



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización experimental del comportamiento del gas radón
en el interior de edificios*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Paula García Sobrido

DIRECTORES: Arturo González Gil
Antón Cacabelos Reyes

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización experimental del comportamiento del gas radón
en el interior de edificios*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El radón es un gas inerte presente en la vida cotidiana debido a que produce efectos perjudiciales en la salud. Por eso, es necesario establecer una ventilación idónea que permita eliminar la mayor cantidad posible de radón en el recinto y mantener a su vez el confort.

En el presente TFG, se ha analizado, mediante una medición en continuo, el comportamiento del gas radón en el despacho 114 del edificio del CUD-ENM, con el fin de determinar una ventilación óptima. Para ello, se necesita conocer su comportamiento en el interior del edificio, por lo que se estudian los cambios producidos en la concentración en el espacio-tiempo variando las condiciones de ventilación del local y la distribución en altura de los sensores utilizados.

Se concluye que los valores de radón en el despacho son elevados en ausencia de ventilación y que, gracias al encendido de ésta en sus diferentes configuraciones, se permite mantener estas concentraciones dentro del marco legal.

Con este TFG se progresa con la línea de investigación llevada a cabo en el CUD-ENM, permitiendo con estos datos, establecer una base que determine un modelo numérico que seleccione una ventilación adecuada en beneficio del ahorro energético y de las condiciones del personal.

PALABRAS CLAVE

Radón, Distribución de concentración, Ventilación, Optimización, Medición en continuo

AGRADECIMIENTOS

Con estas palabras por fin se cierra la etapa a bordo de la ENM. Fueron cinco años duros y exigentes a la par que instructivos. Es por este motivo por el que debo agradecer a mi familia por su gran apoyo, pero en especial a mi padre, ya que siempre ha sabido qué decir para no abandonar y gracias a él estoy hoy aquí.

En segundo lugar, dedicar una mención a mis tutores, Arturo y Antón, que siempre han sabido encauzar mi camino en este TFG y enseñarme de la mejor forma. Gracias a su insistencia y aplicación he podido abordar diferentes terrenos desconocidos para mí y finalizar con éxito las tareas impuestas en esta entrega.

También agradecer a mi pareja por su apoyo incondicional durante estos años formativos y por su ayuda, sobre todo en los momentos más grises de mi carrera. A mis amigos más cercanos, demostrándome que todo es posible si tienes al lado a personas que te aportan y, en especial, a Lucía y a Luana por ser mis compañeras de estudios y fatigas.

Por último, agradecer a la promoción 423-153 por hacerme el camino más fácil en esta escuela. Gracias a ellos, los momentos duros han sido más livianos.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Problemática del radón.....	7
1.2 Justificación	10
1.3 Objetivos	10
1.4 Metodología y planificación general.....	11
2 Estado del arte	12
2.1 Generalidades del gas radón	12
2.2 Factores meteorológicos que afectan a la concentración de gas radón.....	16
2.3 Técnicas para determinar la concentración de gas radón.....	17
2.3.1 Medición instantánea	17
2.3.2 Medición integrada	17
2.3.3 Medición en continuo	18
2.4 Marco normativo vigente	18
2.4.1 Directiva 2013/59/EURATOM	18
2.4.2 Manual de la OMS sobre el radón en interiores	18
2.4.3 Código Técnico de la Edificación.....	18
2.5 La importancia de la ventilación en la eliminación del gas radón	22
3 Materiales y métodos.....	24
3.1 Recinto en el que se realiza el TFG	24
3.2 Medidores de concentración de radón	28
3.3 Metodología realizada y toma de datos experimentales	30
4 Resultados	37
4.1 Análisis del plano suelo	37
4.1.1 Concentraciones relativas en régimen permanente.....	39
4.1.2 Régimen transitorio	42
4.2 Análisis del nivel 1.....	43
4.2.1 Concentraciones relativas en régimen permanente.....	44
4.2.2 Régimen transitorio	46
4.2.3 Apertura de ventanas	46
4.3 Análisis nivel 2.....	47

4.3.1 Concentraciones relativas en régimen permanente.....	49
4.3.2 Régimen transitorio	50
4.4 Análisis nivel 3 y nivel 4.....	50
4.4.1 Concentraciones relativas en régimen permanente.....	52
4.5 Análisis de la vertical	54
4.5.1 Concentraciones relativas en régimen permanente.....	55
5 Conclusiones y líneas futuras	57
5.1 Conclusiones	57
5.2 Líneas futuras	58
6 Bibliografía.....	59
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	64
Anexo III: Mapas de curvas obtenidos en las distintas etapas durante el muestreo.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 20 minutos. 15 de noviembre de 2022 [4]	8
Figura 1-2 El País. 28 de noviembre de 2019 [5]	8
Figura 1-3 Redacción Medica. 14 de octubre de 2022. Iván Fernández [6]	8
Figura 1-4 El Confidencial. 11 de enero de 2022. Eva González [7]	8
Figura 1-5 Fuentes de radiación de origen natural y artificial presentes en la Tierra [8]	9
Figura 1-6 Introducción del gas radón en el interior de una vivienda [12]	10
Figura 2-1 Cadena de desintegración del uranio [19]	12
Figura 2-2 Procedencia del gas radón (Autoría propia)	13
Figura 2-3 Mapa del dominio rocoso de España [24]	14
Figura 2-4 Mapa de exposición al radón [25]	14
Figura 2-5 Procesos de exhalación y emanación del gas [27]	15
Figura 2-6 Medidas de actuación en función de la zona geográfica [38]	19
Figura 2-7 Barrera de protección contra el radón situada por debajo de la solera [19]	20
Figura 2-8 Cámara de aire ventilada [19]	20
Figura 2-9 Despresurización del terreno [38]	21
Figura 2-10 Diagrama de flujo de las medidas preventivas para evitar concentraciones de radón (Autoría propia)	22
Figura 3-1 Imagen aérea de la Escuela Naval Militar [41]	24
Figura 3-2 Plano del Patio de Aulas de la ENM [42]	25
Figura 3-3 Representación del Despacho 114 (Autoría propia)	26
Figura 3-4 Plano del Despacho 114 en cm – Vista en planta (Autoría propia)	26
Figura 3-5 Tubo extractor de aire contaminado en el interior del Despacho 114	27
Figura 3-6 Salida del aire contaminado al exterior	27
Figura 3-7 Funcionamiento general del sistema de ventilación del despacho (Autoría propia)	28
Figura 3-8 Panel de control regulable del fancoil	28
Figura 3-9 RadonEyeRD200	29
Figura 3-10 Variación de concentración de gas radón en función del tiempo - Software Grafana	29
Figura 3-11 Plano del Despacho 114 con la referencia de los medidores (Autoría propia)	30
Figura 3-12 Ubicación de los sensores en el Despacho 114 (Autoría propia)	31
Figura 3-13 Disposición fija de los medidores verticales	32
Figura 3-14 Disposición de los medidores laterales variando su altura en el eje Z respecto a la vertical	32
Figura 3-15 Mediciones realizadas durante la fase experimental en las condiciones de ventilación prioritarias	33

Figura 3-16 Gráfico de los sensores en diferentes condiciones de ventilación indicando régimen transitorio y permanente.....	34
Figura 4-1 Periodo reseñable durante la primera toma de datos de la fase suelo.....	37
Figura 4-2 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos de la fase suelo	38
Figura 4-3 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel suelo	40
Figura 4-4 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel suelo	40
Figura 4-5 Concentraciones RadonEye37 para periodo con ventilación (UTA encendida)	41
Figura 4-6 Concentraciones RadonEye40 para periodo con ventilación (UTA encendida)	41
Figura 4-7 Valores de concentración frente al tiempo (h) con la UTA y la ventana abierta.....	42
Figura 4-8 Temperatura (°C) registrada frente al tiempo (h) del 18 de enero	43
Figura 4-9 Periodo reseñable durante la primera toma de datos del nivel 1	43
Figura 4-10 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos del nivel 1.....	44
Figura 4-11 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 1.....	45
Figura 4-12 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 1.....	45
Figura 4-13 Concentraciones RadonEye39 frente al RadonEye06 en condición sin ventilación. Nivel 1.....	46
Figura 4-14 Valores de concentración de radón frente al tiempo (h) con la ventana abierta y la UTA	47
Figura 4-15 Temperatura (°C) registrada durante el tiempo (h) que estuvo la ventana abierta en el nivel 1.....	47
Figura 4-16 Periodo reseñable durante la primera toma de datos del nivel 2	48
Figura 4-17 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos del nivel 2.....	48
Figura 4-18 Mapa de curvas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 2.....	49
Figura 4-19 Mapa de curvas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 2.....	50
Figura 4-20 Periodo reseñable durante la primera toma de datos en el nivel 3	51
Figura 4-21 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos en el nivel 4.....	51
Figura 4-22 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 3.....	52
Figura 4-23 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 3.....	53
Figura 4-24 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 4.....	54
Figura 4-25 Periodo significativo en la vertical durante el muestreo.....	54

Figura 4-26 Concentraciones RadonEye15 frente al RadonEye05 en condición con ventilación. Vertical.....	55
Figura 4-27 Concentraciones RadonEye15 frente al RadonEye05 con el fancoil en posición 3. Vertical.....	56
Figura 0-1 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel suelo	65
Figura 0-2 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel suelo	65
Figura 0-3 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 1.....	66
Figura 0-4 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 1.....	66
Figura 0-5 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 2.....	67
Figura 0-6 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 2.....	67
Figura 0-7 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 3.....	68
Figura 0-8 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 3.....	68
Figura 0-9 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 4.....	69
Figura 0-10 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 4.....	69
Figura 0-11 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 4.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de concentración de radón en balnearios españoles [30]	16
Tabla 2 Concentraciones medias de la segunda toma de datos en Bq/m ³ durante el nivel suelo.....	38
Tabla 3 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en el nivel suelo	39
Tabla 4 Velocidades de la primera arrancada/bajada de cada sensor en Bq/m ³ *h.....	42
Tabla 5 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en el nivel 1	44
Tabla 6 Velocidades de arrancada y bajada pertenecientes al nivel 1.....	46
Tabla 7 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en el nivel 2.....	49
Tabla 8 Velocidades de arrancada y bajada pertenecientes al nivel 2.....	50
Tabla 9 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en el nivel 3.....	52
Tabla 10 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en el nivel 4.....	53
Tabla 11 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m ³ en la vertical	55

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Problemática del radón

Cuando llega el momento de adquirir una vivienda se tienen en cuenta diferentes factores como las dimensiones, la ubicación, el precio, etc. Sin embargo, en los últimos años surge la preocupación de a cuanto nivel de radón está expuesto el hogar. Esto se debe a que el radón es un gas radioactivo que proviene mayormente de la corteza terrestre, por lo que está presente en mayor o menor concentración en todos los suelos en función del lugar geográfico en el que se ubique la vivienda. Se trata de un gas que puede llegar a ser muy peligroso debido a que no se puede ver ni oler por lo que las personas no son realmente conscientes de que están expuestas a esa fuente de radiación. El radón se desintegra naturalmente en otras partículas radioactivas, que si son inhaladas (en el momento de esa desintegración) por el ser humano durante un largo periodo de tiempo pueden dañar las células pulmonares y en algunos casos provocar cáncer [1].

A lo largo de los años se ha estado indagando sobre la relación existente entre el cáncer de pulmón y la exposición al gas radón. De hecho, esta preocupación surge entre los años 1950 y 1960, llegando finalmente a la conclusión de que las personas más propensas a sufrir esta enfermedad son las que trabajan de forma subterránea como los mineros o los que están expuestos a diferentes sustancias de las que deriva el radón como los fertilizantes de fosfato, los cuales contienen radio. No obstante, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) afirma que actualmente el radón es la segunda causa de muerte por esta enfermedad causando alrededor de 21.000 muertes al año, siendo la principal causa el tabaco. Además, diversos estudios realizados a múltiples colectivos expuestos de distintas maneras al gas, han demostrado que el riesgo de sufrir cáncer es mayor en personas fumadoras o que fumaron [1] [2].

A pesar de que el radón es un elemento de gran importancia en la vida cotidiana, la población no está suficientemente concienciada con los peligros que puede suponer la exposición a este gas. Sin embargo, está ganando auge en estos últimos años hasta el punto de que se ha decretado un día Europeo del Radón, el cual se celebra cada 7 de noviembre con la finalidad de aumentar la concienciación social [3]. Además, son muchos los organismos preocupados por legislar la exposición del radón. Es por ello, que se establecieron diversas normativas para controlar y establecer unos valores legales de concentración de este gas en el interior de los edificios. Cada vez son más los medios que se suman a esta preocupación y alertan sobre la importancia y peligrosidad de este factor. Aunque es una problemática que lleva varios años en la sociedad, no es hasta hace pocos años cuando se empiezan a ver noticias informando sobre las causas y efectos de este gas. A continuación, se muestran algunos ejemplos (Ver desde la Figura 1-1 a la Figura 1-4):

El motivo por el que aumenta el cáncer de pulmón en mujeres no fumadoras

20MINUTOS/ NOTICIA / 15.11.2022 - 11:49H



- ¿Cuándo una mujer con cáncer de mama no necesita someterse a quimioterapia?

Figura 1-1 20 minutos. 15 de noviembre de 2022 [4]

La UE expedienta a España por no aprobar la normativa sobre el gas radón

Este gas es la mayor fuente de radiación natural que afecta al hombre y es un factor de riesgo para el cáncer de pulmón

Figura 1-2 El País. 28 de noviembre de 2019 [5]

El control de España sobre el radón llega "tarde" y sin plan nacional

El Gobierno ultima un real decreto que podría estar aprobado antes de final de año

Figura 1-3 Redacción Medica. 14 de octubre de 2022. Iván Fernández [6]

SIGUE SIENDO EL GRAN DESCONOCIDO

La lucha contra el gas radón sigue siendo la asignatura pendiente

Figura 1-4 El Confidencial. 11 de enero de 2022. Eva González [7]

En el titular de la noticia mostrada en la Figura 1-2, se puede observar que la Unión Europea impone una sanción a España. Esto se debe a que la UE estableció una normativa en 2013 en la que se instaba a los estados miembros a establecer unos valores de referencia de concentración del gas, dejándoles libertad para fijar ese valor, siempre y cuando no superase los 300 Bq/m³. La UE decretó un plazo de tiempo para que los países se adaptaran a esta situación y pudiesen imponer las medidas en cada territorio. Sin embargo, finalizado este plazo, en 2018 España todavía seguía sin fijar su valor. Por tanto, la Unión Europea le abrió un expediente por no adaptarse a su normativa. No es hasta 2019 cuando se pone arreglo a la situación y se modifica el Código Técnico de la Edificación (CTE), fijando como valor máximo permitido de concentración 300 Bq/m³ [7].

Pese a que hay personas más expuestas al radón, todo el mundo está en contacto con el gas, ya que es la principal fuente de radiación natural existente a la que está expuesto el ser humano. Como se puede ver en la Figura 1-5 [8], se pueden distinguir dos tipos de radiaciones con las que están en contacto las

personas: las de origen natural y las artificiales. Las de origen natural comprenden en mayor parte el gas radón, las radiaciones cósmicas, las radiaciones del torón, las radiaciones que provienen de suelos o edificios y las que provienen de alimentos o bebidas. Las de origen artificial comprenden las radiaciones empleadas para usos médicos y en proporción casi nula la que procede de lluvias o vertidos [8].

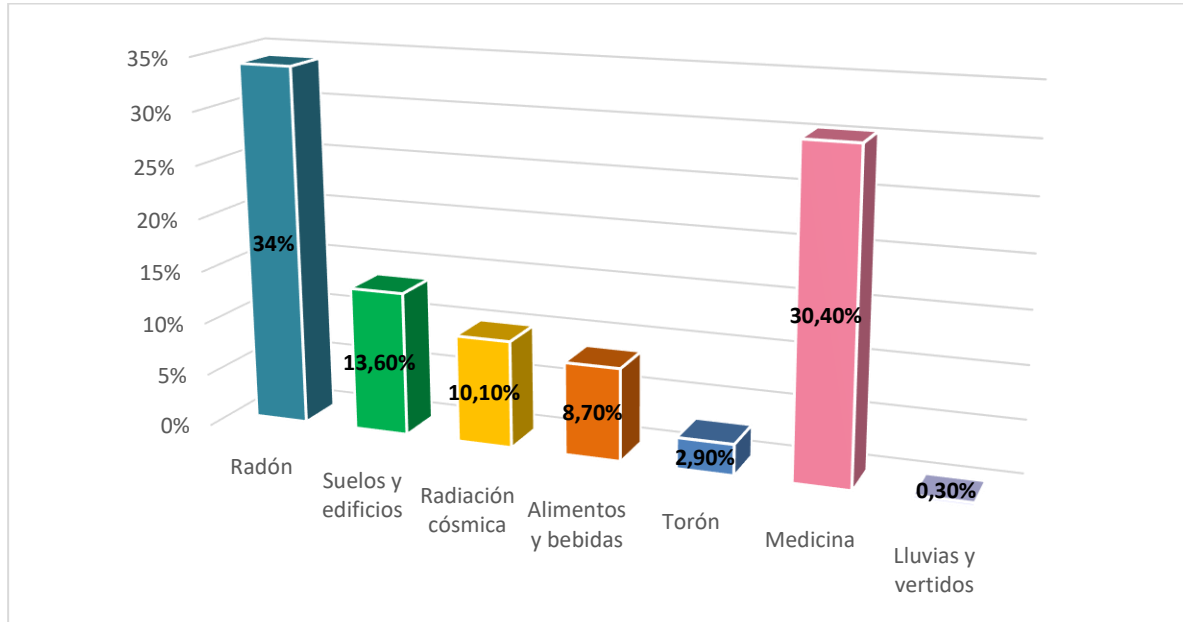


Figura 1-5 Fuentes de radiación de origen natural y artificial presentes en la Tierra [8]

El radón, al surgir de la corteza terrestre, emana del suelo para entrar en contacto con la atmósfera e introducirse en los edificios a través de grietas, fisuras, juntas en el suelo o por aguas subterráneas o materiales de construcción. Se encuentra en mayor concentración en las plantas bajas de las edificaciones como en sótanos, ya que se trata de un gas que es nueve veces más pesado que el aire y las plantas bajas se encuentran más próximas al terreno que es la principal fuente de radón [9]. En el aire exterior la presencia es muy baja, ya que la proporción de aire es mucho mayor en comparación con el volumen de aire que contiene un edificio [10]. Para determinar la actividad radiológica del radón la unidad de medida que se utiliza comúnmente es el Becquerel por metro cúbico (Bq/m^3) para determinar la concentración del gas en el aire del interior del edificio [11].

En la Figura 1-6, se muestra un ejemplo de los posibles accesos del gas radón al interior de una edificación, en concreto a una vivienda. Aunque el gas se encuentre en mayor proporción en las plantas bajas, eso no implica que no pueda llegar a plantas superiores a través de conductos como las cañerías.

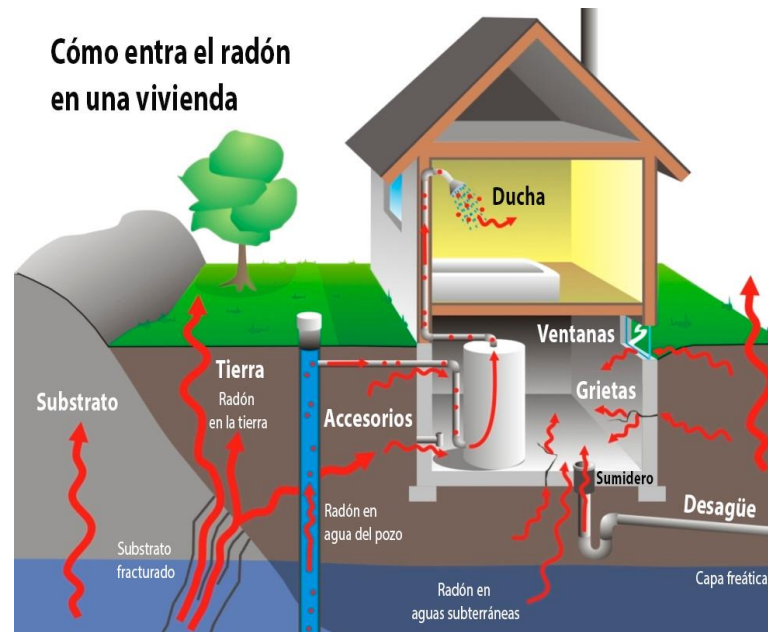


Figura 1-6 Introducción del gas radón en el interior de una vivienda [12]

1.2 Justificación

La problemática del radón no es un factor indiferente para la Escuela Naval Militar (ENM), ya que se han realizado diversos estudios que abordan este tema. En primer lugar, en 2019 se ha efectuado un análisis preliminar de la presencia de radón en edificios de la ENM [13]. En 2020, se procede a realizar una medición de concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM) y una propuesta de medidas de mitigación [14]. Al año siguiente, se realiza una evaluación de los factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores [11]. En 2022, se realiza un análisis matemático de las variables geofísicas que afectan a la concentración de radón en el interior de la ENM [15] y una evaluación experimental de un sistema de ventilación controlada para minimizar la concentración de radón en un despacho del CUD-ENM [16]. Además, en ese mismo año, se efectúa un análisis con el fin de determinar los principales focos de inmisión de gas radón en despachos de la planta baja del CUD-ENM [17].

A causa de los estudios anteriormente mencionados, se ha contrastado que en el edificio del CUD-ENM existen niveles altos de concentración de radón y que está ubicado en una zona geográfica de potencial riesgo. Es por ello que se continúa con la línea de investigación, permitiendo analizar el comportamiento del radón en el interior de un recinto con el fin de contribuir a la obtención de un modelo numérico que permita optimizar el uso de la ventilación.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es determinar, de manera experimental, la distribución de radón en el espacio-tiempo en el despacho 114 de la planta baja del CUD-ENM. Para lograrlo, se establecen los siguientes objetivos:

- ✓ Evaluar la influencia de las condiciones de ventilación con el fin de determinar si se cumple la normativa vigente.
- ✓ Realizar un estudio inicial realizando una agrupación de datos que permita analizar el comportamiento del gas radón en diferentes planos.
- ✓ Corroborar que en el suelo se cumplen los focos de inmisión establecidos en el TFG *“Caracterización de los principales focos de inmisión de gas radón en despachos de la planta baja del CUD”* [17], utilizando una metodología diferente.

- ✓ Realización de un estudio del comportamiento del gas radón en el interior del despacho, modificando variables como la ventilación o la altura de los sensores utilizados durante el TFG.

1.4 Metodología y planificación general

El siguiente apartado es una guía en la que se especifica la estructura llevada a cabo en el presente Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, tras efectuar una búsqueda de información sobre la temática a abordar, se presenta una breve introducción sobre las características del objeto de estudio, los factores meteorológicos por los que se ve influenciado y las técnicas de medición. Además, se describe la normativa vigente que afecta a nuestro país y a la Unión Europea. En el Capítulo 2 aparece reflejada esta información.

Seguidamente, se realiza una descripción del emplazamiento de las mediciones, el despacho 114 de la planta baja del CUD-ENM, así como de los equipos de medida empleados y los materiales necesarios para elaborar la investigación. Todo el proceso aparece reflejado en el Capítulo 3 del presente trabajo.

Posteriormente se ha realizado un análisis experimental sobre el comportamiento del gas variando características como la ventilación o la altura a la que estaban dispuestos los equipos de medición. Los resultados obtenidos durante el muestreo se muestran en el Capítulo 4.

En el Capítulo 5, se obtienen unas conclusiones a partir de los datos presentados en el anterior capítulo. También se proponen líneas futuras con el fin de continuar con la investigación.

Finalmente, en el Capítulo 6 se muestra la documentación utilizada para la elaboración del presente TFG y continuando a la bibliografía, se encuentran los anexos complementarios que contienen información útil para la comprensión de esta investigación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades del gas radón

El radón es el elemento químico más pesado perteneciente a la familia de los gases nobles, por lo que destaca por tener una estructura atómica muy estable [18]. Es un gas radioactivo que surge como resultado de la desintegración del radio, elemento que proviene de la desintegración natural del uranio, procedente en su mayor parte de las rocas de la corteza terrestre. En la naturaleza, el radio se puede encontrar en forma de tres isótopos (torio, actinio y radio). A su vez, el radón tiene dos isótopos, el radón (Rn 222) y el torón (Rn 220). El isótopo al que se hará referencia será el Rn 222, ya que el torón se encuentra en proporciones despreciables. El radón se caracteriza por tener una vida media larga (3.8 días) [11]. En la Figura 2-1, se muestra la cadena de desintegración del uranio.

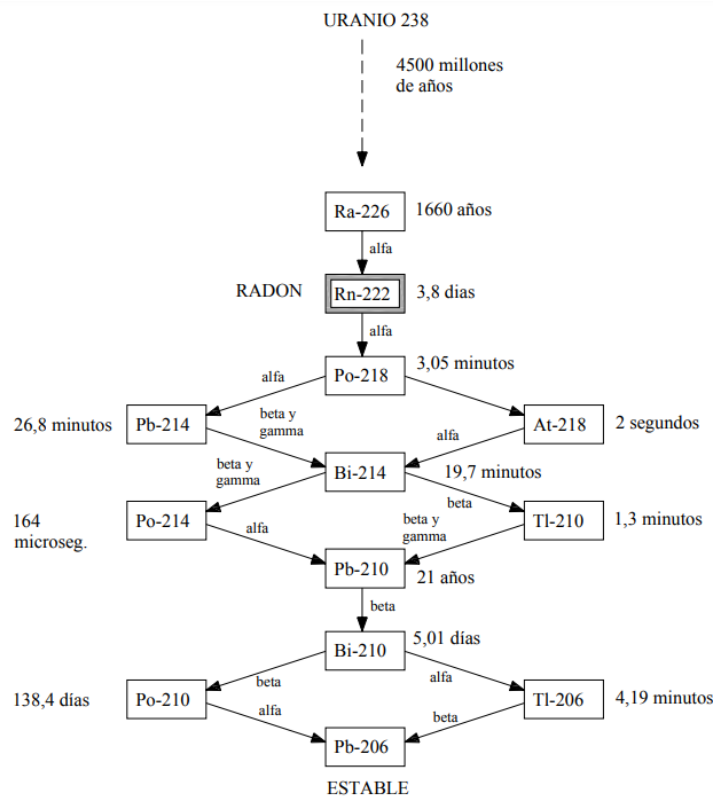


Figura 2-1 Cadena de desintegración del uranio [19]

El gas radón se caracteriza por su solubilidad en el agua y por su gran movilidad, por lo que es capaz de atravesar materiales y desplazarse a través del agua [20]. Se pueden distinguir dos mecanismos de transporte:

- Difusión: Desplazamiento del gas debido a la diferencia de concentraciones, es decir, el gas se desplaza de las zonas de mayor concentración a las de menor concentración. Este proceso es el que realiza el gas cuando sale del terreno (mayor concentración) para entrar en el interior de un edificio o casa (menor concentración) [21].
- Convección: Desplazamiento del gas debido a la diferencia de presiones. El gas se desplaza de las zonas de mayor presión, como puede ser el terreno, a las de menor presión, como puede ser el interior de una vivienda o el aire exterior [21].

La concentración de radón es menor en el exterior de los edificios debido a que existe mayor volumen de aire [22]. Además, el gas se desintegra en otras partículas radioactivas que son inhaladas a través de las vías respiratorias, por lo que puede suponer un factor de gran riesgo debido a la radiación que emana. Es potencialmente peligroso ya que al tratarse de un gas inoloro, insípido e incoloro su presencia pasa inadvertida por el ser humano, por lo que se producen exposiciones a largo plazo [10].

Al encontrarse en un estado gaseoso, emana del suelo a través de los poros de las rocas y puede encontrarse en el agua (aunque se encuentra en mayor proporción en las aguas subterráneas) o en el aire, principalmente en el interior de las edificaciones [23]. De esta forma, la concentración de radón varía en función de una serie de parámetros, siendo la composición terrestre una de las más influyentes. En la Figura 2-2 se muestran esos parámetros.

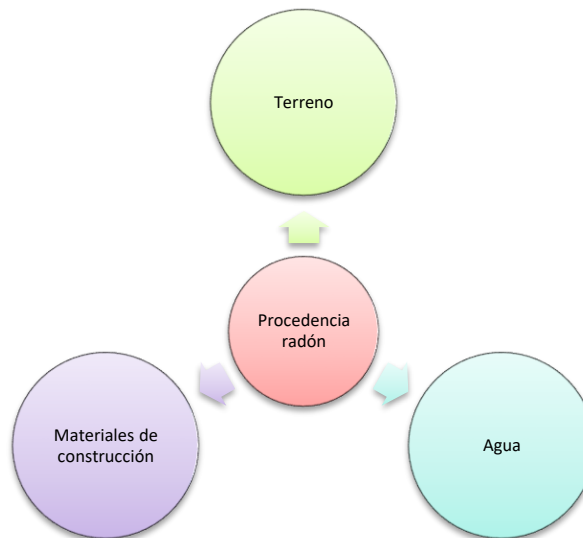


Figura 2-2 Procedencia del gas radón (Autoría propia)

Terreno

El terreno es el factor principal del que proviene la mayor cantidad de radón que se encuentra en el interior de los edificios. Se pueden clasificar las rocas según su origen en sedimentarias, metamórficas e ígneas, siendo estas últimas las que contienen la mayor proporción de uranio [11]. En la Figura 2-3, se muestra la distribución rocosa de España:

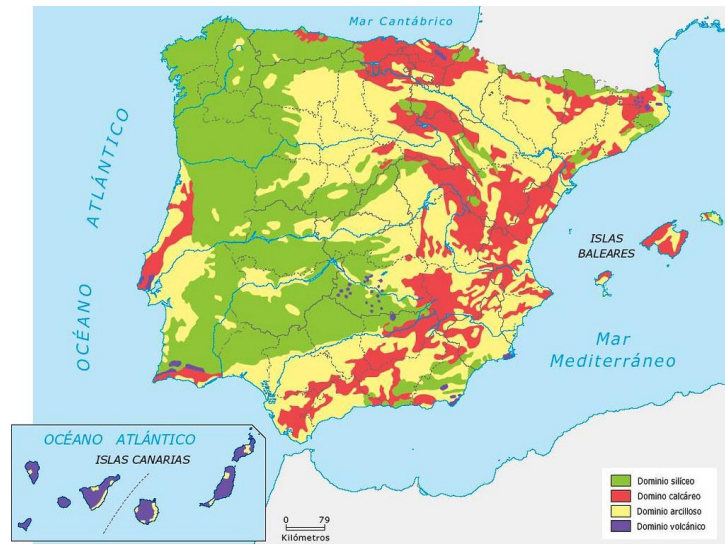


Figura 2-3 Mapa del dominio rocoso de España [24]

Como se puede ver en la imagen, las zonas que contienen mayor cantidad de uranio están situadas al oeste de la península, resaltando Galicia y Extremadura, que son las comunidades autónomas que más rocas graníticas tienen. A su vez, el Consejo de Seguridad Nacional elaboró un mapa en el que se representa el terreno peninsular en función del nivel de riesgo de exposición al gas radón, tal y como se puede observar en la Figura 2-4.

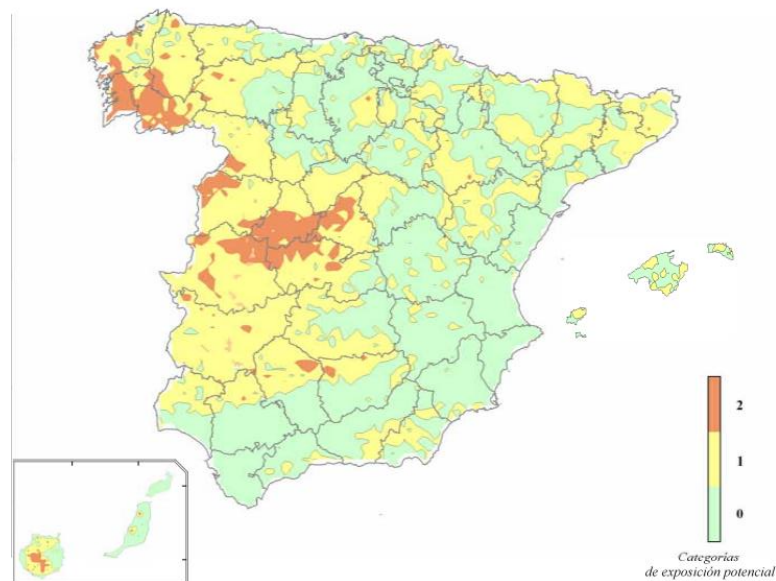


Figura 2-4 Mapa de exposición al radón [25]

Por tanto, conforme a lo expuesto en el mapa predictivo de exposición al radón, se pueden encontrar tres categorías [20]:

- Nivel de riesgo alto o categoría 2: Zonas en las que la exposición al radón puede superar los 300 Bq/m^3 .
- Nivel de riesgo medio o categoría 1: Zonas en las que la exposición al radón se encuentra entre 150 y 300 Bq/m^3 .
- Nivel de riesgo bajo o categoría 0: Zonas en las que la exposición al radón es inferior a 150 Bq/m^3 .

Otros de los factores a tener en cuenta en el terreno son la permeabilidad y porosidad de éste. Ambos términos están estrechamente relacionados ya que se entiende como porosidad al porcentaje de volumen de suelo no ocupado [26]. Así mismo, la permeabilidad de un material indica la cantidad de moléculas de radón que son capaces de atravesarlo. De esta forma, en función del grado de permeabilidad que disponga el terreno, la emanación y exhalación del radón se realizará con más o menos dificultad [21]. El proceso de emanación se define como el fenómeno que permite que el radón escape de la roca en la que se encuentra y se filtre a los poros del suelo, mientras que la exhalación es la liberación del gas a la atmósfera [23]. En la Figura 2-5 se muestra una representación gráfica de ambos procesos.

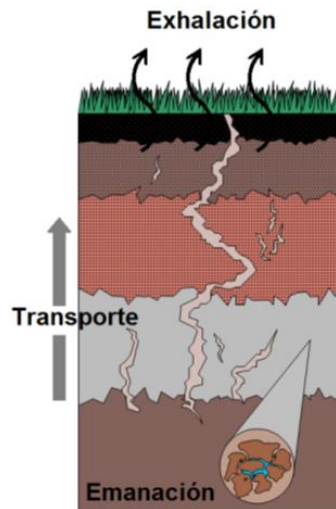


Figura 2-5 Procesos de exhalación y emanación del gas [27]

Se puede determinar que las zonas que son más susceptibles a la presencia del radón son aquellas que presentan suelos graníticos ya que, aunque contienen menor cantidad de uranio que los suelos arcillosos, tienen más fisuras en sus rocas y su grado de permeabilidad es mayor, por lo que, al desintegrarse, el radón emana más fácilmente [11].

Materiales de construcción

Una vez se produce la exhalación del gas desde el terreno a la atmósfera, el radón se introduce en el interior de los edificios en mayor o menor proporción dependiendo de los sistemas constructivos y de los materiales que se hayan empleado. Las mayores concentraciones del gas suelen encontrarse en los sótanos de las casas o plantas bajas de edificios debido a la presencia de grietas en el suelo o paredes, juntas, sumideros y desagües o incluso el grado de porosidad que presenta el material empleado. Además, estos espacios se caracterizan por la ausencia de ventilación, factor que contribuye al aumento de la concentración del gas.

Los materiales de construcción empleados son considerados la segunda fuente de radón en el interior de los edificios ya que, aunque el aumento de la concentración del gas es mínimo en comparación con los niveles permitidos según la normativa vigente, diversos estudios indican que se puede añadir una cantidad de entre 5 y 20 Bq/m³. Los materiales más comunes utilizados en la construcción son el hormigón, ladrillos, cementos, yesos, piedras naturales como el granito o la pizarra, arenas, gravas y adiciones como cenizas volantes. Estos materiales poseen diferentes concentraciones de radio debido a sus distintos lugares de origen como las puzolanas o tobas volcánicas, sin embargo, se consideran que todos presentan un nivel alto de radio [28] [29].

Agua

El agua es el tercer factor a tener en cuenta para determinar la procedencia del gas radón ya que la utilización de aguas subterráneas, que provienen de pozos o manantiales, para uso doméstico puede suponer un aumento de la concentración del gas. Este incremento se da sobre todo en lugares donde se

emplea agua caliente como en el baño debido a que el movimiento del gas se ve favorecido por la temperatura. Tal y como se ha descrito anteriormente, la mayor parte del radón proviene de las rocas. Sin embargo, algunas de éstas filtran el radón a las aguas subterráneas por lo que la diferencia de concentración es considerable en comparación con las aguas superficiales, ya que las superficiales liberan con mayor facilidad el radón a la atmósfera.

Un claro ejemplo de aguas subterráneas con niveles altos en radón son las aguas termales. Diversos estudios realizados en distintos balnearios españoles resaltan que en función de la zona geológica en la que se encuentren pueden llegar a superar niveles de concentración de radón de hasta 2200 Bq/L. En la Tabla 1, se muestran los balnearios más reseñables:

Balneario	Concentración (Bq/L)
La Hermida (Cantabria)	2273
Caldas de Besaya (Cantabria)	768
Caldas de Molgas (Ourense)	452
Mondariz-Gándara (Pontevedra)	281
Carballiño (Ourense)	134
Acuña (Pontevedra)	105

Tabla 1 Valores de concentración de radón en balnearios españoles [30]

2.2 Factores meteorológicos que afectan a la concentración de gas radón

La concentración del radón no sólo depende de los factores internos como la composición del terreno o la estructura del edificio mencionados anteriormente en el apartado 2.1, si no que se ve afectado en gran medida por otros factores externos entre los que destacan los meteorológicos. Los que se van a describir a continuación son de los más influyentes en la concentración del gas.

Presión atmosférica

Se caracteriza por ser uno de los factores que más afecta en la concentración del gas. Diversos estudios han demostrado que se produce una mayor exhalación de radón en momentos en los que se disponen bajas presiones, ya que cuando se producen estos cambios en la atmósfera, la presión que hay en el interior del edificio tiende a igualar dicho valor y a estabilizarse. Cuando hay cambios bruscos y se produce un fuerte descenso de la presión atmosférica, la presión del edificio reacciona rápidamente, mientras que la del terreno permanece en niveles superiores a los de la vivienda ya que depende de la permeabilidad del suelo. Esta diferencia de presiones entre ambos espacios genera una gran movilidad del gas, lo que favorece su entrada al interior del edificio [11].

Viento

Este factor meteorológico afecta de distintas formas a las concentraciones de radón. Por un lado, el viento puede favorecer la regeneración del aire en el interior de edificios. Es decir, el aire exterior entra más fácilmente a la vivienda a través de juntas o mediante las ventanas y puertas y regenera el aire del interior provocando un descenso de la concentración de radón. Sin embargo, también produce el efecto opuesto, ya que las diferentes velocidades del viento afectan al gradiente de presiones. Esta velocidad puede generar una diferencia de presiones considerable entre el exterior y el interior del edificio provocando así que el radón penetre con mayor facilidad en la vivienda [29] [11].

Precipitaciones

La permeabilidad del suelo se ve afectada directamente por la cantidad de agua que éste contiene, de forma que en periodos de lluvia la permeabilidad disminuye dificultando el transporte del gas. Esto

provoca una saturación de los poros del terreno adyacente al edificio, lo que implica que el radón emana del terreno al aire a través del suelo seco que se encuentra debajo de los edificios, produciéndose filtraciones al interior de ellos [17].

Temperatura

Un estudio elaborado por el CSN [29], indica que la temperatura produce cambios en los flujos convectivos del aire, lo que afecta a la expansión de radón.

La temperatura es un factor meteorológico que está estrechamente relacionado con la presión, ya que una diferencia de temperatura en diferentes entornos como puede ser el interior de un edificio y el exterior de éste, produce variaciones en el gradiente de presión. Esta diferencia de presiones puede producir el denominado efecto *stack*, que es un fenómeno en el que el aire que se encuentra más caliente en el interior del edificio que en el exterior tiende a escaparse, por lo que se genera una pequeña depresión y supone un aumento de la concentración del radón. Sin embargo, la influencia de la temperatura en la concentración del gas radón es ínfima ya que los cambios que se generan en la presión son alrededor de 1 Pa [17] [11] [29].

2.3 Técnicas para determinar la concentración de gas radón

El radón al tratarse de un elemento radioactivo, su concentración consiste en determinar la cantidad de partículas alfa emitidas por el gas. Existen tres métodos de medición de radón: instantánea, integrada y en continuo [31]. Estas técnicas se diferencian entre ellas en función de si utilizan o no aire forzado para obtener la muestra que se desea analizar [8].

2.3.1 Medición instantánea

Los métodos instantáneos son muy útiles para determinar la concentración del gas en un corto periodo de tiempo y proceder a analizar estas mediciones. Una de las principales ventajas de este método de análisis es que el material necesario es sencillo de utilizar y de bajo coste por lo que es apto para determinar la concentración de radón en una vivienda. Sin embargo, debido a su limitación en el tiempo, se debe tener precaución y establecer unas condiciones correctas para analizar la concentración del aire y obtener resultados veraces y representativos [31].

En este tipo de medición se suelen emplear las células de centelleo, que son dispositivos que permiten determinar la cantidad de gas que contiene el aire gracias a unos cilindros metálicos recubiertos de cinc [32].

2.3.2 Medición integrada

Suele ser la metodología más económica para determinar la concentración del gas en un periodo de tiempo más amplio que el descrito en el apartado 2.3.1. Este periodo de tiempo puede ser de días, semanas o incluso meses. Se obtendrá una mayor precisión cuanto más amplio sea el tiempo de medida, ya que se dispondrá de más cantidad de datos. Se suele emplear para estudios de inspección y reconocimiento [32].

Los dispositivos más utilizados en este tipo de medición son:

- Colectores de carbón activo: Se puede determinar la cantidad existente de radón gracias a la gran absorción que presenta el carbón. Cuando finalice el tiempo de medición, se analiza la radiación gamma que emite el carbón expuesto a causa de los isótopos procedentes del radón y se determina de esta forma la concentración media del gas [17] [32].
- Detectores de trazas: Se caracterizan por contener nitrato de celulosa o policarbonato. Gracias a su composición pueden medir una cantidad promedio de radón a la que se ven expuestos durante un tiempo, ya que, al entrar en contacto con el material, las partículas alfa

generadas por el radón dejan huellas que serán observadas y analizadas una vez finalice el tiempo de exposición [31].

2.3.3 Medición en continuo

Este tipo de medición no es muy útil para determinar la concentración de radón presente en un edificio. Está más orientado a trabajos de investigación y diversos estudios ya que son métodos menos prácticos y con un precio más costoso. Sin embargo, permite realizar un seguimiento del radón constante y continuo [32].

Realizando la medición en continuo se puede determinar la concentración de radón haciendo pasar un flujo constante de aire por un detector, de forma que advierte sobre cualquier anomalía producida en el interior de la estancia de estudio [17].

2.4 Marco normativo vigente

Con el paso de los años son cada vez más países los que se suman a la preocupación sobre la exposición del gas radón debido a su peligrosidad. Es por ello, que se establecen diversas normativas para garantizar que en cada vivienda o edificio exista un nivel estándar con unos requisitos mínimos de concentración. Si un edificio se encuentra por encima de estos valores mínimos se insta a reducir esta tasa de forma que cumplan con lo establecido en dicho país. Atendiendo al marco normativo europeo y español, en el presente apartado se describirán las normativas más importantes en nuestro país [17].

2.4.1 Directiva 2013/59/EURATOM

Esta normativa es una de las legislaciones más importantes de la Unión Europea en relación a la protección radiológica, ya que determina unas normas básicas de seguridad relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes. La Directiva permite a cada estado miembro establecer sus propios límites de concentración, con la condición de no superar los 300 Bq/m³. En España el límite es de 300 Bq/m³ ya que cuando se promulgó la Directiva y venció el plazo para establecer los límites de concentración de radón en lugares de trabajo en cada país, España no había fijado ningún valor por lo que se otorgó el máximo [33].

Además, la Directiva anima a los estados miembros a establecer planes de acción para la protección frente al gas radón, tal y como se muestra en el presente documento bajo el anexo XVIII “*Lista de aspectos que deberán considerarse para la preparación del plan de acción nacional destinado a hacer frente a los riesgos a largo plazo derivados de las exposiciones al radón a que se refieren los artículos 54, 74 y 103*” [34].

2.4.2 Manual de la OMS sobre el radón en interiores

El presente documento fue elaborado por el Departamento de Salud Pública y Medio Ambiente de la OMS. En este manual, la OMS explica la peligrosidad de este gas, la relación que mantiene su exposición con el riesgo de sufrir cáncer de pulmón, así como las posibles medidas preventivas y metodologías de medición del gas. Está orientado a nivel vivienda y establece un nivel de concentración más restrictivo que la Directiva 2013/59/EURATOM, ya que la OMS recomienda que el nivel no debe superar los 100 Bq/m³ en nuevas construcciones [35]. Además, indica que, si no se puede aplicar esta restricción en un país o región, los valores de concentración no deben superar los 300 Bq/m³ [36].

2.4.3 Código Técnico de la Edificación

El CTE es una normativa que establece los requisitos que se deben cumplir tanto en los edificios de nueva construcción como en los ya existentes. Está compuesto por diferentes apartados, pero no es hasta 2019 cuando se incluye una nueva sección HS6 “*Protección frente a la exposición del radón*”, que es la que nos importa en el presente trabajo. Esta nueva sección surge para satisfacer las exigencias establecidas por la Unión Europea para los estados miembros expuestas en el apartado 2.4.1 [37].

En el presente documento se establecen tanto los niveles que no deben superar los edificios como las posibles medidas de prevención de este gas. El CTE establece como nivel máximo anual 300 Bq/m³. Sin embargo, se pueden distinguir dos tipos de construcciones: los edificios de nueva construcción o los edificios ya existentes. En función de la localización de los edificios, se adoptarán unas medidas de protección u otras ya que como se explicó en el apartado 2.1, se pueden encontrar tres tipos de zonas de riesgo en función de la tasa de concentración de radón en el terreno [37]. En la Figura 2-6 se muestran las medidas de actuación que deben adoptar en los edificios en función de la zona de riesgo en la que estén ubicados.

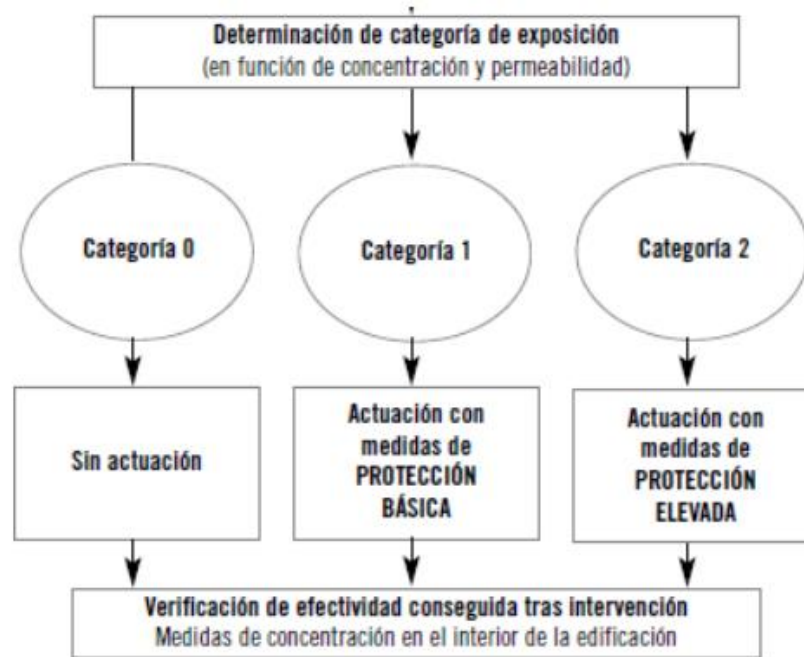


Figura 2-6 Medidas de actuación en función de la zona geográfica [38]

De esta forma, se puede observar que los edificios de nueva construcción pertenecientes a los municipios que se encuentren en nivel de riesgo bajo, es decir, con una concentración por debajo de los 150 Bq/m³, no es obligatorio que utilicen un método de actuación frente al radón. Sin embargo, en las zonas en las que los niveles estén entre 150 Bq/m³ y los 300 Bq/m³ se realizarán las medidas de protección básica, de forma que se tiene que cumplir al menos una de las siguientes medidas [37] [38]:

- Barrera de protección: Permite frenar el paso del radón al interior de los edificios. Se sitúa entre el edificio y el terreno, cubriendo totalmente la parte de la vivienda que está en contacto con el suelo para dificultar el avance del gas. El CTE permite cierta flexibilidad en su dimensionamiento, sin embargo, indica ciertas características que deben ser firmes como que no deben presentar ninguna fisura o que deben ser de gran durabilidad [19]. En la Figura 2-7, se muestra una representación que muestra este funcionamiento.



Figura 2-7 Barrera de protección contra el radón situada por debajo de la solera [19]

- Cámara de aire ventilada: Varía en función del espacio que se debe proteger, pudiendo ser vertical u horizontal. El objetivo de esta cámara es que el radón entre por un lado de ésta y mediante ventilación sea expulsado por el lado opuesto de la cámara, de forma que se encuentre en el exterior antes de que penetre en el interior del edificio [37]. En la Figura 2-8 se observa una representación de la medida descrita.

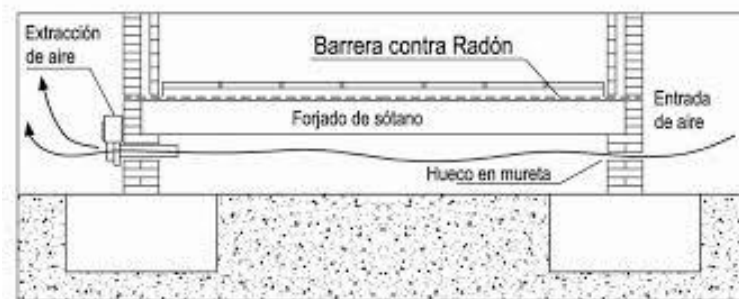


Figura 2-8 Cámara de aire ventilada [19]

Ambas medidas sirven para evitar que el gas radón penetre en los espacios interiores, sin embargo, la principal diferencia entre ellas es que la técnica de la barrera se utiliza como un escudo, es decir, impide que el gas se adentre gracias a su impermeabilidad, mientras que las cámaras de aire captan el radón y lo conducen hasta el exterior, evitando así su filtración al interior. Combinando ambas técnicas se obtienen unos mejores resultados [38].

Por último, para las zonas situadas en territorios donde las concentraciones son superiores a los 300 Bq/m³ se deben utilizar las medidas de protección elevada, por lo que se debe cumplir:

- Despresurización del terreno: En este sistema se pueden distinguir unos tubos que fuerzan la extracción del gas empleando la succión. Para realizar esta técnica, es necesario un punto de captación en el cual se debe atraer el gas del terreno y forzar su expulsión a la atmósfera. En los edificios de nueva construcción, el mecanismo se suele situar debajo del suelo. Sin embargo, en los edificios ya existentes, si no es posible colocar el mecanismo debajo de los cimientos, se puede disponer en las inmediaciones del terreno, realizando previamente un estudio sobre la circulación del aire bajo el edificio [37] [38]. En la Figura 2-9, se observa la técnica descrita.

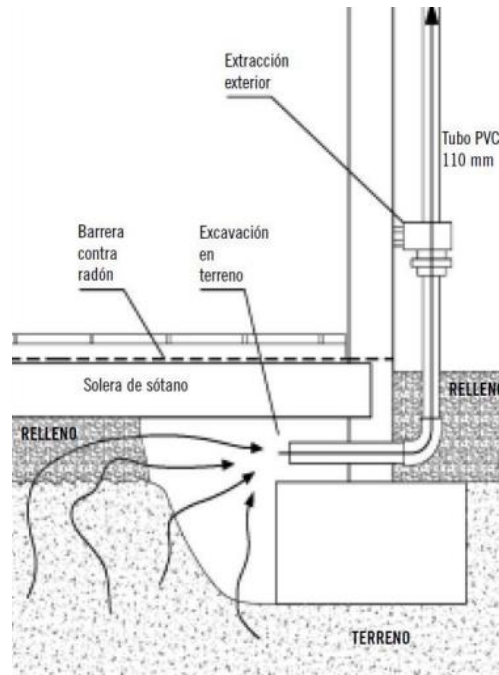


Figura 2-9 Despresurización del terreno [38]

Otra de las medidas que se puede adoptar en las zonas de riesgo alto es establecer cámaras de aire como en las zonas de riesgo medio [38].

En la Figura 2-10, se muestra un diagrama de flujo en el que se indica, de forma abreviada, las medidas que se deberían efectuar en función de si son edificios de nueva construcción o no. Cabe destacar que, en los edificios ya construidos, debido a su dificultad o imposibilidad de implementar estos métodos, la forma más eficiente de reducir la concentración del radón es mediante la ventilación, tal y como se explica en el apartado 2.5.

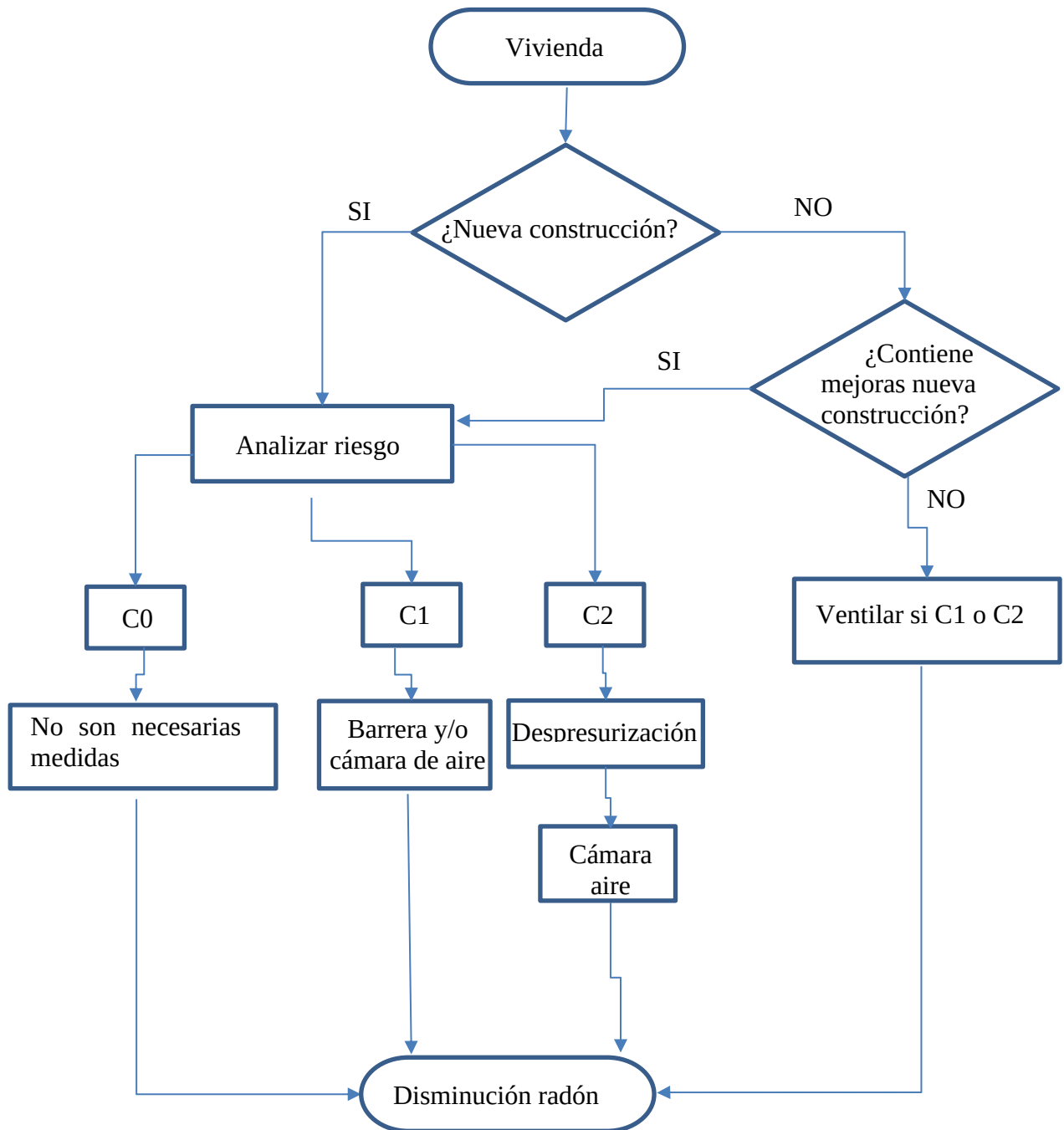


Figura 2-10 Diagrama de flujo de las medidas preventivas para evitar concentraciones de radón (Autoría propia)

2.5 La importancia de la ventilación en la eliminación del gas radón

El gas radón se acumula en las zonas más bajas de los edificios alcanzando en los casos más extremos elevadas concentraciones. Aunque existen diversos métodos para eliminar el gas radón de los edificios como los explicados en el apartado 2.4.3, cabe resaltar que estas medidas preventivas se dan mayormente en edificios de nueva construcción, debido a que en los ya existentes es muy difícil o inviable realizar estas mejoras [14]. Es por ello que, una de las principales formas de evitar estas concentraciones y disminuir la cantidad de radón en un espacio cerrado consiste en llevar a cabo una buena ventilación. Gracias a esto, se produce un movimiento del aire, lo que permite evitar que el gas se

concentre, ya que se fuerza al radón a desplazarse y por tanto no se acumula en las partes inferiores de los edificios [16].

Debido a la importancia de la ventilación y la calidad del aire en interiores, el CTE incluye un apartado en su sección HS 3 “*Calidad del aire interior*”, en la que se determina las condiciones que se deben cumplir en espacios cerrados como en viviendas, garajes o cualquier edificación que no cumpla las condiciones establecidas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los edificios (RITE). En este apartado se especifican diversos conceptos de especial interés como el caudal mínimo, que es la cantidad de aire limpio que debemos suministrar a un local para eliminar contaminantes. Esta variable se mide en l/s. Cabe destacar que en locales no ocupados el caudal mínimo será de 1,5 l/s [37]. Además, se debe tener en cuenta otro parámetro importante, especificado en el RITE, estrechamente relacionado con la ventilación y es la renovación por hora en un local o edificio. Esta variable se obtiene calculando cuanto volumen de aire limpio se puede introducir en el local, sustituyendo el contaminado, en el tiempo de una h. El mínimo de renovaciones por hora establecido por el RITE es de 6, de forma que se aseguran de que la calidad del aire sea óptima [16]. Teniendo en cuenta estas definiciones, el RITE establece 4 categorías de calidad del aire interior (IDA) [39]:

- IDA 1: La calidad del aire es la idónea. Se dan en lugares de sanidad como en hospitales o clínicas.
- IDA 2: El aire es de buena calidad. Es la que presentan centros de trabajo como oficinas o colegios.
- IDA 3: La calidad del aire es media. Tiene lugar en lugares de ocio o deporte (excepto piscinas que pertenece al IDA 2) como en cines o restaurantes.
- IDA 4: Aire de baja calidad.

Es por este motivo que la ventilación es un factor clave para obtener una óptima calidad del aire. Por ello, se puede clasificar los sistemas de ventilación en función de las siguientes categorías:

- Ventilación natural: Permite la renovación del aire favoreciendo la entrada y salida de éste mediante apertura de ventanas. Puede beneficiarse de agentes meteorológicos externos como el viento. Sin embargo, el CTE exige que en una vivienda se disponga también de métodos de ventilación mecánica o híbrida, ya que con el uso de ventilación exclusivamente natural no se puede controlar el caudal de aire [16].
- Ventilación mecánica: Es un sistema situado normalmente en las fachadas de los edificios o en las ventanas que consiste en la extracción de aire viciado que procede de lugares húmedos como los baños, consiguiendo de esta forma introducir aire fresco en las estancias secas [40] [16].
- Ventilación híbrida: Es una ventilación controlada que combina el uso de las dos explicadas anteriormente. Cuando las condiciones de presión y temperatura son idóneas, se utiliza la ventilación natural para mejorar la calidad del aire. Sin embargo, cuando las condiciones son desfavorables, se utiliza la ventilación mecánica [16].

Los dos tipos de ventilación aceptados por la normativa española son la ventilación mecánica y la híbrida, empleándose la natural para complementar a las anteriores. Por tanto, incluyendo las medidas preventivas explicadas en el apartado 2.4.3 y uno de los sistemas de ventilación aceptados por el CTE, se consigue una disminución de la concentración de gas radón en el interior de las edificaciones. Sin embargo, se debe optimizar el uso de la ventilación con el objeto de no incurrir en un gasto energético excesivo en climatización.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En la siguiente sección se describe el lugar de estudio, así como los materiales utilizados durante el análisis de los datos tomados durante la elaboración del TFG.

3.1 Recinto en el que se realiza el TFG

La fase experimental del presente trabajo se ha realizado en el edificio del Centro Universitario de la Defensa perteneciente a la Escuela Naval Militar (CUD-ENM), ubicado en la localidad de Marín (Pontevedra). El edificio (Ver Figura 3-1) fue construido entre 1939 y 1943 y posteriormente sufrió una reforma entre los años 2009 y 2010. Consta de dos plantas, situándose en su planta alta la secretaría del CUD-ENM, algunos despachos pertenecientes al profesorado, la sala de juntas, la sala de reuniones y la secretaría económica. En la planta baja, se encuentra la sala de grados, el resto de despachos del profesorado y aulas en las que el personal docente imparte clases a los alumnos.



Figura 3-1 Imagen aérea de la Escuela Naval Militar [41]

Es en su planta baja donde se centra este estudio, más concretamente en el despacho 114 debido a que, gracias a anteriores investigaciones [17] [14], se ha descubierto que es la estancia que registra más dosis de radón en su interior. En la Figura 3-2 se muestra el plano de la planta baja del CUD-ENM,

resaltando la ubicación del local de estudio. En la imagen, se observa que se puede acceder al recinto mediante un pasillo que lo comunica con el resto de despachos de la cara Norte del edificio, pertenecientes a los docentes. Establece contacto directo con el “Patio de Aulas” de la ENM gracias a una ventana, la cual será una parte a tener en cuenta en la investigación debido a la ventilación natural que ésta ofrece. En la cara Oeste del despacho se encuentra el salón de grados, mientras que en su cara Este se sitúa el despacho 112.



Figura 3-2 Plano del Patio de Aulas de la ENM [42]

El local tiene dos alturas que se encuentran separadas por un falso techo, por lo que, una altura es en la que se encuentra el sistema de ventilación y climatización y la otra es la que se puede apreciar a simple vista al entrar en el despacho. La altura total es de 5,5 metros, correspondiéndose 3,7 metros a la altura habitable y los 1,8 metros restantes a la del falso techo. A continuación, se muestra una representación del despacho (Ver Figura 3-3) y el plano con las dimensiones del mismo (Ver Figura 3-4):

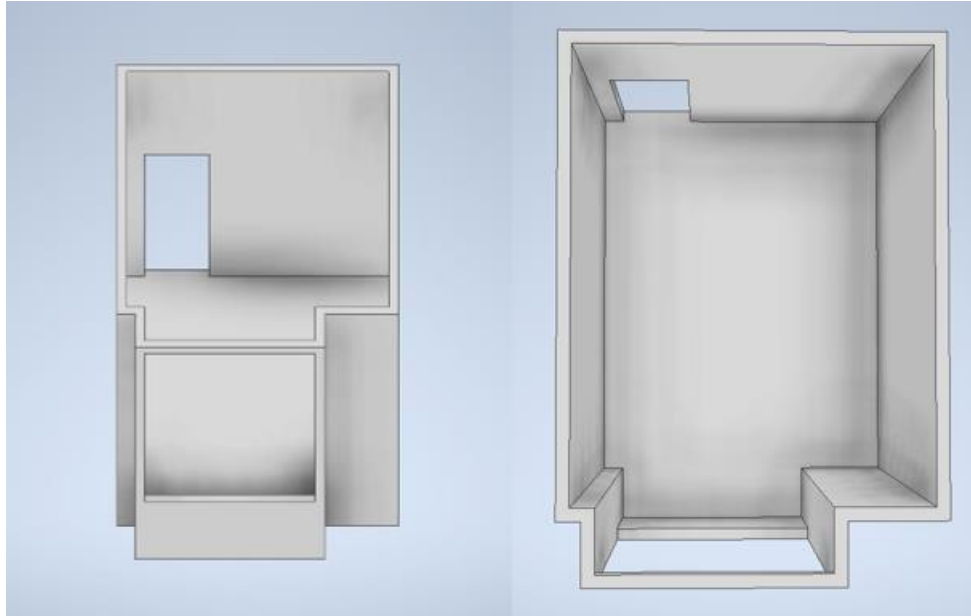


Figura 3-3 Representación del Despacho 114 (Autoría propia)

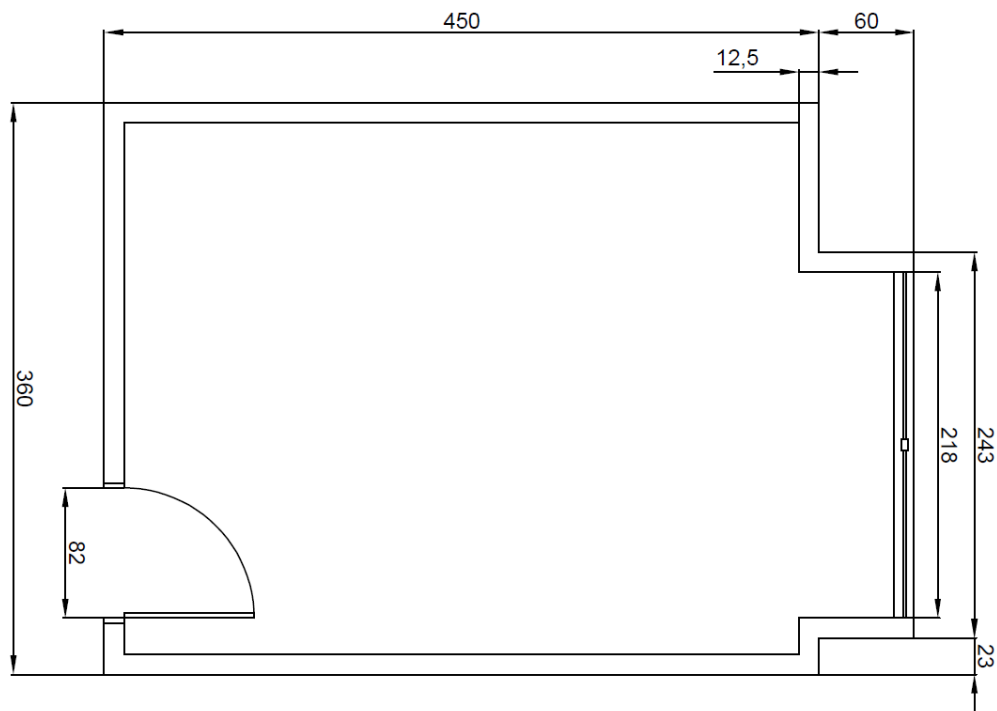


Figura 3-4 Plano del Despacho 114 en cm – Vista en planta (Autoría propia)

Además, este despacho se caracteriza por disponer de varios sistemas de ventilación, los cuales tendrán gran influencia en el presente trabajo para determinar el comportamiento del gas. Como se mencionó con anterioridad, contiene una ventana en el interior que proporciona ventilación natural al entorno y facilita la renovación del aire en el interior del recinto. También cuenta con un tubo extractor situado debajo de la ventana que facilita el desalojo del aire contaminado hacia el exterior mediante ventilación forzada. En la Figura 3-5 y la Figura 3-6 se muestra el extractor mencionado y su posición con respecto a la ventana.



Figura 3-5 Tubo extractor de aire contaminado en el interior del Despacho 114



Figura 3-6 Salida del aire contaminado al exterior

En el falso techo del local, se aloja el sistema de ventilación y el de climatización (Ver Figura 3-7), que está compuesto por:

- Unidad de Tratamiento de Aire (UTA): Este sistema de ventilación toma aire del exterior y procede a su adecuación gracias a unos filtros con la finalidad de introducir aire renovado en la estancia. Este aire filtrado se transporta por todos los recintos del edificio a través de una red de conductos [16].
- Fancoil: Es un sistema de climatización que mezcla y recircula el aire procedente de la UTA y de la estancia mediante un ventilador y lo reintroduce en el local. El aire se introduce previamente en un intercambiador de calor, el cual se encarga de calentarlo o enfriarlo en función de las especificaciones demandadas por el usuario. Se caracteriza por usar como agente refrigerante el agua y por disponer de filtros que eliminan sustancias no deseadas [16].

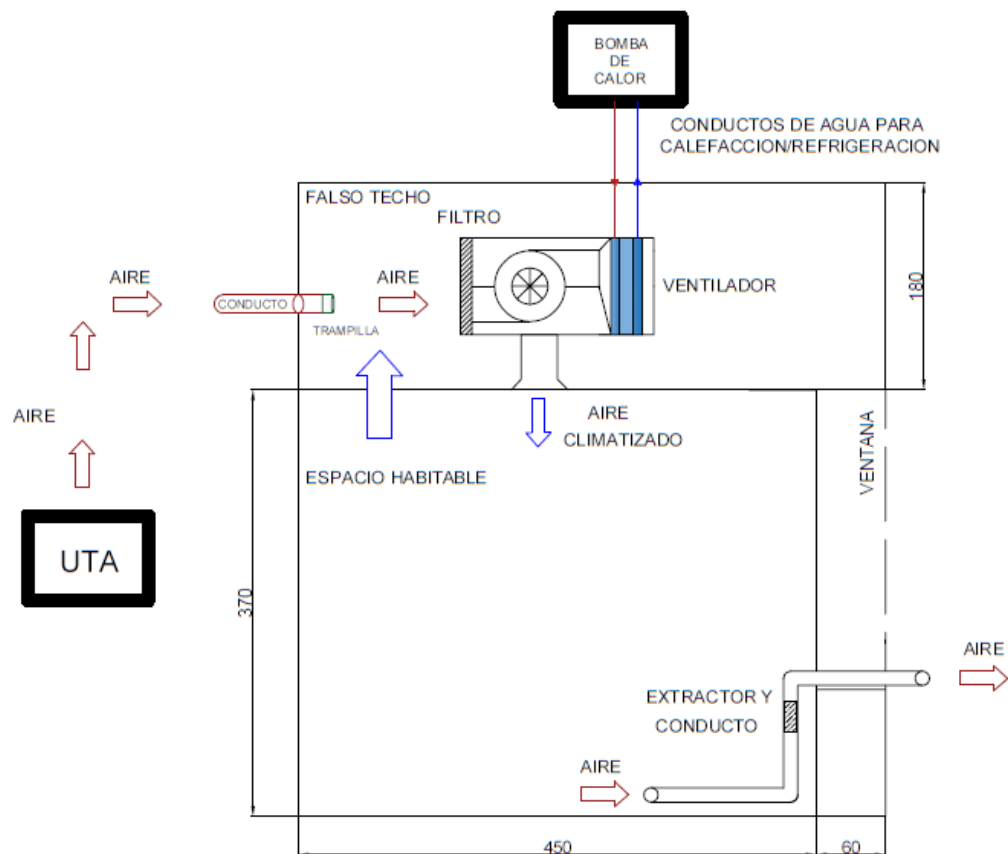


Figura 3-7 Funcionamiento general del sistema de ventilación del despacho (Autoría propia)

El fancoil cuenta con cuatro posiciones de funcionamiento, numeradas del 0 al 3 en función de la velocidad que posee el ventilador (Ver Figura 3-8). La posición 0 se refiere a cuando el fancoil está parado y no introduce aire en la estancia. Estos modos de funcionamiento se pueden modificar en cada despacho gracias a un panel de control regulable. Además, en este panel también se puede modificar la temperatura, adecuándola a los intereses del personal y permitiendo introducir aire frío o caliente para climatizar el interior en función de si es verano o invierno.



Figura 3-8 Panel de control regulable del fancoil

3.2 Medidores de concentración de radón

Para realizar el análisis sobre el comportamiento del gas, se ha utilizado un tipo de sensor que realiza una medición en continuo, explicada en el apartado 2.3.3, que permite conocer la concentración del gas radón en el interior del despacho. Este dispositivo fue desarrollado por una empresa de Corea del Sur denominada RadonEye y muestra la concentración de radón en Bq/m³ o en pCi/L (Picocuries por litro). Además, realiza una toma de datos cada 10 minutos y tiene una tasa de error del 10%. Sin embargo, los datos aparecen registrados una vez haya pasado una hora desde que se puso el dispositivo en funcionamiento. Destaca por tener un tamaño pequeño y ser ligero, por lo que es fácil de colocar en

cualquier parte de la estancia sin generar ninguna alteración. Tiene dos desventajas: debe estar conectado constantemente a la corriente eléctrica para poder realizar las mediciones y no registra valores superiores a los 3700 Bq/m³. El RadonEye es un sensor adquirido por el CUD-ENM y que se ha utilizado en anteriores TFG relacionados con la temática del gas radón [11] [17]. En la Figura 3-9 se muestra uno de los dispositivos utilizados en el trabajo.



Figura 3-9 RadonEyeRD200

En este trabajo se utilizan 10 sensores etiquetados como 05, 06, 09, 13, 15, 37, 38, 39, 40 y 41. Estos medidores envían los valores a un dispositivo denominado Raspberry Pi (RPi) mediante Bluetooth, y a su vez, éste está conectado por red a un servidor ubicado en el edificio de investigación del CUD. El servidor recoge los valores de concentración obtenidos con el RadonEye y permite la visualización y descarga de estos datos en intervalos de 10 minutos gracias a un software libre denominado Grafana. Además de las mediciones de gas radón, también muestra los datos registrados de temperatura en la estancia, ya que se han distribuido cinco sensores de temperatura en diferentes puntos del despacho. En la Figura 3-10 se muestra una representación de los datos mostrados en el software Grafana.

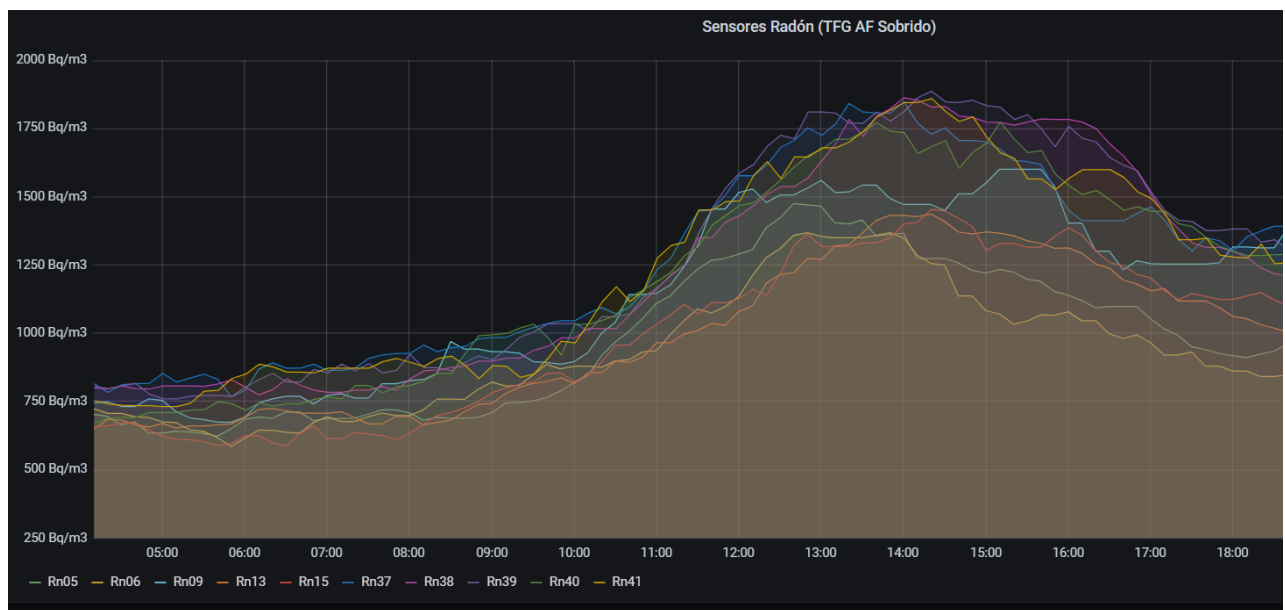


Figura 3-10 Variación de concentración de gas radón en función del tiempo - Software Grafana

3.3 Metodología realizada y toma de datos experimentales

Para la elaboración de este trabajo se han dispuesto los medidores de radón con una configuración determinada analizando así la distribución espacial de las concentraciones. En primer lugar, se ha establecido como sistema de referencia la esquina izquierda del despacho vista desde la entrada por la puerta conforme a la Figura 3-11. Además, se representan las baldosas del despacho, situándose los sensores en las juntas de éstas.

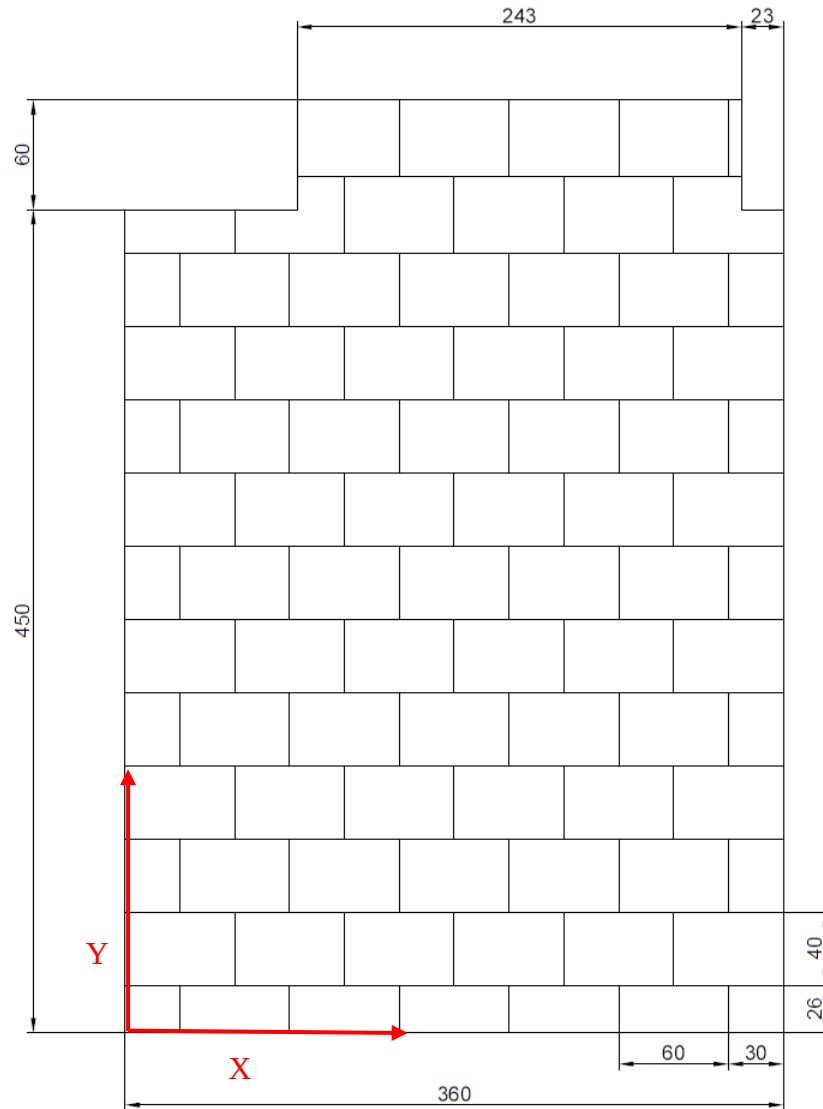


Figura 3-11 Plano del Despacho 114 con la referencia de los medidores (Autoría propia)

Por otra parte, el eje X será el ancho del despacho representado mediante letras (A-K) y el eje Y será el largo del despacho representado mediante números (1-12). A su vez, el eje Z será la altura del despacho. En la Figura 3-12, se muestra la disposición anteriormente mencionada, así como los sensores utilizados en este proyecto. Posteriormente, se indicará la ubicación exacta de cada sensor en el despacho.

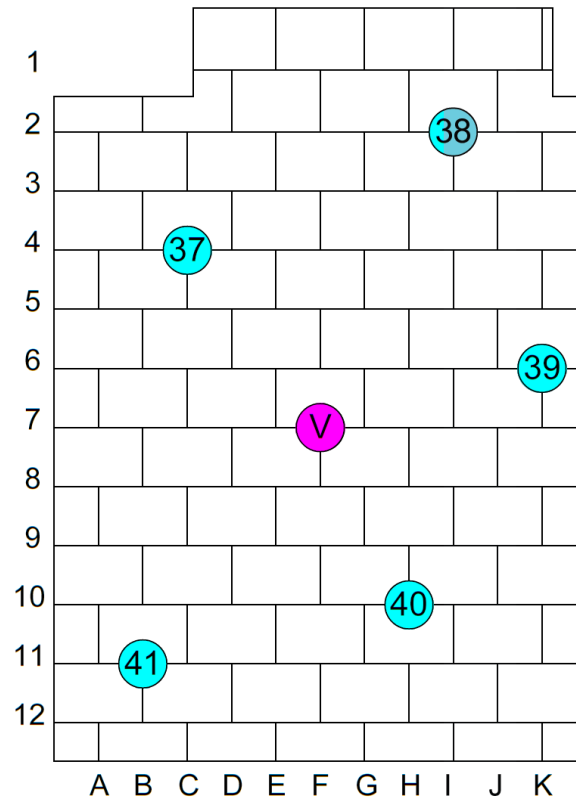


Figura 3-12 Ubicación de los sensores en el Despacho 114 (Autoría propia)

Se han colocado los dispositivos 05, 06, 09, 13 y 15 en una línea vertical (V en Figura 3-12) sujetos a un cable mediante bridas. Permanecen estáticos durante el desarrollo del trabajo, por lo que tienen las mismas coordenadas X e Y, siendo $x = 180$ cm e $y = 226$ cm. Se han dispuesto a diferentes alturas en el punto central del despacho (Ver Figura 3-13). De esta forma, la distribución de los sensores verticales es la siguiente:

- RadonEye05: Está situado en el suelo, en $z = 0$ cm.
- RadonEye06: Está situado en $z = 30$ cm.
- RadonEye09: Se encuentra en $z = 120$ cm.
- RadonEye13: Colocado en $z = 230$ cm.
- RadonEye15: Se encuentra en el punto más alto, en $z = 370$ cm.



Figura 3-13 Disposición fija de los medidores verticales

Sin embargo, los medidores 37, 38, 39, 40 y 41 aunque no cambian su posición en los ejes X e Y del plano, si varían su altura en el transcurso del TFG, ocupando las mismas alturas indicadas anteriormente para la vertical. Es por ello, por lo que están fijos al techo mediante un sistema de poleas que permiten modificar la altura de los sensores en función de la demanda. En la Figura 3-14 se muestra una distribución de los sensores en altura. Las posiciones de los sensores variables en altura denominados como sensores laterales, son las siguientes:

- RadonEye37: Ocupa la posición C4, $x = 90$ cm; $y = 346$ cm
- RadonEye38: Ocupa la posición I2, $x = 270$ cm; $y = 426$ cm
- RadonEye39: Ocupa la posición K6, $x = 330$ cm; $y = 266$ cm
- RadonEye40: Ocupa la posición H10, $x = 240$ cm; $y = 106$ cm
- RadonEye41: Ocupa la posición B11, $x = 60$ cm; $y = 66$ cm



Figura 3-14 Disposición de los medidores laterales variando su altura en el eje Z respecto a la vertical

3.3.1 Etapas del experimento

Para la elaboración de este estudio, se realizó una toma de datos durante aproximadamente tres meses en la que se distinguen diferentes etapas. Cada etapa destaca por tener características desiguales

en las cuales se varía la condición de ventilación, la altura de los sensores laterales o ambas. Para el estudio del comportamiento de gas radón en el interior del despacho, se ha establecido como prioridad obtener datos de todos los niveles en las siguientes condiciones de ventilación: periodos sin ventilación (sin aporte de aire exterior a través de la UTA), periodos con ventilación (con aporte mínimo de aire), periodos con el fancoil en posición 3 (con la UTA encendida) y periodos con el fancoil en posición 1 (también con la UTA encendida). A su vez, los niveles que se van a analizar son: suelo (todos los medidores laterales en $z = 0$ cm), nivel 1 (todos los medidores laterales en $z = 30$ cm), nivel 2 (medidores laterales en $z = 120$ cm), nivel 3 (medidores laterales en $z = 230$ cm) y nivel 4 (con los medidores laterales en $z = 370$ cm). También se estudian los datos registrados durante todo el experimento en la vertical durante las distintas condiciones de ventilación, englobando todos los datos de los anteriores niveles, ya que estos sensores no varían su posición. Es por ello, que se realiza la siguiente tabla (Ver Figura 3-15):

	SIN VENTILACIÓN		CON VENTILACIÓN		FC1		FC3	
SUELO	21/12/22 1830h -29/12/22 1230h	1117 DATOS	29/12/22 1240h - 02/01/23 0800h	545 DATOS	17/02/23 1610h - 19/02/23 0030h	195 DATOS	15/02/23 1040h - 16/02/23 1210h	154 DATOS
	02/01/23 0810h - 04/01/23 1000h	300 DATOS	04/01/23 1010h - 13/01/23 1430h	1323 DATOS				
	13/01/23 1440h - 16/01/23 1000h	405 DATOS	16/01/23 1010h - 17/01/23 0800h	132 DATOS				
	17/01/23 0810h - 18/01/23 1000h	156 DATOS	18/01/23 1410h - 20/01/23 0950h	263 DATOS				
			16/02/23 1220h - 17/02/23 1600h	167 DATOS				
	TOTAL	1978 DATOS	TOTAL	2263 DATOS	TOTAL	195 DATOS	TOTAL	154 DATOS
N1	20/01/23 1500h - 23/01/23 1030h	406 DATOS	23/01/23 1040h - 26/01/23 1330h	450 DATOS	06/03/23 1620h - 07/03/23 0950h	106 DATOS	14/02/23 1130h - 15/02/23 1030h	139 DATOS
			06/03/23 1210h - 06/03/23 1610h	25 DATOS				
	TOTAL	406 DATOS	TOTAL	475 DATOS	TOTAL	106 DATOS	TOTAL	139 DATOS
N2	27/01/23 1510h - 30/01/23 0830h	393 DATOS	26/01/23 1340h - 27/01/23 1500h	153 DATOS	20/02/23 1230h - 24/02/23 0140h	512 DATOS	24/02/23 0150h - 24/02/23 1420h	76 DATOS
			30/01/23 0840h - 30/01/23 1430h	36 DATOS			08/03/23 0140h - 08/03/23 1420h	77 DATOS
			07/03/23 1000h - 08/03/23 0130h	94 DATOS				
	TOTAL	393 DATOS	TOTAL	283 DATOS	TOTAL	512 DATOS	TOTAL	153 DATOS
N3	05/02/23 1340h - 05/02/23 2010h	40 DATOS	30/01/23 1440h - 01/02/23 1200h	274 DATOS	05/02/23 2020h - 07/02/23 1120h	235 DATOS	02/02/23 1400h - 02/02/23 2010 h	38 DATOS
	10/03/23 1000h - 11/03/23 1200h	78 DATOS	02/02/23 2020h - 03/02/23 0930h	83 DATOS	26/02/23 0050h - 02/03/23 1000h	583 DATOS	03/02/23 0940h - 03/02/23 1420h	29 DATOS
			03/02/23 1430h - 04/02/23 1310h	137 DATOS			04/02/23 1320h - 05/02/23 1330h	146 DATOS
			02/03/23 1010h - 03/03/23 1000h	143 DATOS			24/02/23 1430h - 26/02/23 0040h	206 DATOS
			08/03/23 1620h - 10/03/23 0950h	250 DATOS			08/03/23 1430h - 08/03/23 1610h	11 DATOS
	TOTAL	118 DATOS	TOTAL	887 DATOS	TOTAL	818 DATOS	TOTAL	430 DATOS
N4	12/02/23 0950h - 13/02/23 0800h	134 DATOS	07/02/23 1130h - 09/02/23 0920h	237 DATOS	04/03/23 0120h - 05/03/23 2310h	276 DATOS	09/02/23 0930h - 10/02/23 1420h	174 DATOS
			03/03/23 1100h - 04/03/23 0110h	86 DATOS			13/02/23 0810h - 14/02/23 1120h	164 DATOS
			05/03/23 2320h - 06/03/23 0950h	64 DATOS				
	TOTAL	134 DATOS	TOTAL	387 DATOS	TOTAL	276 DATOS	TOTAL	338 DATOS

Figura 3-15 Mediciones realizadas durante la fase experimental en las condiciones de ventilación prioritarias

De esta forma, el comportamiento del gas radón se analiza en cinco planos, es decir, un plano correspondiente a cada sensor lateral, comparando estos sensores con el de la vertical situado a su misma altura, en función del nivel que se esté analizando. Cabe destacar que, en los sensores laterales, el RadonEye de referencia correspondiente a la vertical variará en función de a qué altura se eleven los laterales, sin embargo, en la vertical el dispositivo de referencia será siempre el mismo, el RadonEye05, ya que estos sensores no varían su posición durante toda la toma de datos. A su vez, también se realizará una diferenciación entre las condiciones en régimen permanente y en transitorio. Se entiende como régimen permanente cuando la condición de ventilación permanece estable, sin producirse alteraciones en ésta y cuando los valores de concentración de radón se mantienen también estables. Por lo contrario, el régimen transitorio se produce en el momento en el que se varían estas condiciones de ventilación y los valores de concentración no se mantienen estables, si no que se producen rápidos incrementos (denominados como arrancadas) o decrementos (denominados como bajadas). En la Figura 3-16, se puede observar la diferencia entre ambos regímenes:

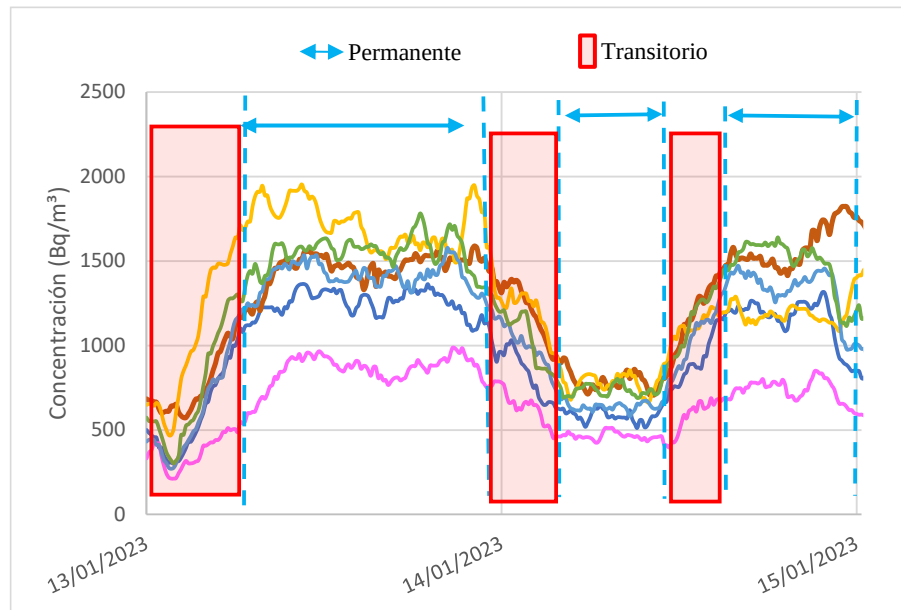


Figura 3-16 Gráfico de los sensores en diferentes condiciones de ventilación indicando régimen transitorio y permanente

Para el estudio de los diversos datos obtenidos se utiliza Microsoft Excel, empleando gráficos de dispersión para la representación de los valores de concentración en cada nivel (incluido la vertical), obteniendo así varios tipos de gráficos:

- Unos gráficos iniciales en los que se muestran todos los datos correspondientes a cada RadonEye lateral comparados con los datos del RadonEye de referencia (que variará en función de a qué altura se encuentren), obteniendo en cada uno de estos gráficos la pendiente y el coeficiente de determinación. Tal y como se mencionó con anterioridad, destacar que los sensores pertenecientes a la vertical tendrán siempre como referencia el RadonEye05.
- Unos gráficos en los que se muestran todas las condiciones de ventilación de cada nivel, diferenciando por tonalidades los datos de los periodos de arrancada, bajada, con ventilación, sin ventilación, fancoil posición 1, fancoil posición 2 y fancoil posición 3. (No obstante, también se realizaron gráficas individuales de cada condición de ventilación).

Además, también se representan los valores de concentración relativos de cada sensor pertenecientes a cada nivel gracias al software Surfer, que es una herramienta que permite la visualización tanto en 3D como en 2D a partir de varios puntos. Este software contiene diversos modelos estadísticos, pero para la realización de este TFG se utilizará el método de Kriging ordinario. Este método es el más utilizado en la actualidad ya que realiza una interpolación a partir de la relación espacial que presentan los datos analizados aceptando que el valor medio es constante en el dominio [43]. En los mapas que crea Surfer, se unen mediante líneas los puntos que presentan la misma concentración de radón. A su vez, se representa los diferentes valores mediante un código de colores, diferenciando así por tonalidades dónde se encuentran las concentraciones más elevadas de radón en el despacho 114.

A continuación, se describirán los niveles en los que se ha efectuado este estudio, así como sus características más reseñables.

Nivel 0 o Suelo

En esta etapa, se encuentran todos los sensores laterales en el suelo ($z = 0$ cm) en sus respectivas posiciones tal y como se puede apreciar en la Figura 3-12. De esta forma, el dispositivo de referencia es el RadonEye05.

Durante esta fase se han modificado las condiciones de ventilación para cumplir las prioridades establecidas en el anterior apartado. Es por este motivo por el que se realiza la toma de datos en diferentes

fechas, comenzando a registrarse las primeras mediciones de este nivel el 21 de diciembre de 2022 a partir de las 1830h y finalizan el 20 de enero de 2023 a las 0950h. En esta primera toma de datos, los valores que se registran corresponden a periodos denominados como con ventilación y sin ventilación. A su vez, al modificar las condiciones de ventilación, se ha pasado de tener un régimen permanente a otro transitorio, por lo que se ha efectuado un análisis de estos cambios denominados como arrancadas y bajadas. Es decir, los periodos de arrancada son intervalos iniciales de los periodos sin ventilación en los que tras al apagar la UTA, los niveles de radón aumentan significativamente. Por consiguiente, los periodos de bajada son los intervalos iniciales de los periodos con ventilación, en los que los niveles de radón tienden a disminuir tras encender la UTA debido a que se introduce aire fresco en el interior de la estancia y facilita su movilidad por que se estabilizan las concentraciones. Se ha estipulado que los periodos de arrancada y bajada tienen una duración de 3-4 horas. Además, en el último periodo con ventilación se ha abierto la ventana durante cuatro horas para facilitar la renovación de aire en el interior mediante ventilación natural.

En esta primera etapa del nivel suelo, se cuestiona la fiabilidad de los datos obtenidos con los medidores 37, 40 y 41 entre los días 29 de diciembre al 02 de enero, ya que, debido a un periodo vacacional, se ha cambiado la ubicación de los sensores y no se ha informado al personal docente encargado de la investigación en cuestión. Por tanto, los datos obtenidos de los siguientes días no se incluyen en el presente análisis, obteniendo nuevamente datos fiables el día 18 de enero en el que se vuelven a colocar los sensores en su posición inicial.

La segunda toma de datos comienza el 15 de febrero de 2023 a las 1040h, finalizando el 20 de febrero de 2023 a las 1150h. En este intervalo de tiempo se registran los datos necesarios para el análisis posterior de las condiciones de ventilación prioritarias que faltaban.

Nivel 1

En esta etapa, los sensores laterales se suben una altura, de forma que se elevan 30 cm del suelo y se sitúan en el mismo plano que el RadonEye06, perteneciente a la vertical. En este nivel, se inicia la toma de datos el día 20 de enero de 2023 a las 1500h hasta el día 26 de enero a las 1330h, obteniendo valores de dos condiciones de ventilación: con ventilación y sin ventilación. Del mismo modo, se analizan los periodos de arrancada y bajada pertenecientes a este nivel.

También se realiza una segunda toma de datos para obtener así otra de las condiciones de ventilación prioritarias, el fancoil en posición 3, dando comienzo el día 14 de febrero de 2023 a las 1130h y finalizando el 15 de febrero a las 1030h. Finalmente, la última toma de datos comienza el 06 de marzo a las 1000h, momento en el cual se abre la ventana durante 2h, hasta el día siguiente a las 0950h.

Al igual que en el nivel suelo, se obtienen los mismos tipos de gráficos, sin embargo, los gráficos de los sensores laterales se comparan con el RadonEye06, ya que los sensores están en su mismo plano de referencia.

Nivel 2

En el nivel 2, los sensores laterales se suben otra altura, situándose de esta forma en el mismo plano que el RadonEye09, a una altura de 1,2 metros del suelo. En la primera toma de datos se han registrado los periodos con y sin ventilación, comenzando la etapa el día 26 de enero de 2023 a las 1340h y finalizándola el día 30 del mismo mes a las 1430h. La segunda toma de datos tiene lugar desde el día 20 de febrero de 2023 a las 1230h hasta el 24 de febrero a las 1420h, completando todas las condiciones de ventilación prioritarias. Con el fin de obtener una mayor cantidad de valores de concentración para la realización de un análisis más amplio, se ha realizado una tercera toma de datos, comenzando el 07 de marzo a las 1000h hasta el 08 de marzo a las 1420h.

Al igual que en las anteriores, se realizan los mismos tipos de gráficos de dispersión, pero se referencian los sensores laterales con respecto al RadonEye09.

Nivel 3

En la presente etapa se han elevado los sensores laterales a otra nueva altura, situándose en el mismo plano horizontal que el RadonEye13, a 2,3 metros del suelo. Con los datos obtenidos se han realizado los mismos gráficos de dispersión que en los anteriores niveles, con la salvedad de que los sensores laterales se han comparado con el sensor vertical de su misma altura, el medidor 13. Este nivel comienza la primera toma de datos el día 30 de enero de 2023 a las 1440h y finaliza el día 7 de febrero de 2023 a las 1120h. La segunda tiene lugar el día 24 de febrero a las 1430h hasta el día 03 de marzo a las 1050h. Se realiza una última toma de datos desde el día 08 de marzo a las 1430h hasta el 11 de marzo a las 1200h.

Nivel 4

En esta etapa, se elevan los sensores laterales a la última altura, situándose a 3,7 metros del suelo y en el mismo plano que el RadonEye15 de la vertical. Se comienza la recogida de datos el día 07 de febrero de 2023 a las 1130h y se finaliza el día 14 de febrero de 2023 a las 1120h. La segunda toma de datos comienza el 03 de marzo a las 1100h hasta el 06 de marzo a las 0950h.

Se utiliza el mismo modelo de análisis y representación que en los anteriores sistemas, con la salvedad de que los medidores laterales se comparan con el sensor situado en la cima de la vertical (RadonEye15).

Vertical

Al contrario que en los anteriores niveles, en este apartado sólo se estudian los sensores pertenecientes a la vertical. Como se mencionó en el transcurso del trabajo, estos medidores no han modificado su posición a lo largo de la investigación, por lo que el sensor de referencia será siempre el mismo, el RadonEye05, ubicado en $z = 0$ cm.

4 RESULTADOS

En el presente apartado, se presentan los datos de concentración de radón obtenidos durante las diferentes etapas de experimentación. Se realiza un análisis del comportamiento del gas en el interior del despacho 114 para poder obtener en apartados posteriores unas conclusiones en base a estos datos.

En primer lugar, se indicará en unas gráficas globales los periodos más representativos de cada etapa, en la que se mostrarán en el eje Y las concentraciones de cada uno de los medidores y en el eje X, se indicará cómo es su evolución a lo largo del tiempo. Para completar este análisis se utiliza el software Surfer, en el que se representa en mapas de curvas los puntos del despacho que tienen la misma concentración de radón. Posteriormente, se mostrarán unas gráficas más específicas, en las que se van a comparar los niveles de concentración de radón de dos medidores, situando los datos de radón obtenidos con el RadonEye de referencia, correspondiente al nivel que se esté analizando, en el eje horizontal (eje X) y el otro medidor en el eje vertical (eje Y).

4.1 Análisis del plano suelo

En este plano, se han realizado dos tomas de datos en las que se destacan la Figura 4-1 y la Figura 4-2:

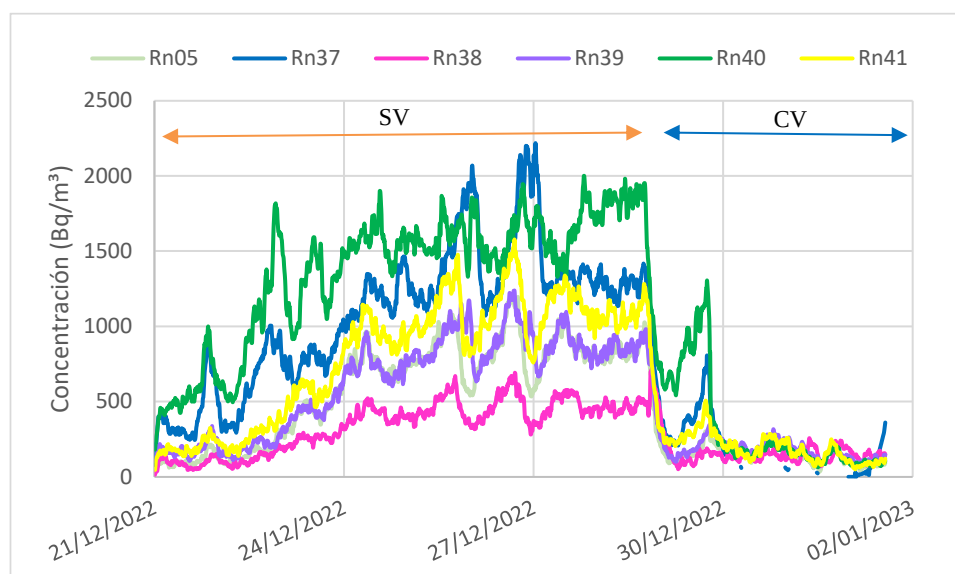


Figura 4-1 Periodo reseñable durante la primera toma de datos de la fase suelo

Este periodo reseñable corresponde a la primera puesta en marcha de los sensores en la que únicamente están presentes dos condiciones de ventilación (con y sin UTA en el interior del despacho), momento en el cual los niveles de concentración de radón aumentan significativamente y registran valores exageradamente superiores a los permitidos según la normativa vigente. Además, también se refleja el gran descenso de estas concentraciones al pasar de un estado sin ventilación a uno con ventilación. Es importante destacar que este es un gráfico global en el que no se hace distinción entre el régimen transitorio y permanente.

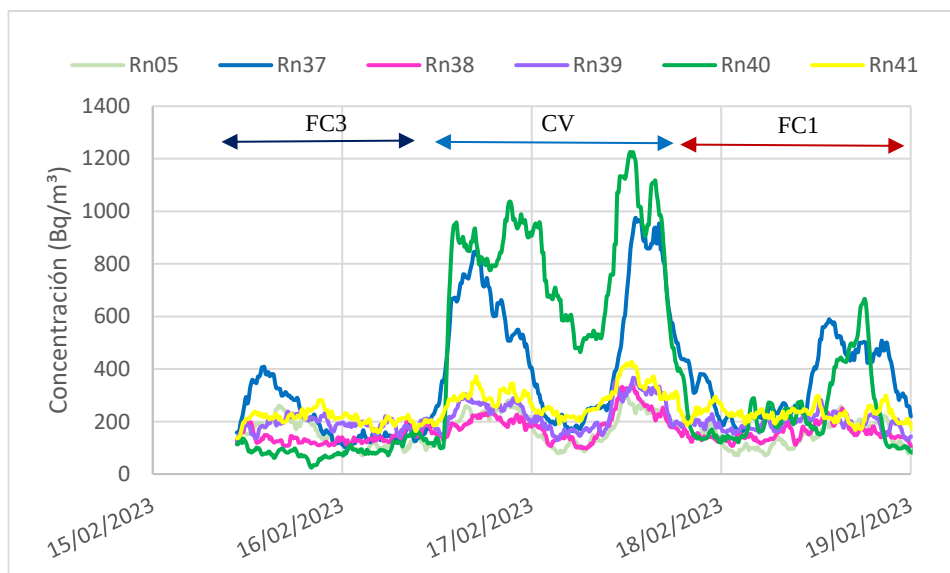


Figura 4-2 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos de la fase suelo

En este periodo, sin embargo, se muestran tres condiciones de ventilación, representando en los primeros días los datos registrados con el fancoil encendido en la posición 3 y la UTA en marcha (FC3), para proceder al apagado del fancoil (CV) durante el día 16 y finalizando con el encendido del fancoil con el ventilador en posición 1 (FC1) el día 17. Se puede observar, que al igual que el primer gráfico, las concentraciones registradas por los RadonEye cuando el despacho se encuentra ventilado se encuentran por debajo de los 300 Bq/m³, sin embargo, los medidores 37 y 40 registran valores muy elevados, disparando sus mediciones cuando se apaga el fancoil y sólo se mantiene la UTA encendida.

Para ver cómo influye la concentración de radón en los distintos puntos del suelo durante esta segunda toma de datos en las que el despacho ha estado ventilado, se han obtenido las concentraciones medias de cada sensor durante ese periodo de tiempo comprendido entre el 15 y el 19 de febrero, obteniendo la Tabla 2:

Sensores	Concentración media
RadonEye05	163,89
RadonEye37	364,53
RadonEye38	164,55
RadonEye39	207,49
RadonEye40	390,40
RadonEye41	244,84

Tabla 2 Concentraciones medias de la segunda toma de datos en Bq/m³ durante el nivel suelo

A pesar de que todos los medidores tienen concentraciones medias diferentes, todas se encuentran en el marco legal permitido y siguen la misma tendencia de aumento o disminución de la concentración en función de las condiciones de ventilación, salvo los medidores 37 y 40 que destacan notablemente de los otros. Este aumento significativo puede ser el resultado de una fisura en dichos puntos del suelo en los que están situados estos sensores y por tanto un fallo en la estanqueidad del despacho.

4.1.1 Concentraciones relativas en régimen permanente

En el presente apartado, se han determinado las concentraciones relativas de cada sensor lateral en las condiciones de ventilación prioritarias en régimen permanente, descartando de esta forma los cambios de ventilación o régimen transitorio, es decir, sin tener en cuenta las arrancadas y bajadas. De esta forma se obtienen las siguientes concentraciones comparándolas con el RadonEye05, representadas en la Tabla 3:

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
$C05_{SV} = 1,000$	$C05_{CV} = 1,000$	$C05_{FC1} = 1,000$	$C05_{FC3} = 1,000$
$C37_{SV} = 1,104$	$C37_{CV} = 2,158$	$C37_{FC1} = 2,527$	$C37_{FC3} = 1,429$
$C38_{SV} = 0,521$	$C38_{CV} = 0,542$	$C38_{FC1} = 0,407$	$C38_{FC3} = 0,141$
$C39_{SV} = 0,843$	$C39_{CV} = 0,944$	$C39_{FC1} = 0,306$	$C39_{FC3} = 0,149$
$C40_{SV} = 1,088$	$C40_{CV} = 2,684$	$C40_{FC1} = 2,125$	$C40_{FC3} = 0,221$
$C41_{SV} = 1,208$	$C41_{CV} = 1,253$	$C41_{FC1} = 0,177$	$C41_{FC3} = 0,184$

Tabla 3 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m³ en el nivel suelo

Con estas concentraciones relativas, se han obtenido para cada condición de ventilación, unos mapas de curvas que unen puntos con valores similares de concentración de radón, permitiendo conocer los lugares del despacho en los que emana más radón del suelo. Estos mapas se realizan con el software Surfer. A continuación, se muestran los más reseñables en este nivel (Ver Figura 4-3 y Figura 4-4), encontrándose el resto en el Anexo III: Mapas de curvas obtenidos en las distintas etapas durante el muestreo:

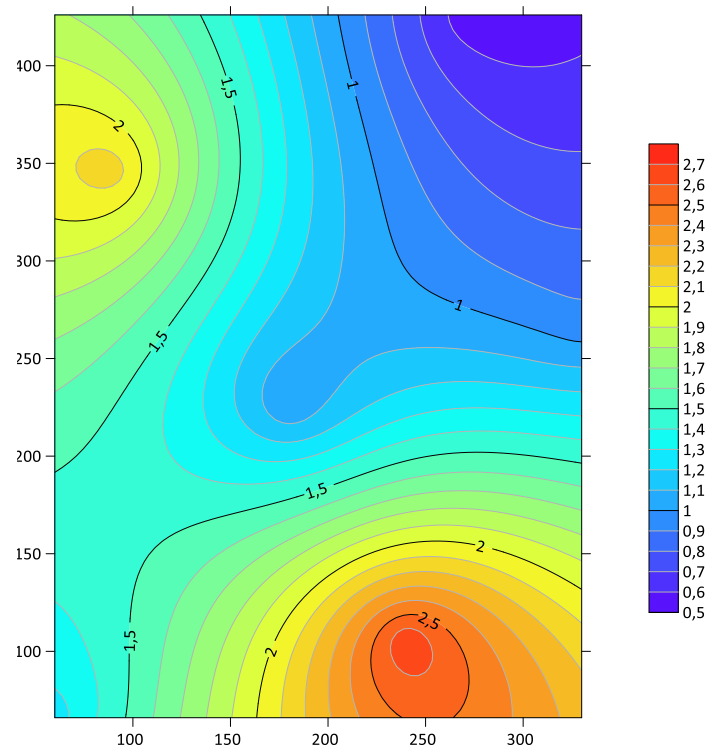


Figura 4-3 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel suelo

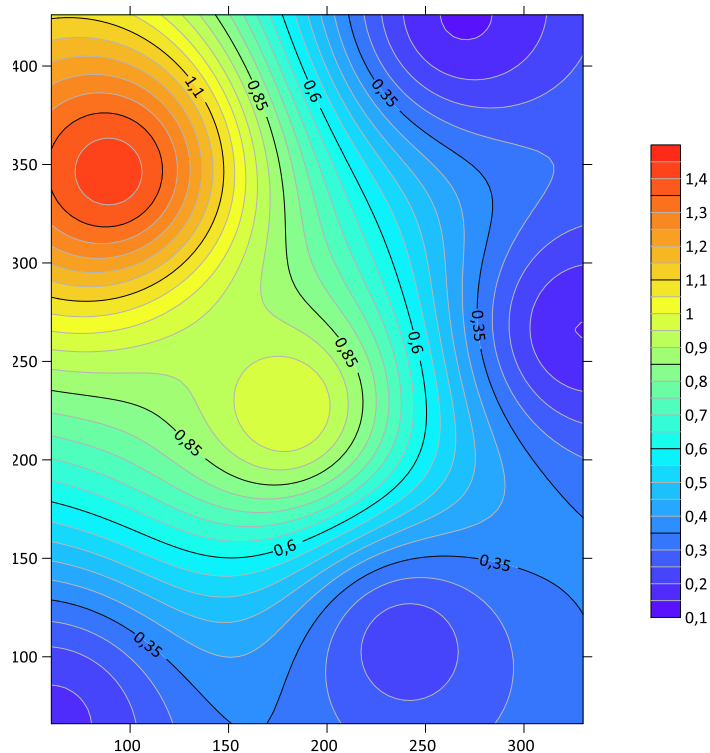


Figura 4-4 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel suelo

En la primera imagen, cuando el despacho se encuentra con la UTA encendida (con ventilación), se puede observar que los principales focos de inmisión de gas radón corresponden a los sensores 37 y 38. Lo mismo ocurre en la segunda imagen con la UTA encendida y el fancoil en posición 3, ya que el punto

más característico se encuentra próximo al sensor 37, encontrándose menores tasas de concentración en los alrededores del despacho.

Atendiendo a la Figura 4-3, se analiza de forma individual los principales focos de inmisión de gas radón para esa condición de ventilación, presentándose los siguientes diagramas de dispersión (Ver Figura 4-5 y Figura 4-6):

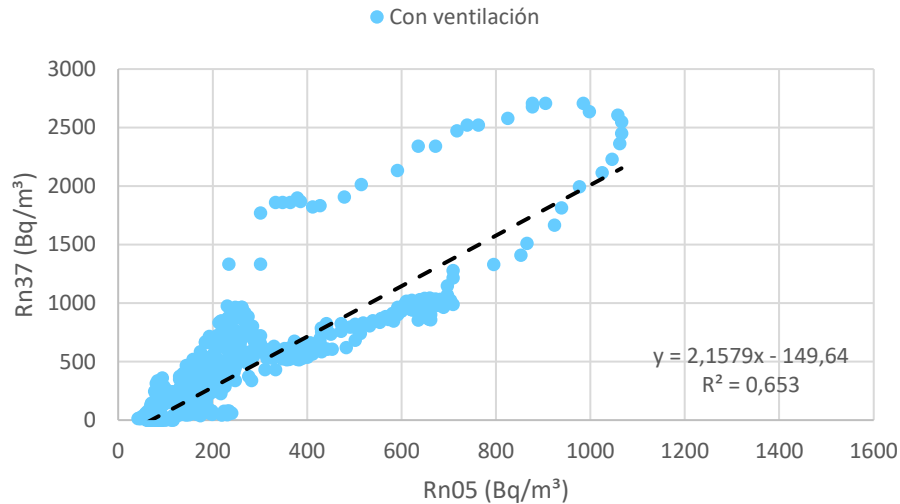


Figura 4-5 Concentraciones RadonEye37 para periodo con ventilación (UTA encendida)

Se han registrado valores muy elevados, dispersos de la tendencia de estas concentraciones. Esto se debe a que debido a un periodo vacacional se ha movido este sensor sin informar al personal docente, y aunque los datos en los que el sensor no estaba en su posición original han sido descartados, el medidor registra valores superiores cuando se pone en marcha.

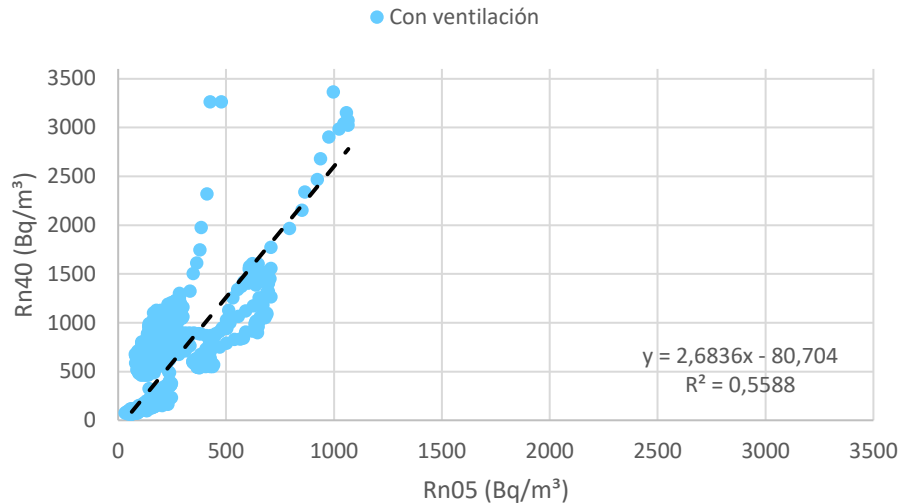


Figura 4-6 Concentraciones RadonEye40 para periodo con ventilación (UTA encendida)

Al igual que el anterior, este medidor también se movió, por lo que los valores tan elevados se deben a que ha tenido un periodo de estabilización desde que se volvió a poner en su posición original hasta que registró concentraciones más bajas. Sin embargo, los datos siguen una tendencia más lineal que en el anterior gráfico.

4.1.2 Régimen transitorio

En este apartado se analizan las arrancadas y bajadas al pasar de un periodo con ventilación a otro sin ventilación y viceversa. Es por ello, que se han obtenido las velocidades de estos incrementos y disminuciones de concentración, mostrados en la Tabla 4.

Velocidad arrancada	Velocidad bajada
$V_{a05} = 22,00$	$V_{b05} = -159,79$
$V_{a37} = 144,00$	$V_{b37} = -180,42$
$V_{a38} = 41,20$	$V_{b38} = 29,50$
$V_{a39} = 31,60$	$V_{b39} = -124,54$
$V_{a40} = 104,80$	$V_{b40} = -266,58$
$V_{a41} = 41,60$	$V_{b41} = -180,16$

Tabla 4 Velocidades de la primera arrancada/bajada de cada sensor en $Bq/m^3 \cdot h$

Como en el análisis del régimen permanente, los valores más elevados los presentan los RadonEye37 y 40, por lo que en esos puntos del suelo la concentración aumenta o disminuye con más rapidez.

4.1.3 Apertura de ventanas

Con el fin de observar cómo afecta este factor en la concentración de radón en el interior del despacho, se ha procedido a abrir la ventana, mientras se encontraba el despacho con la UTA encendida, durante un tiempo de 4h el día 18 de enero. El objetivo de este acto era impulsar la renovación del aire en el interior gracias a la combinación de la UTA y la ventilación natural. En la Figura 4-7 se representa la evolución de estas concentraciones a lo largo del tiempo.

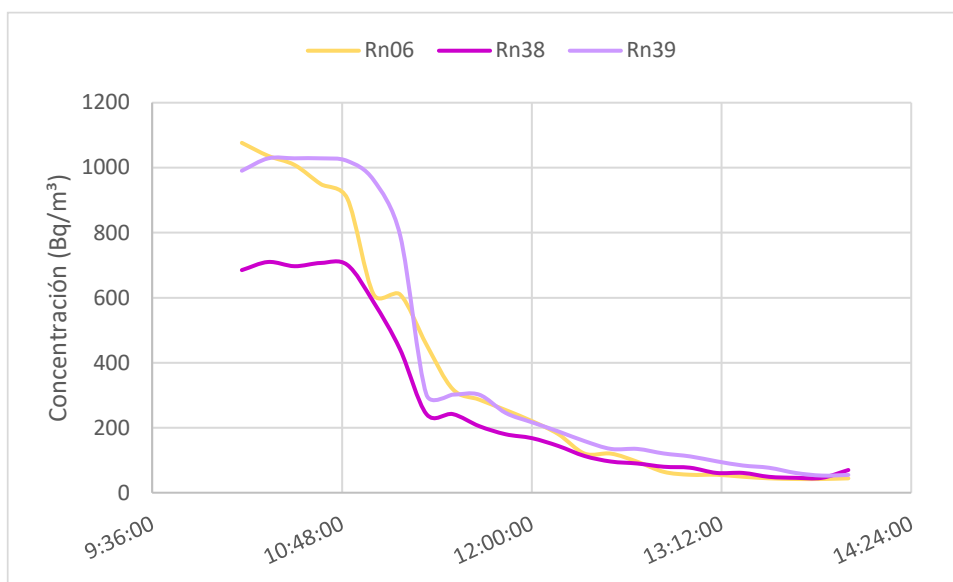


Figura 4-7 Valores de concentración frente al tiempo (h) con la UTA y la ventana abierta

En el gráfico aparecen los valores correspondientes a los sensores 38 y 39 de la horizontal ya que, tal y como se mencionó en el apartado 3.3.132, los otros RadonEye se han movido durante las vacaciones. En el tiempo en el que ha estado la ventana abierta, se han registrado 24 datos y, tal y como se puede observar en la Figura 4-7, es un factor a tener en cuenta en el análisis experimental del radón, ya que se produce un gran descenso de estos valores, pasando de concentraciones de $1100 Bq/m^3$ a otras

de 100 Bq/m³. De esta forma, debido a que se dispone de sensores de temperatura distribuidos por el despacho 114, se procede a analizar cómo influye este fenómeno en la concentración (Ver Figura 4-8):

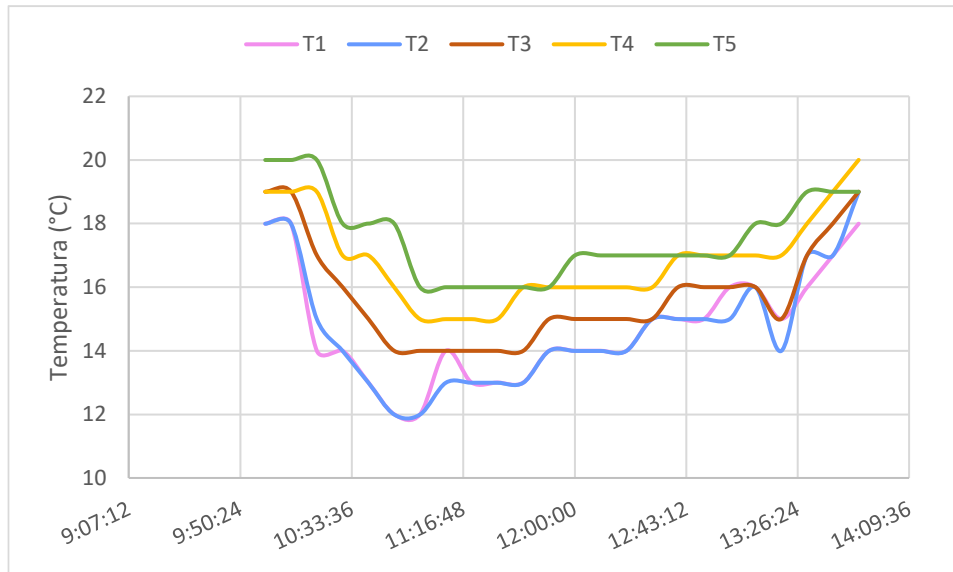


Figura 4-8 Temperatura (°C) registrada frente al tiempo (h) del 18 de enero

Se observa que el fuerte descenso de la concentración de radón coincide con el intervalo en el que la temperatura desciende alrededor de 4°C, por lo que se determina que combinando una ventilación natural con una artificial se consiguen concentraciones de radón más bajas, sin embargo, es un factor a tener en cuenta debido al gasto energético en climatización que supone.

4.2 Análisis del nivel 1

En este nivel, se elevan los sensores hasta el mismo plano que el RadonEye06. Se diferencia de la anterior etapa en que se realizan tres tomas de datos. Al igual que en el nivel del suelo, se realiza un gráfico de dispersión global en el que se señalan los periodos más característicos, obteniendo de esta forma los siguientes:

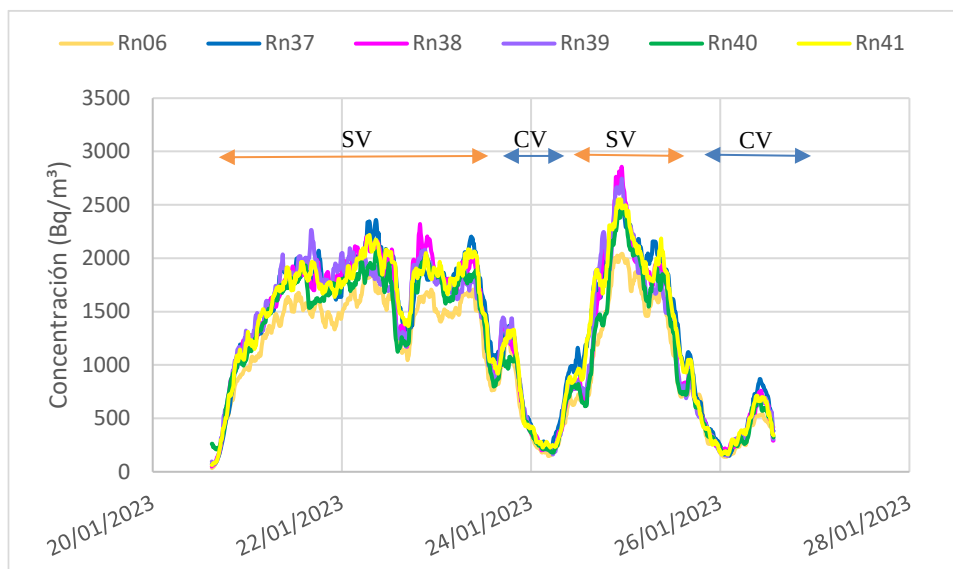


Figura 4-9 Periodo reseñable durante la primera toma de datos del nivel 1

En la Figura 4-9, se muestra cómo se comporta la concentración de radón al pasar de una condición con ausencia de ventilación (SV) en el interior del despacho a una condición en la que se introduce aire

fresco a través de la UTA (CV). Como se puede apreciar, hay dos picos con concentraciones elevadas correspondientes a periodos de sin ventilación, sin embargo, las concentraciones representadas con valores más bajos corresponden a periodos en los que la UTA se ha encendido.

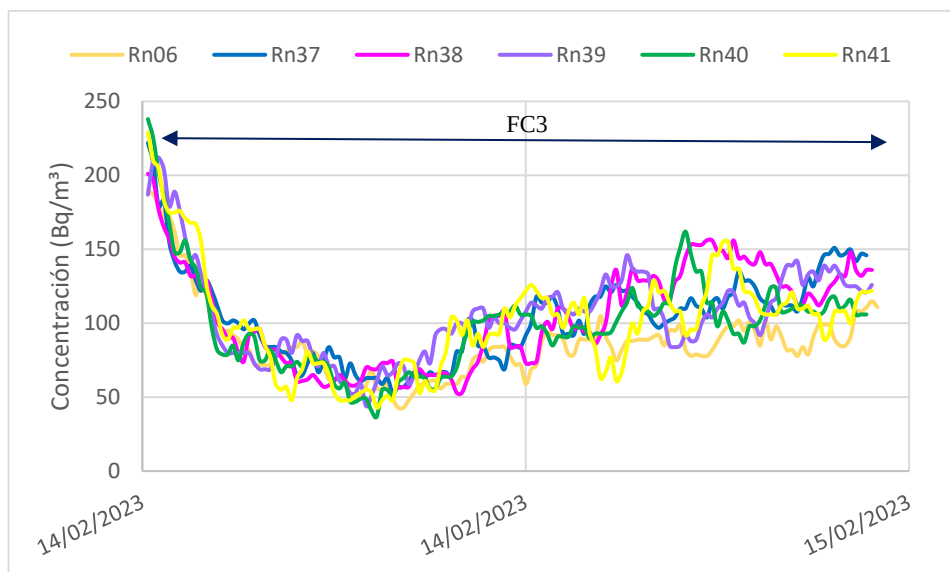


Figura 4-10 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos del nivel 1

En la Figura 4-10, se muestra cómo afecta el fancoil con el ventilador en posición 3 (FC3) en las concentraciones de radón. Como se puede observar, todos los RadonEye siguen una misma tendencia, registrando valores similares. Según diversos estudios, el radón es nueve veces más pesado que el aire, por lo que suele concentrarse en las plantas bajas de las habitaciones, lo que implica que, a medida que se eleva el sensor en altura, esta concentración tiende a homogeneizarse y a disminuir [9].

4.2.1 Concentraciones relativas en régimen permanente

A continuación, se muestra la Tabla 5, obtenida del mismo modo que en el apartado 4.1.1, con las concentraciones relativas pertenecientes a este nivel en las distintas condiciones de ventilación.

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
C06 _{SV} = 1,000	C06 _{CV} = 1,000	C06 _{FC1} = 1,0000	C06 _{FC3} = 1,000
C37 _{SV} = 1,246	C37 _{CV} = 1,200	C37 _{FC1} = 1,107	C37 _{FC3} = 1,308
C38 _{SV} = 1,160	C38 _{CV} = 1,243	C38 _{FC1} = 0,671	C38 _{FC3} = 1,460
C39 _{SV} = 0,965	C39 _{CV} = 1,202	C39 _{FC1} = 1,029	C39 _{FC3} = 1,073
C40 _{SV} = 1,017	C40 _{CV} = 1,126	C40 _{FC1} = 0,869	C40 _{FC3} = 0,995
C41 _{SV} = 1,200	C41 _{CV} = 1,227	C41 _{FC1} = 0,618	C41 _{FC3} = 1,087

Tabla 5 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m3 en el nivel 1

Las concentraciones relativas de todos los sensores tienen unos valores muy parecidos en todas las condiciones de ventilación, registrando mayores concentraciones que el sensor de referencia de esa etapa. A continuación, se muestran los mapas de curvas más característicos de esta etapa (Ver Figura 4-11 y Figura 4-12):

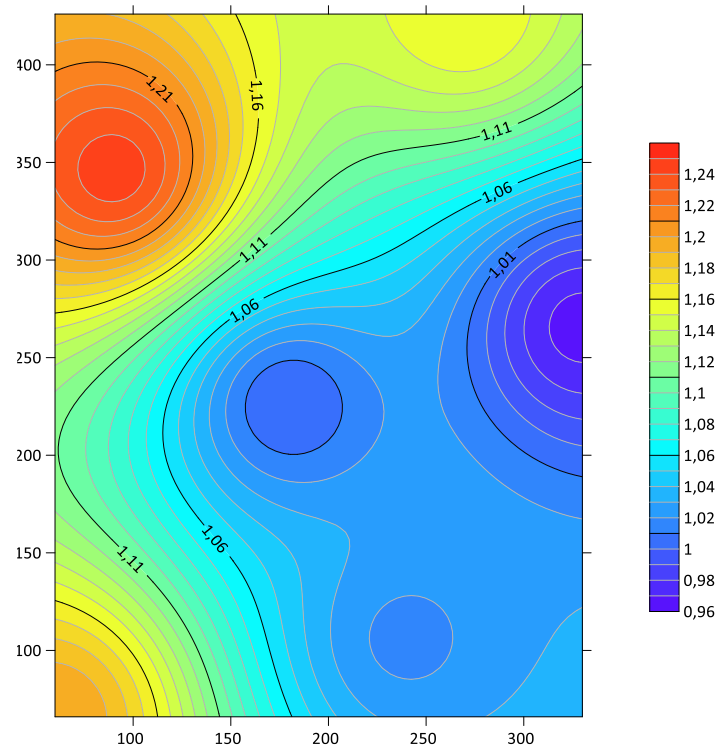


Figura 4-11 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 1

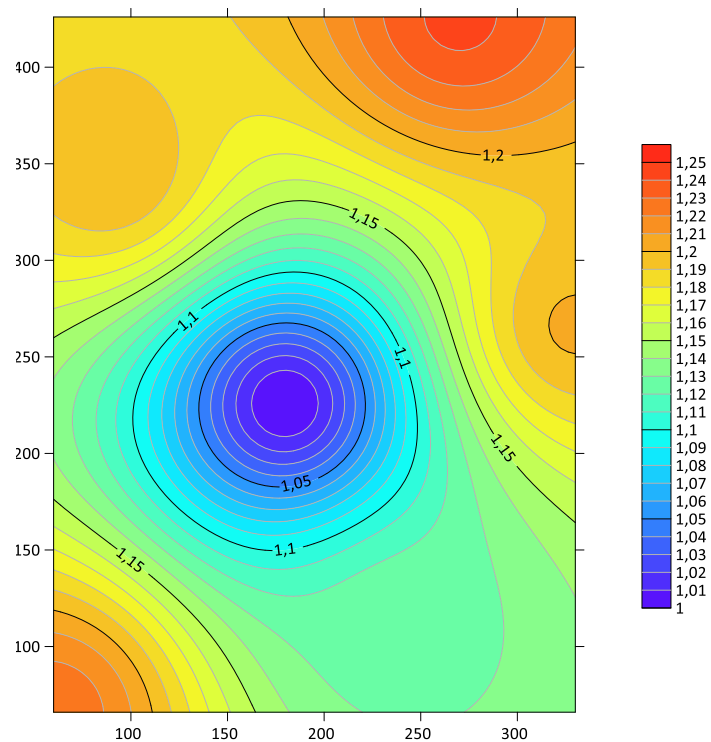


Figura 4-12 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 1

Cabe resaltar que en los periodos sin ventilación y con ventilación, todos los valores siguen una tendencia de incremento lineal con muy poca dispersión en las concentraciones, tal y como se muestra en la Figura 4-13, perteneciente al RadonEye39 (medidor que presenta menor concentración relativa en sin ventilación):

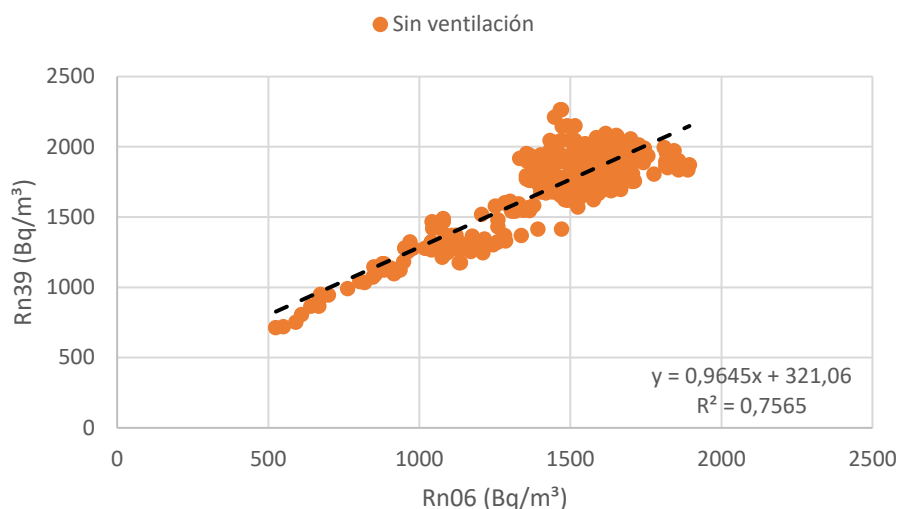


Figura 4-13 Concentraciones RadonEye39 frente al RadonEye06 en condición sin ventilación. Nivel 1

4.2.2 Régimen transitorio

En este apartado se representan las velocidades de arrancada y bajada, comparándolas con el sensor de referencia correspondiente a este nivel, al pasar de un régimen sin ventilación a otro con ventilación durante la primera toma de datos (Ver Tabla 6):

Velocidad arrancada	Velocidad bajada
$V_{a06} = 118,75$	$V_{b06} = -230,39$
$V_{a37} = 112,75$	$V_{b37} = -227,21$
$V_{a38} = 146,00$	$V_{b38} = -261,48$
$V_{a39} = 143,25$	$V_{b39} = -221,20$
$V_{a40} = 103,00$	$V_{b40} = -239,22$
$V_{a41} = 129,00$	$V_{b41} = -289,75$

Tabla 6 Velocidades de arrancada y bajada pertenecientes al nivel 1

A diferencia del anterior nivel, estos resultados son más homogéneos, debido a que, al subir los medidores, la mayor concentración de este gas se encuentra en el suelo, y la ventilación favorece al movimiento del gas por todo el despacho.

4.2.3 Apertura de ventanas

Se ha abierto la ventana el día 06 de marzo a las 1000h durante un periodo de dos horas en el que se ha realizado la siguiente Figura 4-14:

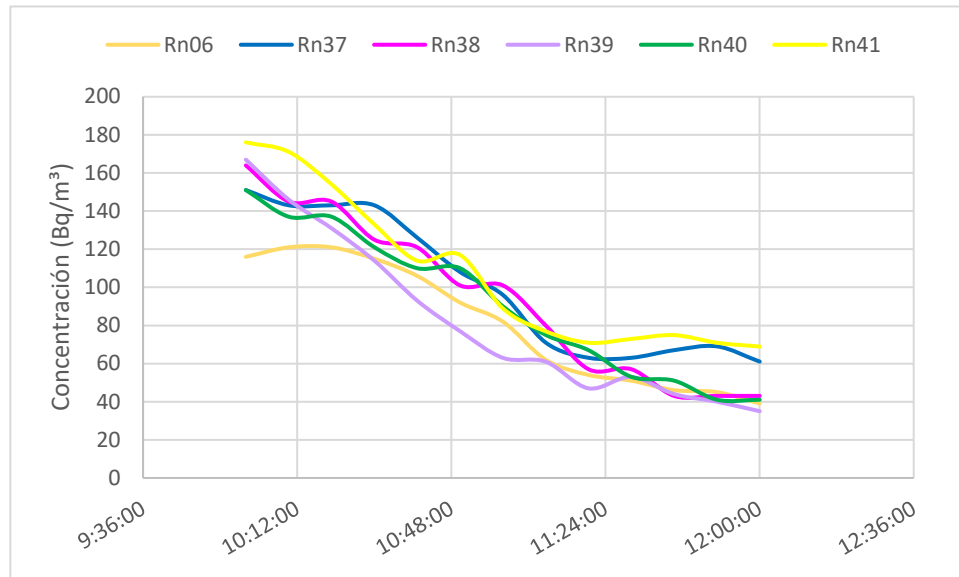


Figura 4-14 Valores de concentración de radón frente al tiempo (h) con la ventana abierta y la UTA

Se puede apreciar un gran descenso en los valores de la concentración de incluso más de 100 Bq/m³. La ventilación natural tiene la ventaja de verse favorecida por los factores meteorológicos, ya que con viento puede introducir más cantidad de aire en el interior del despacho.

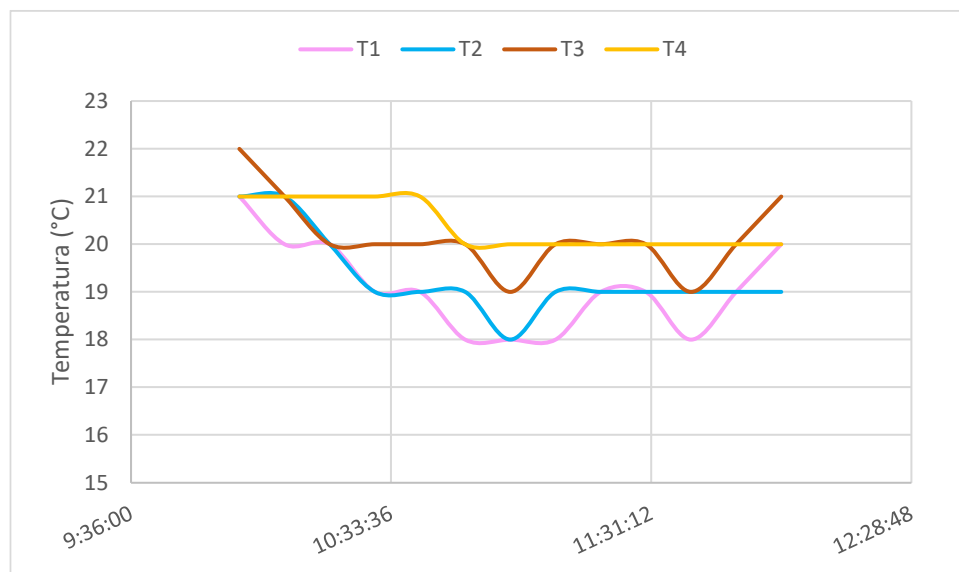


Figura 4-15 Temperatura (°C) registrada durante el tiempo (h) que estuvo la ventana abierta en el nivel 1

Igual que en la anterior etapa, este descenso de concentración se ve favorecido por el descenso de temperatura de alrededor de 2 °C (Ver Figura 4-15).

4.3 Análisis nivel 2

En esta etapa, los sensores laterales se elevan otra altura, situándose en el mismo plano que el RadonEye09. Los tramos más reseñables del nivel 2 son los siguientes:

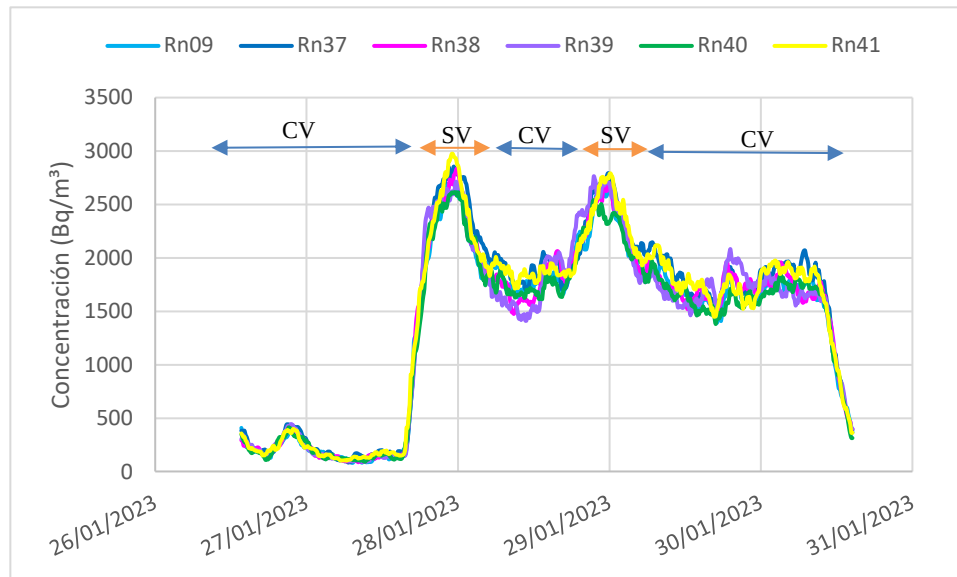


Figura 4-16 Periodo reseñable durante la primera toma de datos del nivel 2

La Figura 4-16 comienza representando datos en un periodo con la UTA encendida (CV). Al igual que en los anteriores subapartados, los valores más elevados de concentración corresponden a breves periodos en los que la UTA se ha apagado (SV), teniendo de esta forma periodos intermitentes de ventilación.

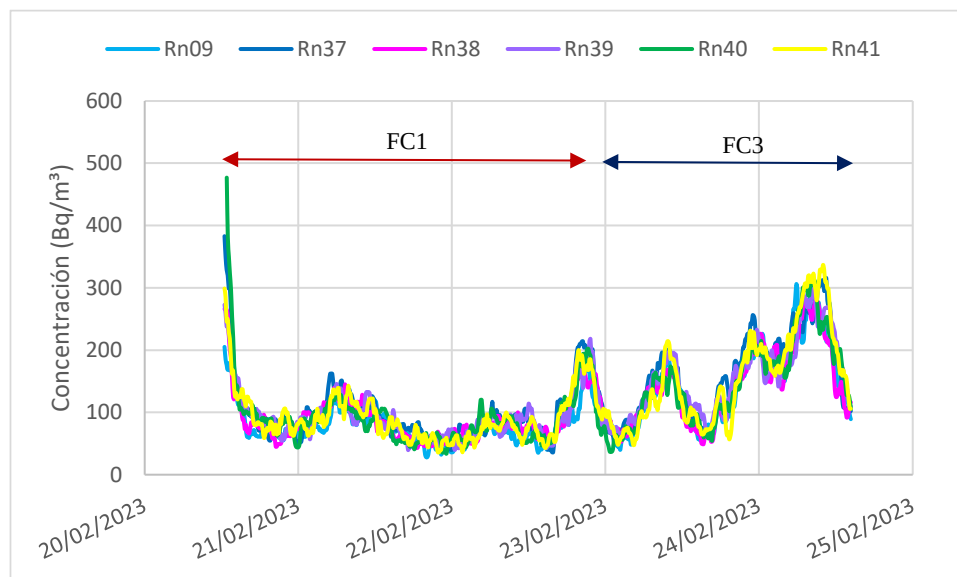


Figura 4-17 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos del nivel 2

En la Figura 4-17, se toman datos iniciales pertenecientes a la condición de ventilación del fancoil con el ventilador en posición 1 (FC1). Posteriormente, se produce un incremento de estas concentraciones a partir del día 24 de febrero cuando se cambia la velocidad del ventilador a la 3 (FC3).

En ambas imágenes, se puede observar que no hay ningún valor que destaque del resto, si no que siguen una misma tendencia.

4.3.1 Concentraciones relativas en régimen permanente

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
$C09_{SV} = 1,000$	$C09_{CV} = 1,000$	$C09_{FC1} = 1,000$	$C09_{FC3} = 1,000$
$C37_{SV} = 1,029$	$C37_{CV} = 1,052$	$C37_{FC1} = 1,135$	$C37_{FC3} = 0,893$
$C38_{SV} = 1,007$	$C38_{CV} = 0,992$	$C38_{FC1} = 0,901$	$C38_{FC3} = 0,844$
$C39_{SV} = 1,036$	$C39_{CV} = 1,025$	$C39_{FC1} = 0,928$	$C39_{FC3} = 0,666$
$C40_{SV} = 0,944$	$C40_{CV} = 0,969$	$C40_{FC1} = 1,112$	$C40_{FC3} = 0,829$
$C41_{SV} = 1,030$	$C41_{CV} = 1,000$	$C41_{FC1} = 0,974$	$C41_{FC3} = 0,957$

Tabla 7 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m³ en el nivel 2

Atendiendo a los datos presentados en la Tabla 7, se obtienen los siguientes mapas de Surfer:

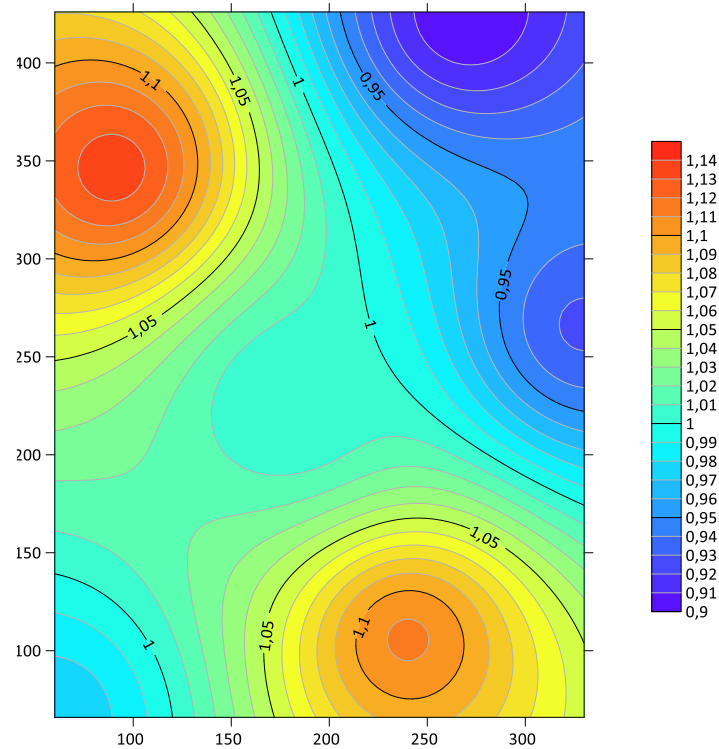


Figura 4-18 Mapa de curvas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 2

En la Figura 4-18, se determina que los focos que registran más concentración se encuentran próximos a los sensores 37 y 40, coincidiendo de esta forma con el análisis de las anteriores etapas, ya que son los medidores que registran datos más elevados de concentración.

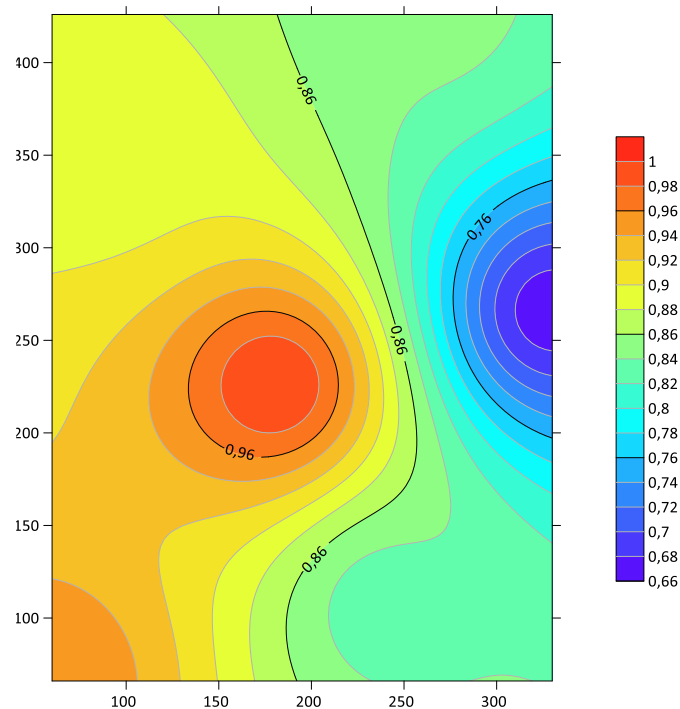


Figura 4-19 Mapa de curvas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 2

A diferencia de la anterior condición de ventilación, en la Figura 4-19, el foco se encuentra más próximo a la vertical. Esto puede ser debido a que a medida que se elevan en altura y gracias a la ventilación en la posición 3 ofrecida por el fancoil, la concentración de radón aumente en ese punto, disminuyendo así en sus proximidades.

4.3.2 Régimen transitorio

En este apartado se representan en la Tabla 8, las velocidades de arrancada y bajada, comparándolas con el RadonEye09, al pasar de un régimen sin ventilación a otro con ventilación durante la primera toma de datos:

Velocidad arrancada	Velocidad bajada
$V_{a09} = 467,36$	$V_{b09} = -232,38$
$V_{a37} = 529,24$	$V_{b37} = -289,03$
$V_{a38} = 503,39$	$V_{b38} = -214,62$
$V_{a39} = 587,47$	$V_{b39} = -212,01$
$V_{a40} = 500,52$	$V_{b40} = -225,07$
$V_{a41} = 472,85$	$V_{b41} = -261,10$

Tabla 8 Velocidades de arrancada y bajada pertenecientes al nivel 2

4.4 Análisis nivel 3 y nivel 4

Debido a que conforme se van elevando los sensores, los valores son cada vez más similares, no se aprecia una gran diferencia entre ambos niveles. Además, en estas dos etapas se han considerado que todos los datos estaban en régimen permanente, por lo que se ha realizado un análisis paralelo de ambos.

En este nivel 3, se elevan los sensores laterales a la misma altura que el RadonEye13, obteniéndose de esa forma la siguiente Figura 4-20:

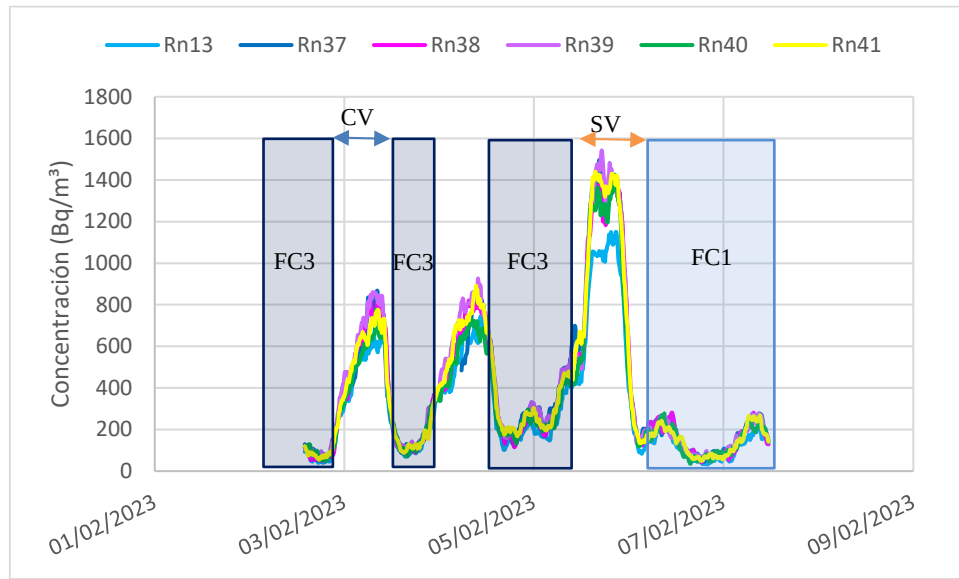


Figura 4-20 Periodo reseñable durante la primera toma de datos en el nivel 3

Este tramo representativo comienza con el fancoil en la posición 3 (FC3). Se elevan las concentraciones al apagar el fancoil y permanecer de esta forma el despacho sólo con la UTA encendida (CV). Lo mismo ocurre con el segundo pico, ya que se procede al encendido y apagado del fancoil en posición 3, favoreciendo así a la disminución y posterior aumento de estas concentraciones. El tercer máximo de la gráfica corresponde a un intervalo de tiempo en el cual se ha apagado el fancoil y la UTA, quedando así el despacho sin ventilación (SV) y alcanzándose valores muy elevados en comparación con los anteriores. El tramo finaliza con el encendido de la UTA y en fancoil con el ventilador en posición 1 (FC1), descendiendo bruscamente las concentraciones, registrando valores inferiores a los 300 Bq/m³.

A su vez, en el nivel 4 se han elevado los sensores a la última altura, la más próxima al falso techo, de forma que el RadonEye15 es el medidor de referencia en este nivel. En la Figura 4-21, se muestra el tramo más característico de este nivel:

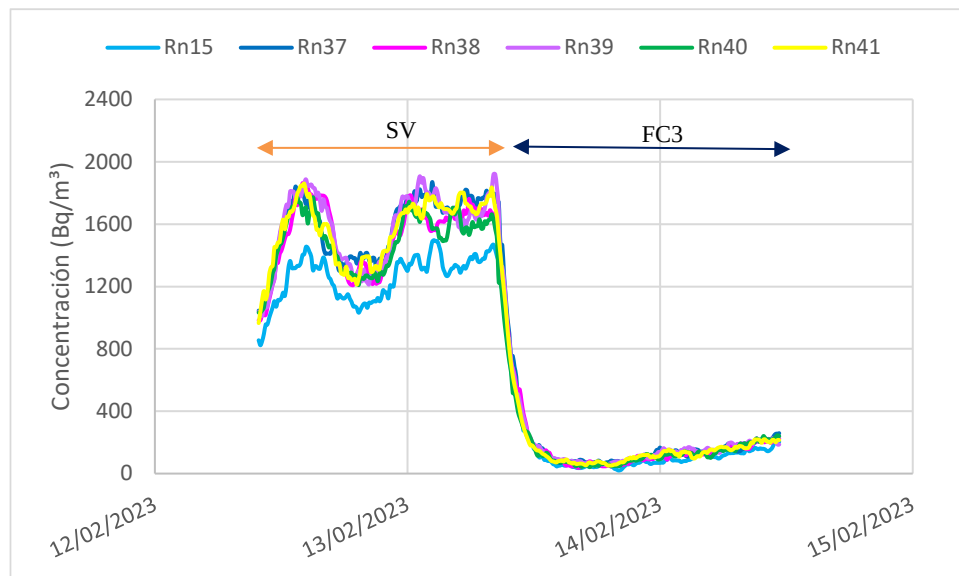


Figura 4-21 Periodo reseñable durante la segunda toma de datos en el nivel 4

Este periodo se caracteriza por pasar de un estado sin ventilación (SV), en el que se elevan las concentraciones, para proceder al encendido de la UTA y el fancoil en posición 3 (FC3), provocando que las concentraciones de radón descieran alrededor de una cuarta parte.

4.4.1 Concentraciones relativas en régimen permanente

A continuación, se muestran en la Tabla 9 los datos pertenecientes a las concentraciones relativas del nivel 3:

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
$C13_{SV} = 1,000$	$C13_{CV} = 1,000$	$C13_{FC1} = 1,000$	$C13_{FC3} = 1,000$
$C37_{SV} = 1,188$	$C37_{CV} = 1,319$	$C37_{FC1} = 1,225$	$C37_{FC3} = 1,204$
$C38_{SV} = 0,957$	$C38_{CV} = 1,194$	$C38_{FC1} = 1,282$	$C38_{FC3} = 1,204$
$C39_{SV} = 1,202$	$C39_{CV} = 1,234$	$C39_{FC1} = 1,250$	$C39_{FC3} = 1,145$
$C40_{SV} = 0,825$	$C40_{CV} = 1,107$	$C40_{FC1} = 1,194$	$C40_{FC3} = 1,036$
$C41_{SV} = 1,307$	$C41_{CV} = 1,235$	$C41_{FC1} = 1,254$	$C41_{FC3} = 1,143$

Tabla 9 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m3 en el nivel 3

A partir de estos valores, se obtienen los mapas de Surfer más característicos (Ver Figura 4-22 y Figura 4-23):

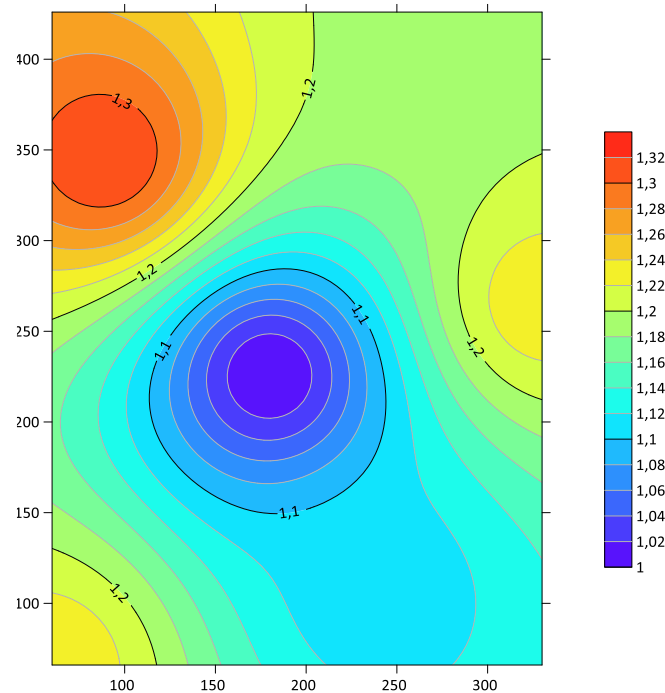


Figura 4-22 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 3

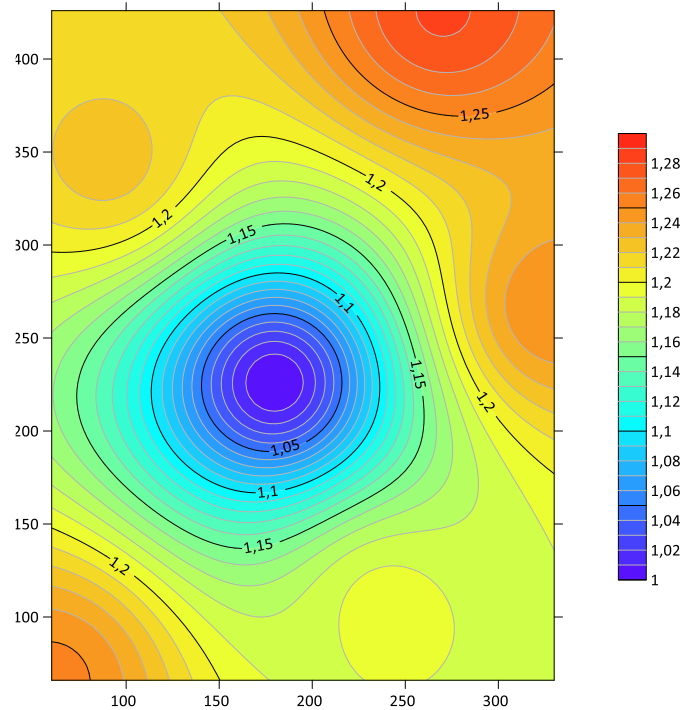


Figura 4-23 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 3

En ambas figuras, el foco más próximo a la vertical es el que registra menores concentraciones, obteniendo un creciente aumento en los extremos del despacho.

Con respecto al nivel 4, se obtienen las siguientes concentraciones, mostradas en la Tabla 10, y posterior mapa (Ver Figura 4-24):

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
C15 _{SV} = 1,000	C15 _{CV} = 1,000	C15 _{FC1} = 1,000	C15 _{FC3} = 1,000
C37 _{SV} = 1,273	C37 _{CV} = 1,536	C37 _{FC1} = 1,327	C37 _{FC3} = 1,194
C38 _{SV} = 1,320	C38 _{CV} = 1,517	C38 _{FC1} = 1,229	C38 _{FC3} = 1,094
C39 _{SV} = 1,447	C39 _{CV} = 1,473	C39 _{FC1} = 1,159	C39 _{FC3} = 1,178
C40 _{SV} = 1,086	C40 _{CV} = 1,480	C40 _{FC1} = 1,059	C40 _{FC3} = 0,973
C41 _{SV} = 1,261	C41 _{CV} = 1,443	C41 _{FC1} = 1,095	C41 _{FC3} = 1,104

Tabla 10 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m3 en el nivel 4

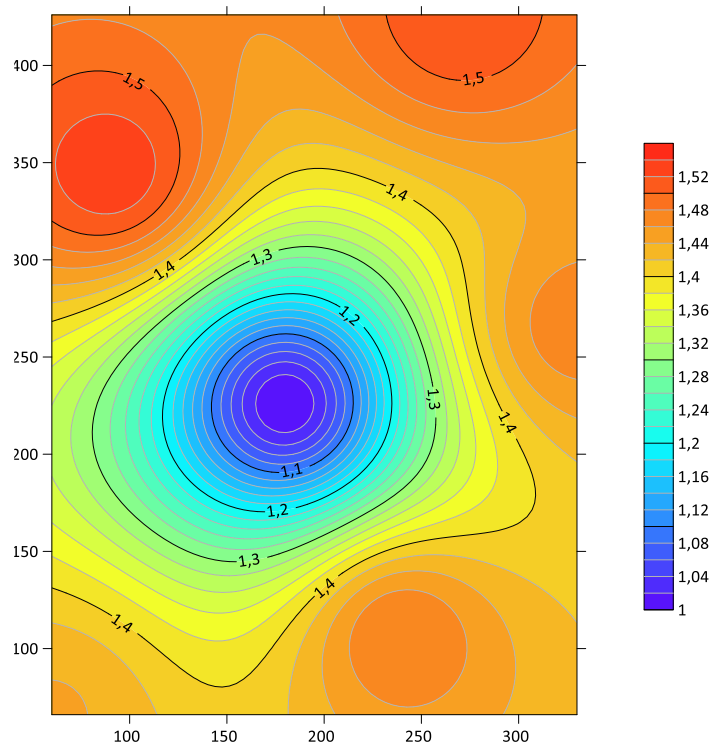


Figura 4-24 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 4

En este nivel, todos los sensores laterales se encuentran a la máxima altura, siendo el RadonEye15 de la vertical el de referencia. Como se puede observar en la Figura 4-24, la concentración de todos los sensores laterales es homogénea, destacando notablemente la del sensor de referencia. Esto es debido a que este sensor está situado justo debajo de la salida del aire, por tanto, debe ser el sensor que menos concentración registra.

4.5 Análisis de la vertical

En el presente apartado, sólo se analizan los sensores verticales, que han estado fijos durante toda la fase de muestreo, y por tanto su sensor de referencia es el RadonEye05, situado en el suelo. Estos medidores han registrado indistintamente todas las condiciones de ventilación, por lo que a continuación, se muestra en la Figura 4-25 uno de sus periodos más significativos:

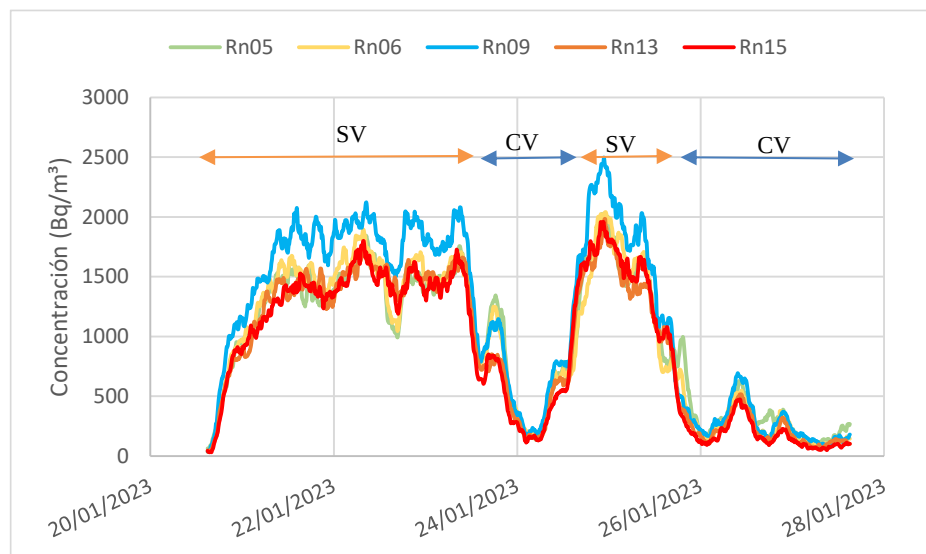


Figura 4-25 Periodo significativo en la vertical durante el muestreo

La Figura 4-25 corresponde a dos condiciones de ventilación: sin ventilación (SV) y con ventilación (CV). De esta forma, se comienza la representación en un tramo en el que la UTA se encuentra apagada, encendiéndola en dos ocasiones, tal y como se puede apreciar en la gráfica cuando se registran los valores más bajos. A diferencia de los sensores laterales, no hay ningún dispositivo que destaque del resto, si no que todos siguen una misma tendencia, registrando las concentraciones más bajas el sensor que está situado a más altura, el RadonEye15.

4.5.1 Concentraciones relativas en régimen permanente

Sin Ventilación	Con Ventilación	Fancoil 1	Fancoil 3
C05 _{SV} = 1,000	C05 _{CV} = 1,000	C05 _{FC1} = 1,000	C05 _{FC3} = 1,000
C06 _{SV} = 0,991	C06 _{CV} = 1,015	C06 _{FC1} = 0,919	C06 _{FC3} = 1,025
C09 _{SV} = 1,057	C09 _{CV} = 1,221	C09 _{FC1} = 1,141	C09 _{FC3} = 1,178
C13 _{SV} = 1,068	C13 _{CV} = 0,954	C13 _{FC1} = 0,890	C13 _{FC3} = 1,012
C15 _{SV} = 1,159	C15 _{CV} = 1,032	C15 _{FC1} = 0,941	C15 _{FC3} = 1,038

Tabla 11 Concentraciones relativas en régimen permanente en Bq/m3 en la vertical

En la Tabla 11, se muestran valores muy próximos entre sí, indistintamente de la condición de ventilación en la que se encuentren. Se decide comprobar cómo han evolucionado los datos conforme pasa el tiempo en la condición de con ventilación y fancoil en posición 3. Se observa que los valores de la vertical presentan una tendencia lineal, sin apenas dispersión en sus datos, tal y como se puede ver en la Figura 4-26 y Figura 4-27 pertenecientes al RadonEye15 (el más alejado al sensor de referencia de la vertical):

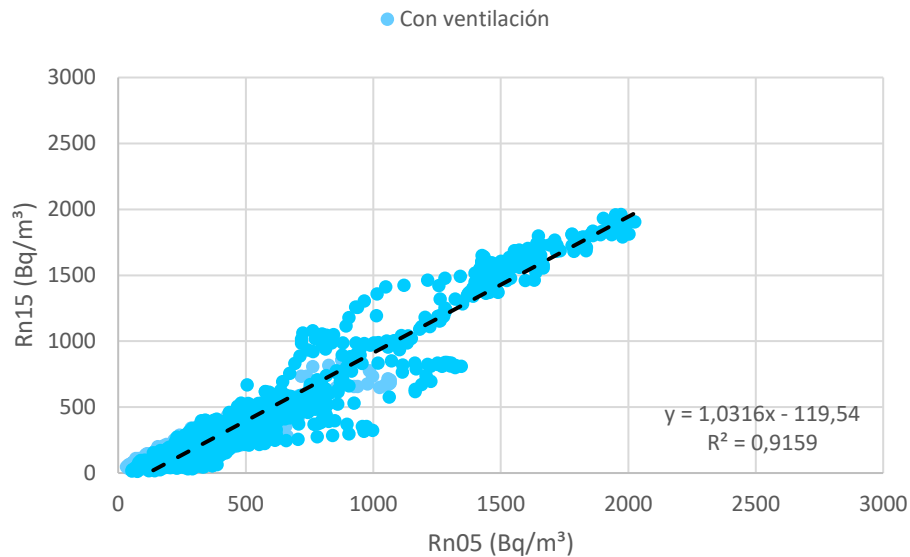


Figura 4-26 Concentraciones RadonEye15 frente al RadonEye05 en condición con ventilación. Vertical

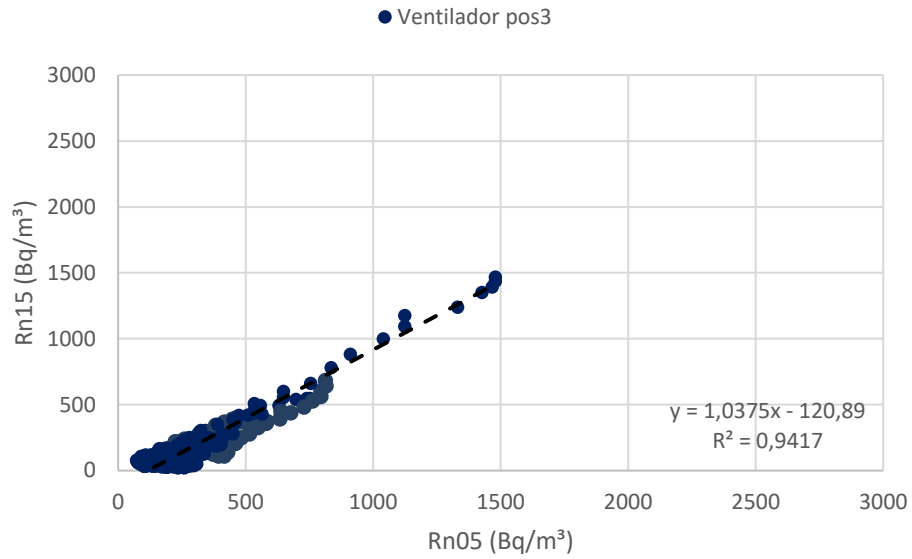


Figura 4-27 Concentraciones RadonEye15 frente al RadonEye05 con el fancoil en posición 3. Vertical

En estas dos imágenes, se muestran dos condiciones de ventilación distintas y se observa que tanto la pendiente de las rectas de ambas gráficas como su coeficiente de determinación es muy próximo a 1, por lo que se puede afirmar que siguen una progresión lineal.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente TFG se ha profundizado en el comportamiento de gas radón en interiores. Se han medido experimentalmente las variaciones de la concentración de radón bajo diferentes escenarios de ventilación y se ha estudiado su distribución espacial. Para ello, durante tres meses, se ha efectuado una medición continua de las condiciones del despacho 114 del edificio del CUD, variando una serie de parámetros durante diferentes intervalos de tiempo con la finalidad de observar las fluctuaciones producidas en las concentraciones registradas. A partir de los datos analizados, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Durante el tiempo que ha durado la toma de datos, se ha podido observar que en muchas ocasiones se han alcanzado valores muy por encima de la normativa vigente (300 Bq/m^3), llegando incluso a las concentraciones máximas que permite medir el RadonEye RD200 (3700 Bq/m^3).
2. En la condición de sin ventilación, los valores registrados son muy superiores con respecto al resto de escenarios. Por tanto, a partir de este análisis se determina que la ventilación es un factor crucial para la disminución de la tasa de concentración de radón. Al establecer las condiciones de ventilación prioritarias, se puede determinar que las concentraciones de radón disminuyen a los valores permitidos según la normativa cuando se dispone de la UTA encendida en el interior del despacho y el fancoil en la posición 1 o 3. Gracias a la introducción de aire fresco en el despacho, se facilita el movimiento del gas radón en la habitación, por lo que disminuyen considerablemente los valores. Además, como consecuencia de las mediciones realizadas con la ventana abierta, se comprueba que combinando la ventilación natural y la artificial, proporcionada por la UTA y el fancoil, la concentración de radón en el interior disminuye con más rapidez. Esto puede verse favorecido por las condiciones meteorológicas existentes en el exterior que, debido a factores como el viento, se introduce más cantidad de aire renovado en el interior. También se concluye que, con la UTA encendida únicamente, los valores siguen siendo más elevados que los permitidos, por lo que se debe encender junto con el fancoil para estar dentro de los márgenes establecidos de concentración.
3. A partir de los datos obtenidos en el plano horizontal, se encuentran valores muy elevados en los RadonEye37 y RadonEye40. Esto puede ser debido a un fallo en el suelo del despacho, pudiendo ser una grieta o fisura que permite la filtración de mayor cantidad de radón al interior de la estancia. De esta forma, se establece que los principales focos de inmisión de radón están situados en esas posiciones, corroborando los puntos obtenidos en un TFG anterior [17].

4. Se han establecido las bases para la obtención de un modelo numérico que permita optimizar el uso de la ventilación.

Las conclusiones obtenidas en este apartado permiten avanzar con la línea de investigación llevada a cabo en el CUD-ENM. El objetivo es la optimización del sistema de ventilación para conseguir limitar la presencia de radón con un consumo energético mínimo.

5.2 Líneas futuras

A partir del estudio realizado y de las conclusiones adoptadas, se recomienda llevar a cabo las siguientes líneas futuras de investigación:

1. Continuar el presente estudio, obteniendo datos que comprendan periodos de sin ventilación a periodos con ventilación con el fancoil en posición 1 y el fancoil en posición 3, con el fin de obtener las velocidades de bajada en todas las condiciones de ventilación.
2. Estudiar los cambios producidos con el fancoil en la posición 2, determinando de esta forma la condición de ventilación que permita mantener los niveles más bajos de radón en el despacho.
3. Realizar un estudio en el que se analice el tiempo necesario que debe estar la ventilación encendida para que las concentraciones de radón en el interior del despacho se mantengan en los niveles permitidos.
4. Elaborar un estudio económico del coste que supone mantener la ventilación encendida durante el tiempo obtenido en el anterior punto, así como climatizar el aire exterior introducido en la estancia. Estos puntos se proponen con el objetivo de favorecer la eficiencia energética y económica del Centro Universitario de la Defensa.
5. Realizar la investigación en otros edificios transitados de la ENM, como el Isaac Peral o el cuartel de alumnos Francisco Moreno, analizando si se cumple la normativa y, en caso de obtener valores tan elevados como en el despacho 114, aplicar medidas de mitigación que corrijan este hecho.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Radón y cáncer,» [En línea]. Available: <https://www.cancer.org/es/saludable/causas-del-cancer/sol-y-otras-formas-de-radiacion/radon.html>. [Último acceso: 20 enero 2023].
- [2] EPA, «Riesgos para la salud,» Agencia de Protección Ambiental, [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/cai/riesgos-para-la-salud>. [Último acceso: 10 febrero 2023].
- [3] «Radon Control Services,» [En línea]. Available: <https://www.radoncontrol.es/dia-europeo-del-radon-2020/>. [Último acceso: 15 febrero 2023].
- [4] «El motivo por el que aumenta el cáncer de pulmón en mujeres no fumadoras,» *20 minutos*, 15 noviembre 2022.
- [5] «La UE expedienta a España por no aprobar la normativa sobre el gas radón,» *El País*, 28 noviembre 2019.
- [6] I. Fernández, «El control de España sobre el radón llega "tarde" y sin plan nacional,» *Redacción Médica*, 14 octubre 2022.
- [7] E. González, «La lucha contra el gas radón sigue siendo la asignatura pendiente,» *El Confidencial*, 11 enero 2022.
- [8] M. J. Berenguer Sublis, «Radón en ambientes interiores,» [En línea]. Available: https://www.insst.es/documents/94886/326962/ntp_440.pdf/3700e855-5f14-459e-9790-305bef11e26e. [Último acceso: 10 febrero 2023].
- [9] M. Acosta Sabater, «Desarrollo de una metodología para medir la exhalación de radón mediante la utilización de detectores de trazas,» 2021. TFM [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/172881/Acosta%20-%20Desarrollo%20de%20una%20metodologia%20para%20medir%20la%20exhalacion%20de%20radon%20mediante%20la%20utilizacion%20....pdf?sequence=1>. [Último acceso: 26 enero 2023].
- [10] OMS, «El radón y sus efectos en la salud,» Organización Mundial de la Salud, 2 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health#:~:text=Se%20produce%20por%20desintegraci%C3%B3n%20radiactiva,y%20emite%20otras%20part%C3%ADculas%20radiactivas..> [Último acceso: 25 enero 2023].

- [11] C. Lázaro Benavides, «Evaluación de factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores,» 2021. TFG [En línea]. Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 15 enero 2023].
- [12] RadonAlfa, «Cómo saber si hay gas radón en una casa,» 2 julio 2019. [En línea]. Available: <https://radonalfa.com/como-saber-gas-radon-casa/>. [Último acceso: 10 febrero 2023].
- [13] G. Muñoz Yébenes, «Análisis preliminar de la presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar,» 2019. TFG [En línea]. Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 15 marzo 2023].
- [14] Á. García Denia, «Medición de la concentración del radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación,» 2020. [En línea]. TFG Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 01 marzo 2023].
- [15] P. Cardenal Echevarría, «Análisis matemático de las variables geofísicas que afectan a la concentración de radón en el interior de la ENM,» 2022. [En línea]. TFG Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 20 marzo 2023].
- [16] S. Rojo Rodríguez, «Evaluación experimental de un sistema de ventilación mecánica controlada para minimizar la concentración de radón en un despacho del CUD-ENM,» 2022. TFG [En línea]. Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 03 febrero 2023].
- [17] A. Marín Alonso, «Caracterización de los principales focos de inmisión de gas radón en despachos de la planta baja del CUD,» 2022. [En línea]. TFG Available: <http://calderon.cud.uvigo.es/discover?scope=%2F&query=lazaro&submit=>. [Último acceso: 15 enero 2023].
- [18] Lenntech, «Propiedades químicas del radón. Efectos del radón sobre la salud. Efectos ambientales del radón,» Lenntech, [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/rn.htm>. [Último acceso: 17 enero 2023].
- [19] B. Frutos Vázquez, «Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones,» 2009. Tesis [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/22535/>. [Último acceso: 30 enero 2023].
- [20] ISG, «¿Qué es el radón?,» Instituto para la Salud Geoambiental, [En línea]. Available: https://www.saludgeoambiental.org/informacion-general-sobre-el-radon/?gclid=Cj0KCQiAq5meBhCyARIsAJrtDr6HTwKThfJ9r39ME9bMWUJS2RxyV1HsDyS87aDsXVj9NSiiAvfHdqsaAmb6EALw_wcB. [Último acceso: 26 enero 2023].
- [21] P. Villaverde Liñares, «Siete preguntas claves sobre el radón,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.riarte.es/bitstream/handle/20.500.12251/1249/DEPLANO%20038%20JUL-18.%20pp.%2012-16.%20Siete%20preguntas%20clave%20sobre%20el%20rad%C3%B3n%20%28Parte%20I%29.%20Introducci%C3%B3n%20al%20rad%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 15 enero 2023].
- [22] M. Seisdedos Domínguez, *Mapa del riesgo de exposición al gas radón en las viviendas de la comunidad de Madrid*, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2016.

- [23] J. García Tobar, «Estudio del radón en viviendas mediante modelos de minería de datos basados en cubos olap,» 2016. Tesis [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/40156/>. [Último acceso: 11 enero 2023].
- [24] J. E. Viola Nevado, «Dominios litológicos de la península ibérica,» 17 marzo 2020. [En línea]. Available: http://enriqueviolanevado.blogspot.com/2020/03/ejercicio-practico-de-geografia-de_63.html. [Último acceso: 13 enero 2023].
- [25] M. García-Talavera San Miguel, J. L. Martín Matarranz, R. Gil de Mingo, J. P. García Cardieno y E. Suárez Mahou, «El mapa predictivo de exposición al radón en España,» CSN, 2013. [En línea]. Available: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04-31%20El%20mapa%20predictivo%20de%20exposici%C3%B3n%20al%20rad%C3%B3n%20En%20Espa%C3%B1a>.
- [26] «Portal de suelos de la FAO,» Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [En línea]. Available: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.
- [27] M. Fuente Lastra, «Puesta a punto de un sistema de medida de radón en agua aplicado al estudio de acuíferos,» 2015. TFG [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/7113>. [Último acceso: 20 febrero 2023].
- [28] B. Piedecausa García y S. Chinchón-Payá, «Radioactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón,» 2011. [En línea]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27056/1/Radiactividad%20natural%20de%20los%20materiales%20de%20construcci%C3%B3n_Parte%202.pdf. [Último acceso: 15 febrero 2023].
- [29] B. Frutos Vázquez y M. Olaya Aldán, «Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protecci%C3%B3n+frente+a+la+inmisi%C3%B3n+de+gas+rad%C3%B3n+en+edificios>. [Último acceso: 20 enero 2023].
- [30] F. Maraver, C. Ródenas, A. I. Martín-Megías, I. Corvillo, I. Vázquez y F. Armijo, «Las aguas radiactivas de los balnearios españoles. Aplicaciones e indicaciones,» *Medicina naturista*, 2017.
- [31] L. S. Quindós Poncela, Radón. "Un gas radiactivo de origen natural en su casa", Cantabria.
- [32] J. A. Cárcel Carrasco, «El gas radón, un silencioso y peligroso invitado en los hogares,» 1 enero 2009. [En línea]. Available: <https://www.tecnicaindustrial.es/el-gas-radon-un-silencioso-y-peligroso-invita/>. [Último acceso: 10 febrero 2023].
- [33] J. L. Gutiérrez Villanueva, «Normativa sobre el gas radón ¿Qué niveles se aplican en España?,» Calor y frío, 24 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/rehabilitacion-de-edificios/normativa-gas-radon.html#CTE>.
- [34] CSN, «Directiva 2013/59/EURATOM,» 5 diciembre 2013. [En línea]. Available: https://www.csn.es/normativa-del-csn/normativa-ue?p_p_id=101_INSTANCE_3m7UYS0jY5X3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_101_INSTANCE_3m7UYS0jY5X3_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview. [Último acceso: 2023 febrero 11].
- [35] OMS, «Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública,» 2015. [En línea]. Available:

- https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=4FE35F04886789F124EF8F45A2B23EBF?sequence=1. [Último acceso: 11 febrero 2023].
- [36] D. Xie, Y. Wu, C. Wang, C. W. Yu, L. Tian y H. Wang, «A study on the three-dimensional unsteady state of indoor radon diffusion under different ventilation conditions,» *Elsevier*, nº 66, p. 9, 2021.
- [37] CTE, «Documento Básico HS,» [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>. [Último acceso: 11 febrero 2023].
- [38] Tripomant, «Guía Técnica RADEX,» [En línea]. Available: <https://www.tripomant.com/wp-content/uploads/2021/07/GUIA-TECNICA-GAS-RADON-02.pdf>. [Último acceso: 11 febrero 2023].
- [39] Venfilter, «RITE,» [En línea]. Available: <https://www.venfilter.es/es/normativa/rite/>. [Último acceso: 13 febrero 2023].
- [40] Sefritec, «Ventilación mecánica controlada,» [En línea]. Available: [https://sefritec.com/index.php/ventilacion-mecanica-y-purificacion-del-aire/#:~:text=La%20ventilaci%C3%B3n%20mec%C3%A1nica%20controlada%20de,aseos%2C%20lavaderos%2C%20etc.\)](https://sefritec.com/index.php/ventilacion-mecanica-y-purificacion-del-aire/#:~:text=La%20ventilaci%C3%B3n%20mec%C3%A1nica%20controlada%20de,aseos%2C%20lavaderos%2C%20etc.)). [Último acceso: 13 febrero 2023].
- [41] FDV, «Vista aérea de la Escuela Naval Militar,» *Faro de Vigo*, 23 septiembre 2021.
- [42] Armada, Catorce botones. Manual del Aspirante, 2014-2015.
- [43] H. E. Alonso Hernández, «El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales,» 2015. Tesis [En línea]. Available: <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/18553>. [Último acceso: 01 marzo 2023].
- [44] S. Gómez Anca, «Exposición al radón y enfermedades neurodegenerativas,» 2020. TFG [En línea]. Available: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/24600/2020_TFG_Medicina_Gomez_Exposicion.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 16 marzo 2023].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

A pesar de que el radón era una incógnita entre la población, cada vez son más los estudios que investigan sobre los daños que este gas genera en la salud del ser humano. En 1988 fue declarado por la IARC (Agencia Internacional de Investigación en Cáncer) como carcinógeno humano y la OMS ha indicado que se trata de un gas potencialmente peligroso debido a que es difícil de percibir sin el empleo de un equipo específico. Además, establece que el radón es la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón después del tabaco, atribuyéndole entre un 3% y 14% de muertes mundiales a causa de esta enfermedad. Gracias a esto, surgen diversos estudios que intentan encontrar una relación existente entre la exposición a este tóxico y el riesgo de sufrir otro tipo de enfermedades tales como las neurodegenerativas, sin embargo, no se llega a una conclusión firme [44].

A pesar de que se ha producido un aumento en el número de noticias, con respecto a otros años, que alertan sobre la exposición al gas radón e informan de los posibles riesgos y medidas preventivas contra él, no existe una preocupación alarmante en la sociedad actual. La mayor parte de la población no es consciente de que sus viviendas pueden contener elevadas concentraciones del gas y de las posibles implicaciones para la salud que eso supone.

La Unión Europea decide emprender en 2013 las primeras acciones contra el radón, queriendo determinar una regulación común a todos los estados miembros de la UE, por lo que la directiva 2013/59/EURATOM indicó que todos los países debían fijar un valor máximo permitido de concentración de radón, sin que superase los 300 Bq/m³. Sin embargo, no es hasta 2019 cuando España decide establecer las primeras acciones y reacciona ante este mandato, realizando una modificación en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Esta modificación consiste en la introducción de un apartado que determina que la cantidad máxima de radón permitida en interiores es de 300 Bq/m³. A causa de que España venció el plazo permitido por la Unión Europea, fue expedientada, lo que puede suponer un gasto económico en el país.

A pesar de que existen las diferentes técnicas que favorecen la reducción en la concentración de este gas, explicadas durante el transcurso del TFG, la ventilación es una de las más punteras. Desde los edificios de nueva construcción hasta los ya existentes pueden instaurar este método. Sin embargo, el uso excesivo de la ventilación para climatizar un local, implica grandes consecuencias en el medio ambiente ya que contribuye a favorecer el aumento de las emisiones de gases debido a la gran cantidad de energía eléctrica que consumen estos dispositivos, por lo que puede favorecer al calentamiento global. Además de producir efectos negativos en el medio ambiente, también influye en la economía, ya que un aumento del consumo eléctrico, implica un elevado coste.

Aunque la ventilación es una de las mejores técnicas para disminuir la concentración de gas radón en el interior de edificios, un uso excesivo de ella, empleada con la finalidad de reducir la mayor cantidad de radón posible, también puede suponer menos confort en un recinto, ya que, si se mantiene encendido el sistema de ventilación durante periodos prolongados de tiempo, puede generar temperaturas incómodas para las personas. Por tanto, se debe valorar en función del gasto energético que conlleva esta medida y de la cantidad de concentración de radón que se dispone, si se debe utilizar la climatización o no.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

A pesar de que en el transcurso del presente trabajo se ha indicado que cada vez son más las noticias, en comparación con años anteriores, que alertan sobre las causas que genera la exposición a este gas, muchos habitantes no son conscientes de la existencia de este tóxico. Espacios como por ejemplo las termas, son los lugares que más cantidades de radón exhalan y, sin embargo, a medida que transcurren los años registran más visitantes en sus instalaciones. Este hecho supone una encrucijada para estos servicios, ya que informan a sus clientes de los beneficios que aportan estas aguas, pero no alertan de los peligros que conlleva la exposición prolongada a este gas. De esta forma, si un ciudadano accede a cualquier medio de comunicación puede encontrar múltiples beneficios que aportan en la salud como mejorar el sistema metabólico o recuperación muscular y disminución de estrés entre otros. También puede encontrar aspectos negativos como la deshidratación, motivo por el cual en estas instalaciones informan sobre el tiempo máximo permitido en cada piscina en función de la temperatura del agua, pero no se informa sobre el peligro que puede suponer ser cliente semanal y estar expuesto continuamente a este gas.

Esta técnica de omitir toda la verdad puede ser beneficiosa en los sectores dedicados al público, pues el hecho de exaltar los aspectos positivos sin mencionar los negativos implica que el ciudadano invierta dinero en su negocio creyendo que no sufre ningún tipo de riesgo, lo que supone una falta de moral debido a obtener lucro gracias a la desinformación del cliente. Esto puede ser extrapolable a diferentes negocios como por ejemplo el sector inmobiliario, ya que, si el comprador no se interesa en exigir informes que indican la tasa de exhalación de radón a la hora de comprar una vivienda, el vendedor omite ese dato, a pesar de saber que hay zonas más propensas a tener unas concentraciones más elevadas, ya sea por la zona en la que estén ubicadas o por el material del que estén construidas.

El inadecuado comportamiento ético tiene diferentes implicaciones en la vida de las personas, que puede derivar en riesgos sanitarios hasta incluso en el ámbito económico. Es importante informar de todas las repercusiones que supone un producto, sobre todo cuando puede suponer un factor de vital importancia en la salud como es el caso del radón.

Debido al desconocimiento que existe en la actualidad acerca del comportamiento de este gas, se debe contribuir a fomentar la visibilidad del radón. Una forma de concienciar más a la sociedad es que personal cualificado y experto en la materia imparta charlas por los centros formativos, dando a conocer los diferentes estudios realizados y las conclusiones obtenidas en ellos. Además, desde el punto de vista político, se podrían destinar fondos a campañas de mitigación, con el fin de alertar a los ciudadanos, de manera más visible, acerca de los peligros que conlleva una exposición continua de este gas.

ANEXO III: MAPAS DE CURVAS OBTENIDOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DURANTE EL MUESTREO

NIVEL SUELO:

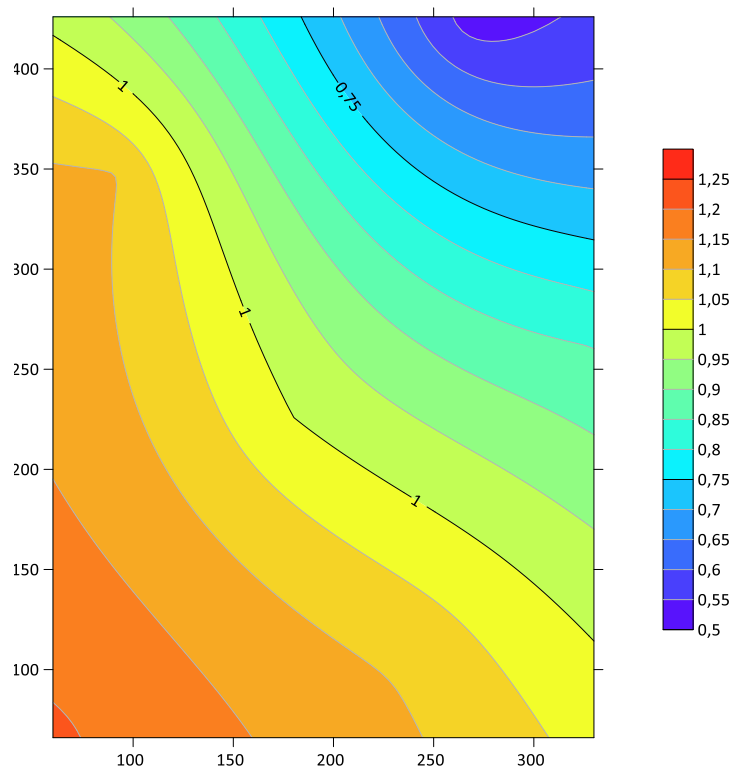


Figura 0-1 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel suelo

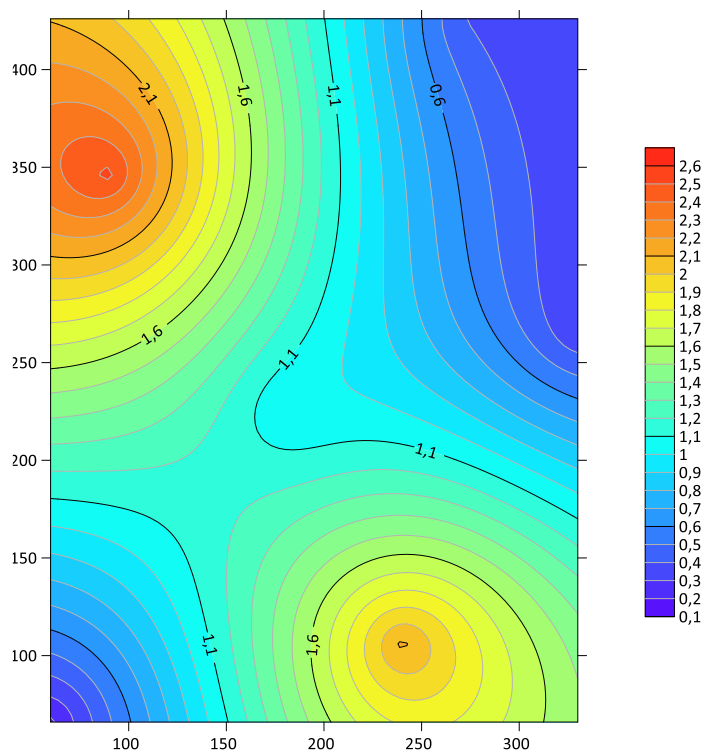


Figura 0-2 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en
posición 1 en el nivel suelo

NIVEL 1:

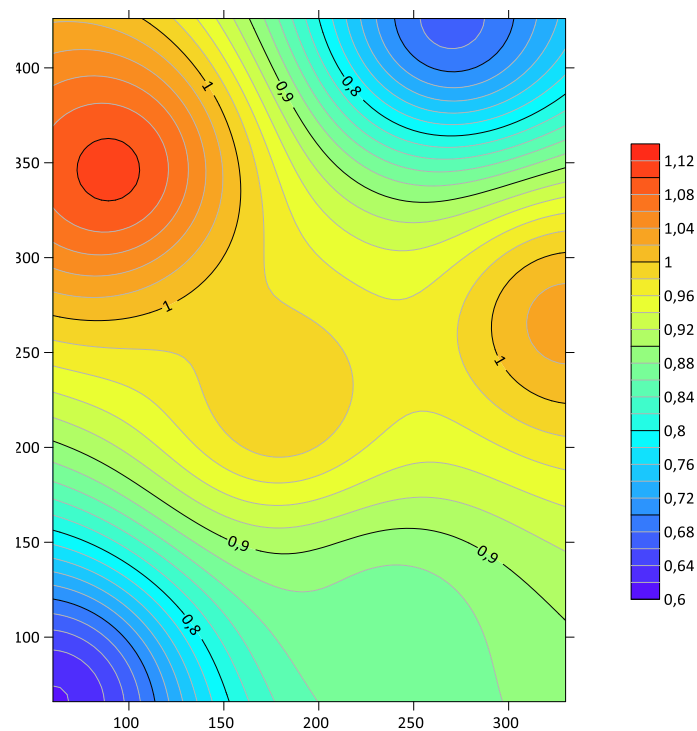


Figura 0-3 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 1

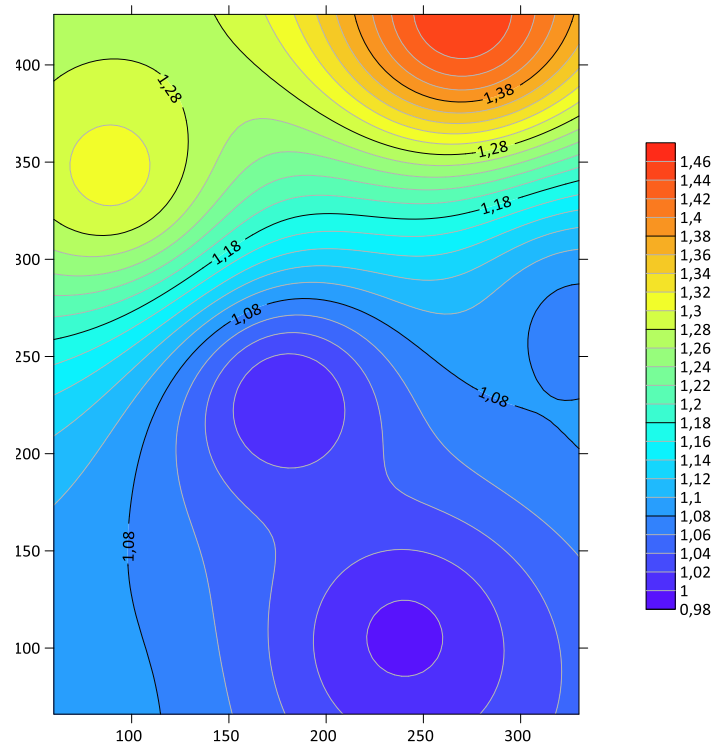


Figura 0-4 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 1

NIVEL 2:

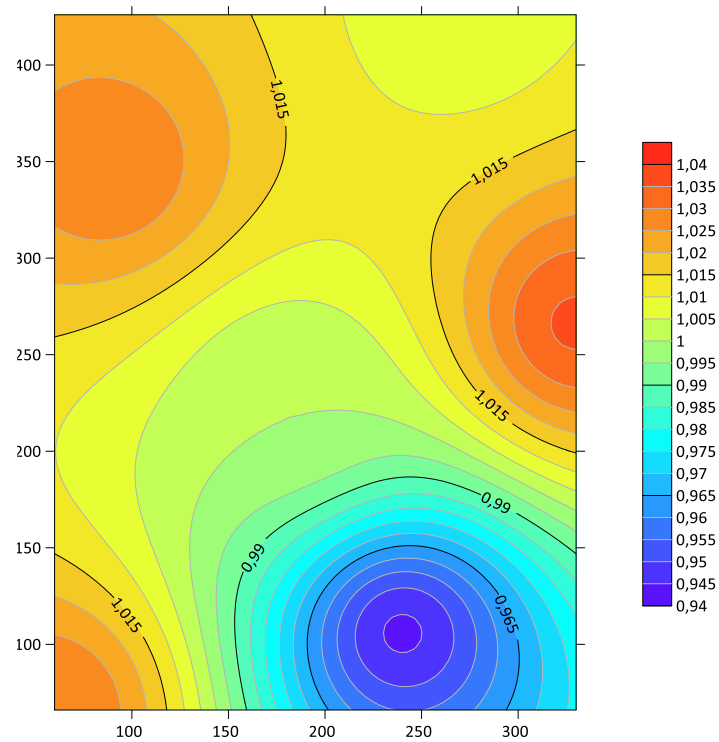


Figura 0-5 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 2

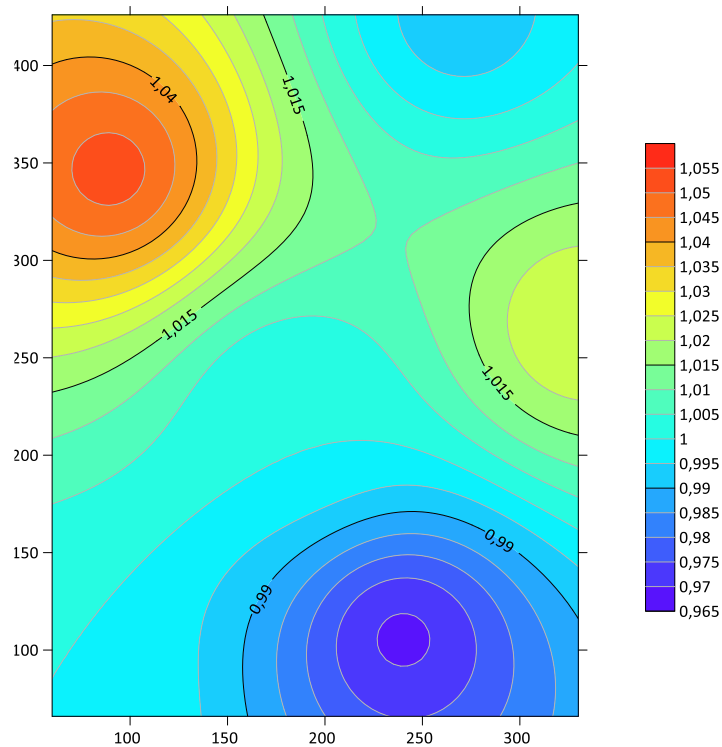


Figura 0-6 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de con ventilación en el nivel 2

NIVEL 3:

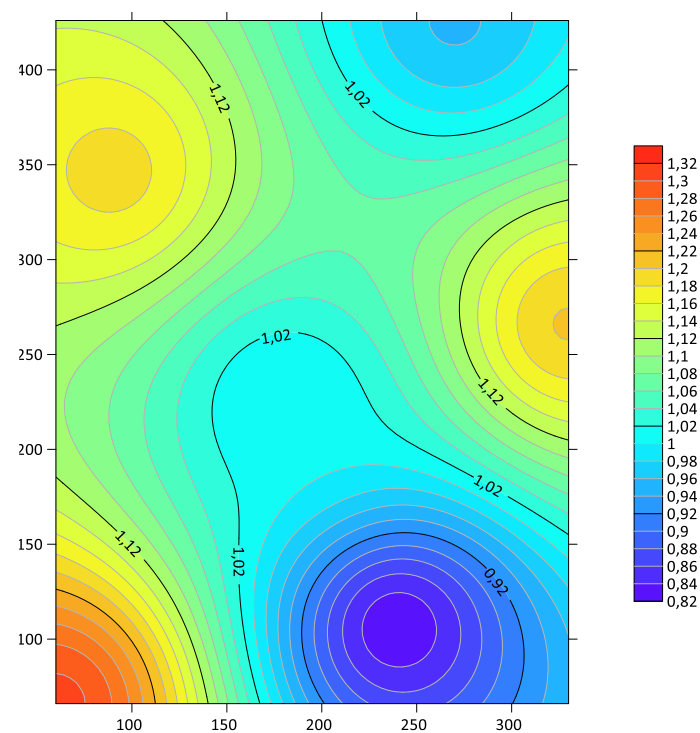


Figura 0-7 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 3

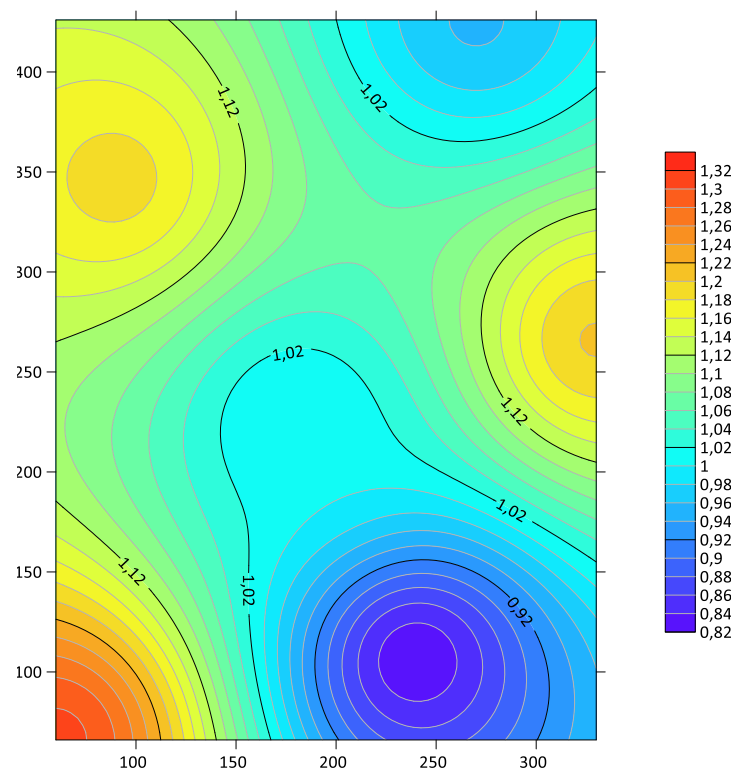


Figura 0-8 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 3

NIVEL 4:

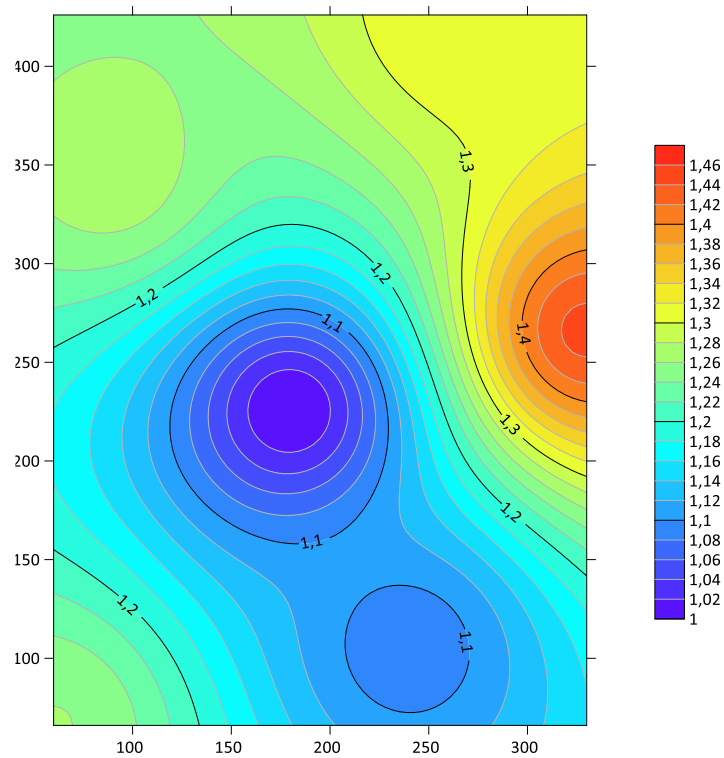


Figura 0-9 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de sin ventilación en el nivel 4

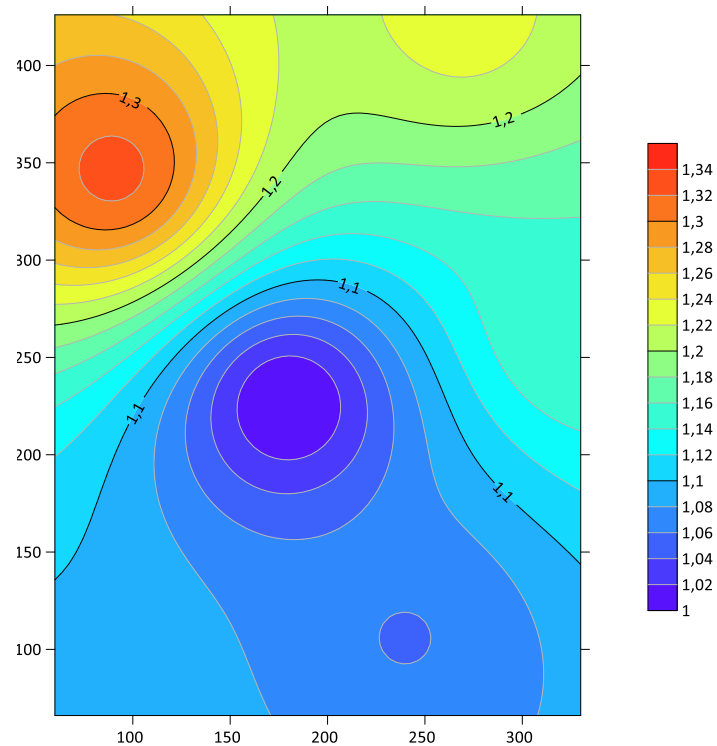


Figura 0-10 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 1 en el nivel 4

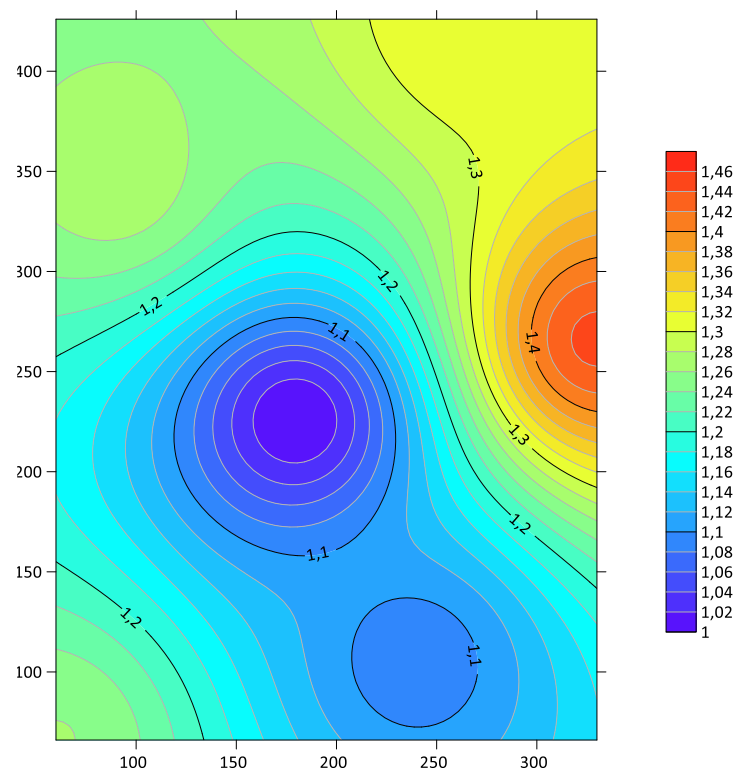


Figura 0-11 Mapa de curvas de concentraciones relativas para la condición de ventilación con el fancoil en posición 3 en el nivel 4