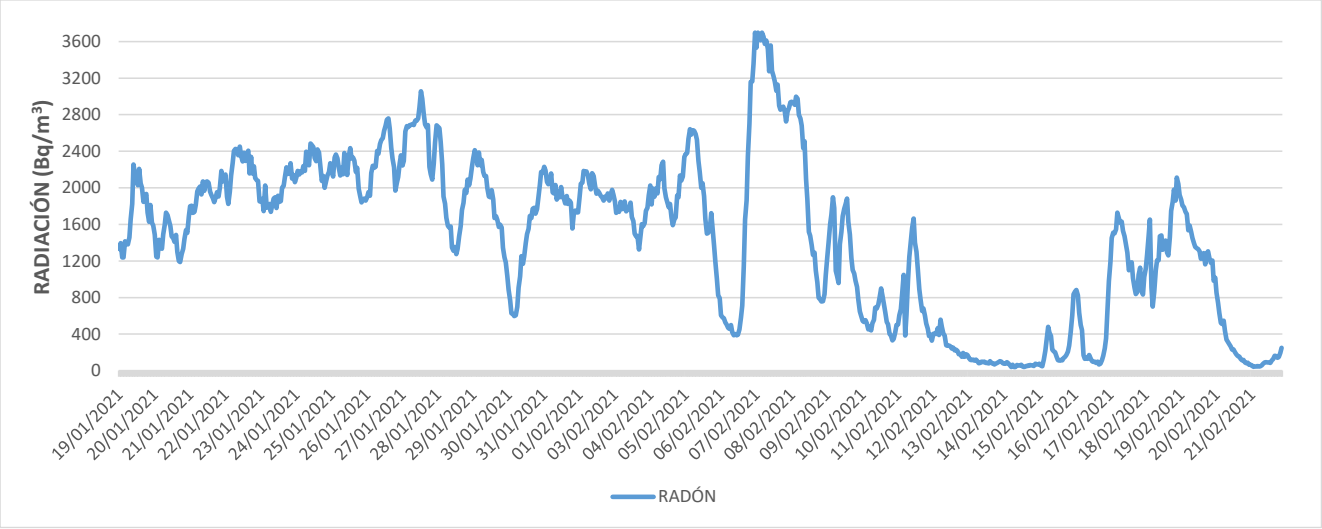


Figura A1-0-27 Concentración de radón medidor central bajo (0,45 m)

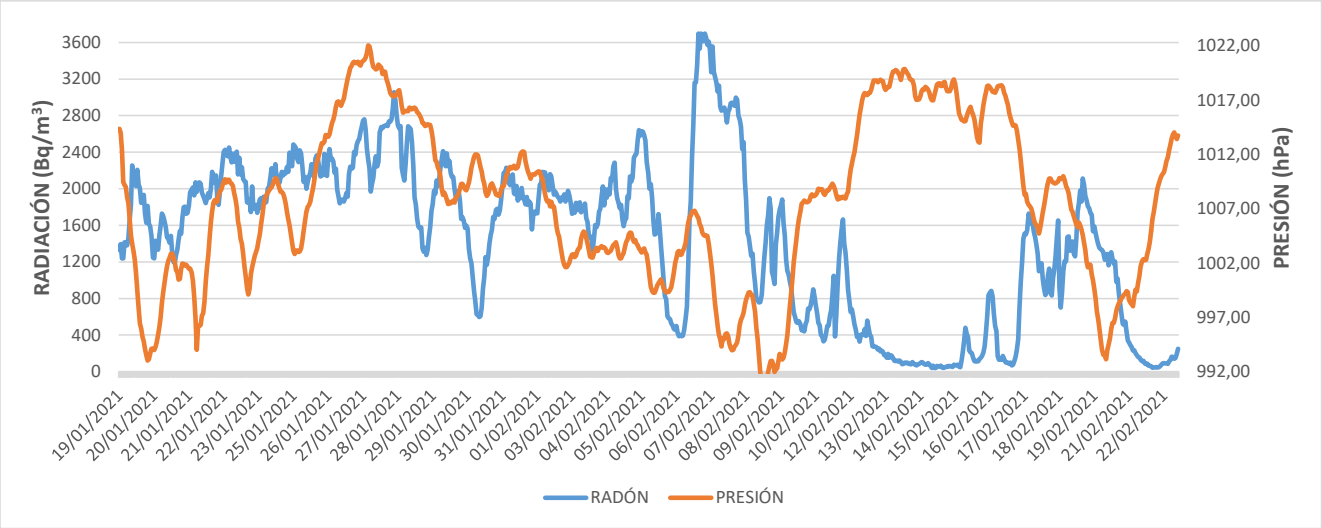


Figura A1-0-28 Radón-Presión atmosférica medidor central bajo (0,45 m)

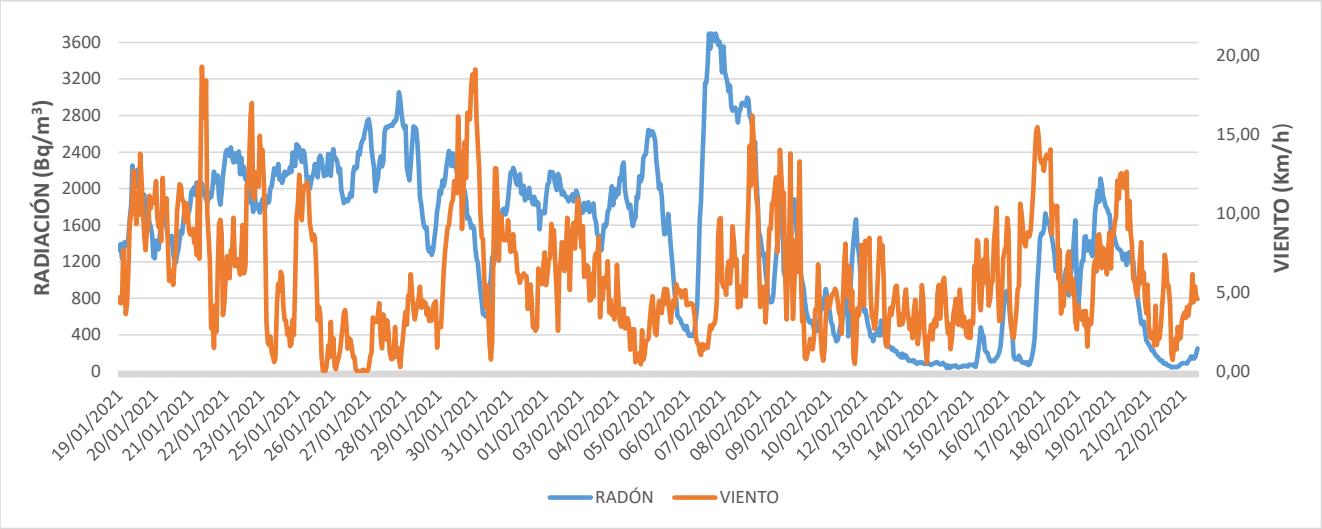


Figura A1-0-29 Radón-Viento medidor central bajo (0,45 m)

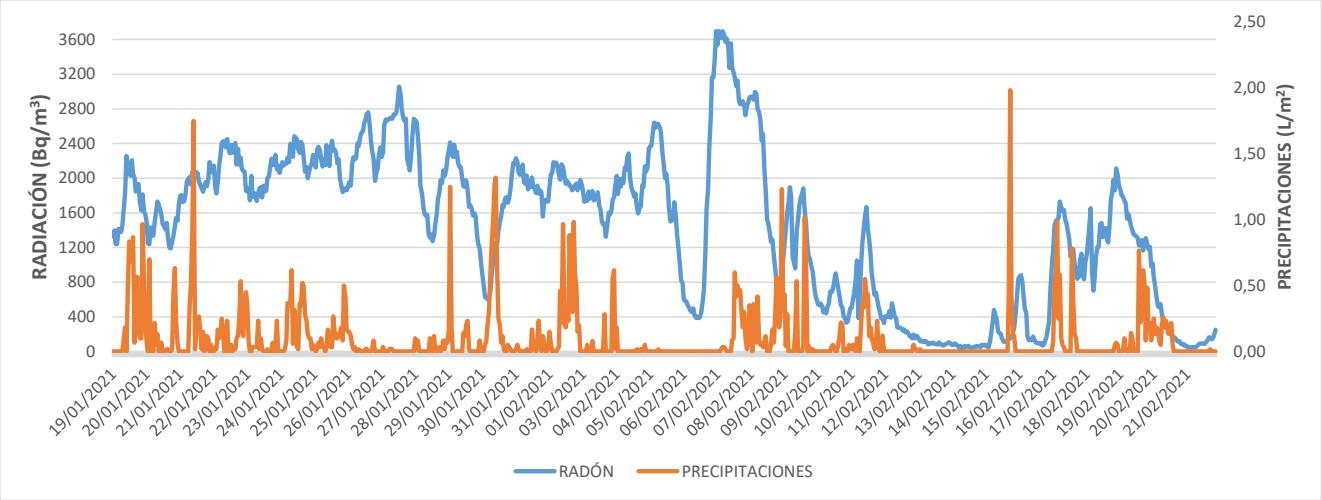


Figura A1-0-30 Radón-Precipitaciones medidor central bajo (0,45 m)

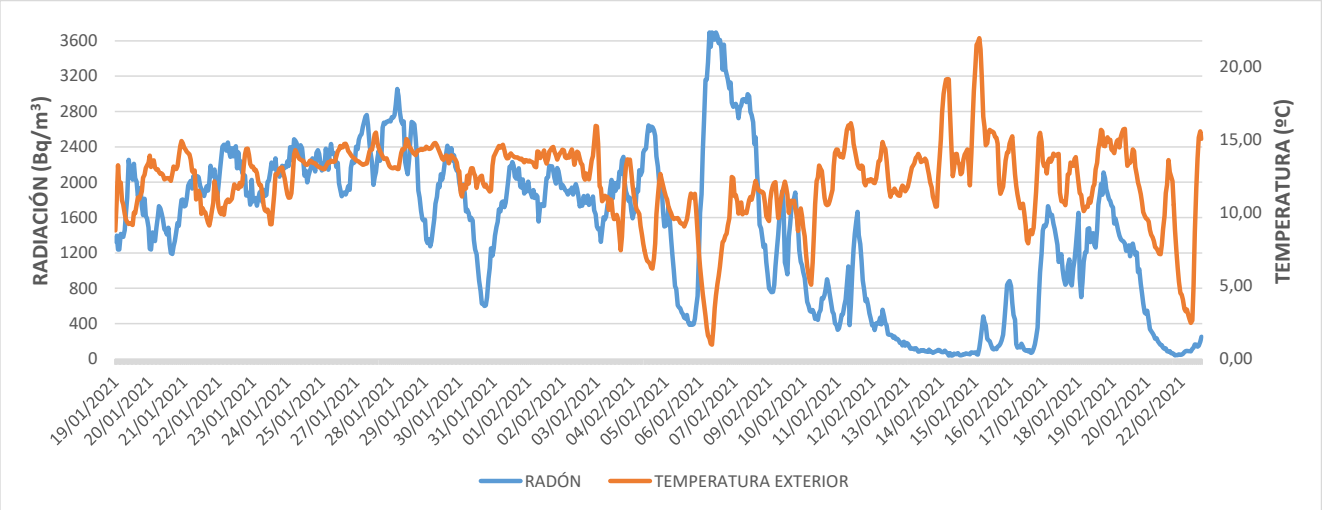


Figura A1-0-31 Radón-Temperatura exterior medidor central bajo (0,45 m)