



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la
Escuela Naval Militar*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Guillermo Muñoz Yébenes

DIRECTORES: Arturo González Gil

Miguel Ángel Gómez Rodríguez

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la
Escuela Naval Militar*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La presencia de gas radón en un ambiente cerrado, como es el interior de un edificio, puede llegar a ser perjudicial para la salud humana provocando cáncer de pulmón. El simple hecho de estar situado en una ubicación u otra, puede suponer una alta exposición a dicho gas debido a la composición del subsuelo presente en la zona. Por tanto, una adecuada protección en edificios será indispensable para mitigar la entrada de flujo de radón.

En este Trabajo de Fin de Grado se investiga sobre las técnicas de protección frente a este gas, en función de si el edificio es de nueva construcción o ya construido. Además, este trabajo consta de una fase experimental donde se emplean detectores de radón para analizar si los edificios de la Escuela Naval Militar, y en más en detalle el cuartel Marqués de la Victoria, están expuestos a la presencia de este gas.

Por último, se concluye que los edificios estudiados poseen una alta concentración de radón en su interior, especialmente en su planta baja. Además, en el caso del Marqués de la Victoria, se añade una propuesta de protección frente al radón en las plantas que sirven de residencia para los alumnos.

PALABRAS CLAVE

Medición de concentración de radón, detectores de radón, protección frente al radón, normativa.

AGRADECIMIENTOS

Tras los cinco años en la Escuela Naval Militar, cierro una etapa en mi vida en la que me gustaría agradecer a aquellas personas que me han transmitido conocimientos y me han servido de inspiración y motivación para mi futuro.

A mi tutor de Trabajo de Fin de Grado, Arturo, por su colaboración, ayuda y consejo ante los momentos de duda.

A mi familia, que me ha influenciado profundamente en mi personalidad y carácter, y que ha sido, es y será un referente constante el resto de mi vida.

Y por supuesto, a la Promoción 419-149, por su extraordinario apoyo continuo, sobre todo en los momentos más arduos.

“Hoy no es día de mojar la pólvora”.

CONTENIDO

Contenido.....	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción a la problemática del Radón en la edificación.....	6
1.1.1 Qué es el Radón (Rn)	7
1.1.2 Riesgos para el ser humano	8
1.1.3 Principales fuentes de radón	9
1.1.4 Movilidad del radón	11
1.1.5 Penetración y acumulación del radón en espacios habitados	14
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos.....	18
1.4 Estructura de la memoria	18
2 Estado del arte	20
2.1 Normativa del radón	20
2.1.1 Perspectiva histórica de la problemática del radón	20
2.1.2 Normativa en vigor.....	21
2.1.3 Comparativa con otros países	23
2.2 Equipos de medida	24
2.2.1 Clasificación de las técnicas	24
2.2.2 Equipos de medición	25
2.3 Medidas de protección en edificaciones de nueva construcción.....	25
2.3.1 Barreras de protección.....	25
2.3.2 Sistemas de presurización.....	26
2.3.3 Sistemas de extracción	27
2.4 Medidas de protección en edificaciones existentes.....	29
2.4.1 Ventilación.....	29
2.4.2 Arquetas exteriores.....	30
2.4.3 Barreras de protección.....	30
2.4.4 Extracción exterior	31
2.5 Comparativa de medidas de protección contra el radón.....	31
3 Desarrollo del TFG.....	33
3.1 Descripción del edificio Marqués de la Victoria.....	33
3.2 Descripción de la metodología y equipos empleados	34

3.2.1 Elección del equipo (3 de diciembre – 13 de diciembre)	34
3.2.2 Descripción del equipo	36
3.2.3 Pruebas previas (11 de enero – 15 de enero)	37
3.2.4 Descripción de la metodología.....	38
3.2.5 Fase de muestreo	38
3.2.6 Fase de medición y de estimación del promedio anual de concentración de radón.....	45
4 Resultados.....	46
4.1 Resultados de las mediciones del Cuartel Marqués de la Victoria	46
4.1.1 Fase 1 (18 de enero – 25 de enero)	47
4.1.2 Fase 2 (25 de enero – 1 de febrero).....	49
4.1.3 Fase 3 (1 de febrero – 8 de febrero)	51
4.1.4 Fase 4 (8 de febrero – 15 de febrero)	52
4.1.5 Mediciones durante un largo periodo de tiempo (18 de enero – 15 de febrero).....	54
4.1.6 Análisis por planta.....	56
4.1.7 Efectos de las condiciones meteorológicas.....	60
4.2 Resultados de las mediciones de otros edificios de la ENM	64
5 Propuestas de actuación.....	68
6 Conclusiones y líneas futuras.....	70
6.1 Conclusiones	70
6.2 Líneas futuras.....	71
7 Bibliografía	73
Anexo I: Concentración de uranio en las rocas más habituales	76
Anexo II: Referencia catastral	77
Anexo III: Clasificación de municipios.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Situación de radón (Rn) en la tabla periódica [5].....	7
Figura 1-2 Cadena de desintegración del Uranio [6].....	8
Figura 1-3 Contribución de las fuentes de exposición de radiación natural y artificial – Elaboración propia	8
Figura 1-4 Principales fuentes de radón – Elaboración propia	9
Figura 1-5 Fenómeno de convección en el suelo terrestre [6]	12
Figura 1-6 Fenómeno de exhalación de radón al aire [6]	13
Figura 1-7 Cómo entra el radón en una vivienda [12].....	14
Figura 1-8 Mapa más reciente de concentración de radón (2017) [14].....	15
Figura 1-9 Zonas con potencial de radón ($P_{90} > 300 \text{ Bq/m}^3$) [14]	16
Figura 1-10 Zonificación por municipio [14]	16
Figura 1-11 Concentración potencial de radón en Galicia [14]	17
Figura 1-12 Mapa de exposición al radón de la provincia de Pontevedra [6].....	18
Figura 2-1 Evolución de la influencia del radón en la sociedad – Elaboración propia	20
Figura 2-2 Partes implicadas que participan en un programa contra el radón [19].....	22
Figura 2-3 Sistema de barrera de protección de radón bajo solera [28]	26
Figura 2-4 Operario instalando barrera de protección de radón [29]	26
Figura 2-5 Sistema de presurización mediante bulbo de presiones bajo edificio [28].....	27
Figura 2-6 Sistema de extracción forzada bajo edificio [28]	27
Figura 2-7 Arqueta de captación con ladrillo perforado [6]	28
Figura 2-8 Cámara de forjado sanitario [13].....	28
Figura 2-9 Extracción forzada en sótano [28].....	29
Figura 2-10 Instalación de arqueta exterior [28]	30
Figura 2-11 Sistema de barrera de protección de radón sobre solera [28].....	30
Figura 2-12 Sistema de captación por exterior [28]	31
Figura 2-13 Efectividad de las técnicas de actuación contra radón [28]	31
Figura 3-1 Ubicación general del Marqués de la Victoria en la ENM – Google Earth.....	33
Figura 3-2 Vista aérea del edificio – Google Earth.....	34
Figura 3-3 Planta del edificio – ENM.....	34
Figura 3-4 Pantalla principal de la aplicación – Figura propia	36
Figura 3-5 Gráfica generada por la aplicación tras el paso de varias horas – Figura propia	37
Figura 3-6 Fases de la metodología a seguir – Elaboración propia.....	38
Figura 3-7 Calendario de toma de medidas – Elaboración propia	39
Figura 3-8 Ubicación de los detectores en la planta baja del cuartel – ENM	40

Figura 3-9 Ubicación de los detectores en la planta 1 del cuartel – ENM.....	41
Figura 3-10 Ubicación de los detectores en la planta 2 del cuartel – ENM.....	41
Figura 3-11 Ubicación del detector en la planta baja del edificio Isaac Peral – ENM.....	43
Figura 3-12 Ubicación de los detectores en la planta baja del Patio de Aulas – ENM	44
Figura 3-13 Ubicación del detector en la planta baja del edificio Francisco Moreno – ENM	44
Figura 3-14 Ubicación del detector en la planta baja del edificio de investigación – ENM	45
Figura 4-1 Tres detectores en misma línea vertical en parte Este del edificio - Elaboración propia	47
Figura 4-2 Camaretas N y S de la parte E de la planta 1 - Elaboración propia.....	48
Figura 4-3 Tres detectores en misma línea vertical en parte Oeste del edificio - Elaboración propia ...	49
Figura 4-4 Camaretas N y S de la parte W de la planta 1 - Elaboración propia	50
Figura 4-5 Tres detectores en misma línea vertical en parte central del edificio - Elaboración propia .	51
Figura 4-6 Tres detectores en misma línea vertical en parte Este del edificio en zonas con poca o inexistente actividad humana - Elaboración propia.....	53
Figura 4-7 Salas de estar sin actividad humana de la planta 1 - Elaboración propia	54
Figura 4-8 Concentración de radón en la camareta del alumno durante un mes - Elaboración propia ..	55
Figura 4-9 Tres detectores en el Comedor de Alumnos - Elaboración propia.....	56
Figura 4-10 Principales cinco puntos de medición de la planta 1 - Elaboración propia	58
Figura 4-11 Camaretas E y W de la planta 2 - Elaboración propia	59
Figura 4-12 Efecto de la presión atmosférica en la concentración de radón - Elaboración propia.....	60
Figura 4-13 Efecto del viento en la concentración de radón - Elaboración propia	61
Figura 4-14 Efecto de las precipitaciones en la concentración de radón - Elaboración propia	62
Figura 4-15 Influencia de la temperatura en la concentración de radón - Elaboración propia	63
Figura 4-16 Efecto de la temperatura en la concentración de radón - Elaboración propia.....	63
Figura 4-17 Concentración de radón en diferentes edificios - Elaboración propia.....	65
Figura 4-18 Concentración de radón en edificios situados en terreno ganado al mar - Elaboración propia	66
Figura 4-19 Concentración de radón en edificios en el Patio de Aulas - Elaboración propia	67
Figura 5-1 Superficie de las plantas a remodelar - ENM.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Concentración de uranio en minerales [10]	10
Tabla 1-2 Concentración de uranio en materiales de construcción [11]	11
Tabla 1-3 Comunidades autónomas con mayor concentración de radón [6].....	17
Tabla 3-1 Comparativa de posibles equipos de compra – Elaboración propia.....	35
Tabla 4-1 Código de colores para cada planta en las gráficas - Elaboración propia	46
Tabla 4-2 Concentración media de radón en la fase 1 - Elaboración propia	47
Tabla 4-3 Concentración media de radón en la fase 2 - Elaboración propia	49
Tabla 4-4 Concentración media de radón en la fase 3 - Elaboración propia	51
Tabla 4-5 Concentración media de radón en la fase 4 - Elaboración propia	52
Tabla 4-6 Concentración de radón media en salas de estar de la planta 1 - Elaboración propia...	54
Tabla 4-7 Concentración media de radón de la camareta del alumno - Elaboración propia	55
Tabla 4-8 Concentración y promedio de radón en la planta baja - Elaboración propia	57
Tabla 4-9 Concentración y promedio de radón en la planta 1 - Elaboración propia	58
Tabla 4-10 Concentración y promedio de radón en la planta 2 - Elaboración propia	59
Tabla 4-11 Concentraciones de radón medias en otros edificios - Elaboración propia	64
Tabla Anexo I - 1 Concentración de uranio en rocas [6].....	76
Tabla Anexo III - 1 Clasificación de municipios en función del potencial de radón [23]	79

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

“El número de víctimas mortales a causa de la inhalación de radón es equiparable a las de accidentes de tráfico”.

1.1 Introducción a la problemática del Radón en la edificación

A día de hoy, a nadie le sorprende que el tabaco sea la primera causa de cáncer de pulmón. Sin embargo, si cualquiera lee que el radón es la segunda, seguramente se sorprenda o ni siquiera sepa dar una respuesta de lo que es el “radón”.

Pues bien, este elemento casi desconocido es de origen natural y además es radiactivo. Se genera principalmente en el subsuelo donde se asientan los edificios, y a su vez es capaz de penetrar hacia su interior. De esta manera, la concentración de radón aumenta en la composición del aire de las zonas de habitabilidad que posteriormente se respira. Esto supone un potencial riesgo en la salud de los seres humanos, sobre todo en términos de problemas en el aparato respiratorio debido a que el aire que se respira puede tener una concentración nociva para el organismo, ya que la radiación afectará al ADN de las células pudiendo producir cáncer de pulmón. En la actualidad, la Organización Mundial de la Salud estima que la proporción de casos de este tipo de cáncer llegue al 14% en función de la concentración media de radón [1].

No son pocos los estudios que se han realizado sobre esta problemática; un ejemplo sobre ello, y además uno de los más impactantes, es el que realizó la agencia EPA (Environmental Protection Agency) de Estados Unidos, en el que quedó demostrado que el número de víctimas mortales a causa de la inhalación de radón es equiparable a las de accidentes de tráfico [2], lo cual demuestra que la presencia de gas radón es un asunto que obliga a tomar acción lo antes posible.

En el caso de España, se estima que 1500 personas fallecen al año debido a esta causa [3]. Mientras que la Unión Europea ha redactado directivas hasta 2013, que han provocado que todos los países tengan legislaciones que protegen a sus ciudadanos, España, a pesar de haber puesto en marcha un proceso contra el radón, no lo ha incluido en su normativa hasta 2018 [4].

Este hecho ha empezado a ser puesto en estudio desde hace relativamente poco tiempo, lo cual ha implicado la búsqueda de medidas preventivas y correctivas para la eliminación de este elemento en los edificios, así como la imposibilidad o reducción de su entrada.

El origen de este descubrimiento del problema tuvo lugar en países nórdicos, los cuales fueron los precursores de los estudios radiológicos en viviendas. Esto es debido a que en el siglo XX la construcción de viviendas cada vez más herméticas favorecía a una mayor concentración de radón en su interior.

En los siguientes apartados se explicarán las características básicas del radón, así como sus efectos sobre los seres humanos y cómo puede estar presente en las viviendas y edificios.

1.1.1 Qué es el Radón (Rn)

El radón es un gas noble, producto de la cadena de desintegración radiactiva del radio con emisión de partículas energéticas alfa que se origina desde el isótopo del uranio U-238, con un periodo de semidesintegración de 3,8 días. El radón se encuentra en la última posición de la columna de los gases nobles, como puede verse situado en la siguiente tabla periódica.

La imagen muestra una tabla periódica de los elementos con el radón (Rn) destacado en un recuadro rojo. El radón es el elemento 86, situado en la columna de los gases nobles (grupo 18) y el periodo 6. La tabla incluye los nombres de los elementos en español y sus símbolos químicos. El radón es un gas noble, como se indica en la leyenda.

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

Figura 1-1 Situación de radón (Rn) en la tabla periódica [5]

Existen tres tipos de radón, el Rn-220, proveniente de la desintegración del Torio (Th-232), el Rn-219, proveniente del Actinio (U-235) y el Rn-222 de la cadena del Uranio-238, cuando este último da lugar al Radio-226, como puede verse en la Figura 1-2. El isótopo Rn-222 es el que dará pie a este Trabajo de Fin de Grado debido a que es el que mayor actividad radiológica presenta y por tanto es más perjudicial. A partir de este momento pasará a llamarse únicamente “radón”.

El radón se encuentra en estado gaseoso, es inerte, estable químicamente, incoloro, inodoro e insípido. Es un elemento ubicuo, ya que proviene del uranio, que es un elemento que se encuentra presente en la corteza terrestre. Además, es extremadamente móvil, por lo que es capaz de atravesar materiales. Sin embargo, la característica fundamental que posee, y por tanto es objeto de estudio, es la radiactividad.

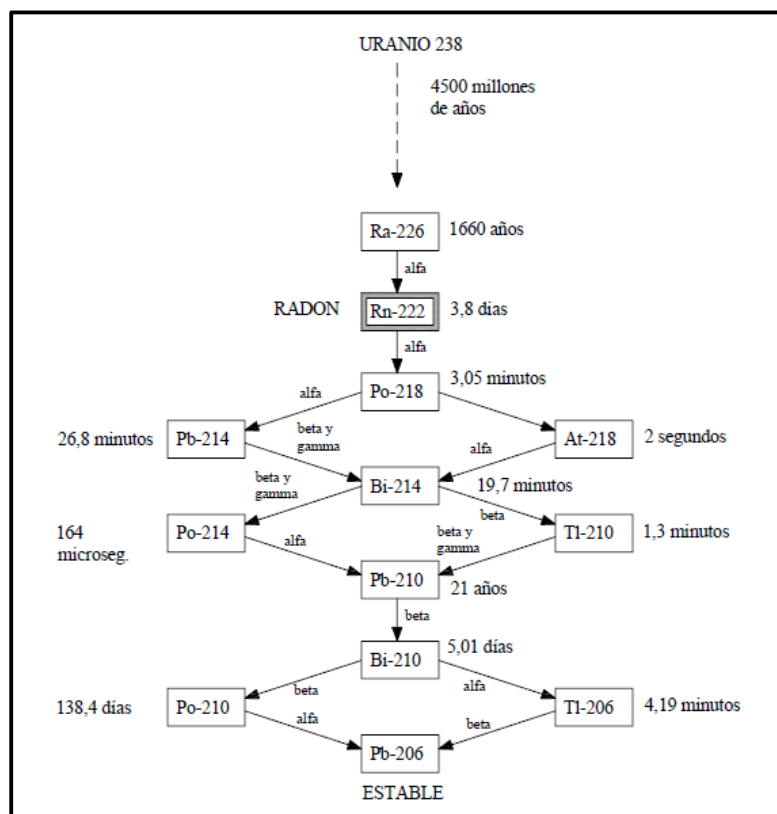


Figura 1-2 Cadena de desintegración del Uranio [6]

1.1.2 Riesgos para el ser humano

Existen diferentes fuentes de radiación natural que el ser humano recibe, tal y como puede verse en la Figura 1-3. Esta radiación forma parte del medio ambiente y puede proceder de radiaciones cósmicas, rocas presentes en suelos, alimentos, agua y aire entre otros. Además, a esta radiación natural hay que añadir la de tipo artificial, principalmente por consecuencia de la aplicación de radiaciones y materiales en medicina, producción de energía, industria, agricultura, e incluso en el control de la contaminación.

Durante mucho tiempo se pensaba que la radiación natural no suponía un riesgo para la salud de las personas, sin embargo, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX esta idea cambió drásticamente cuando se descubrieron los efectos que el gas radón poseía [7].

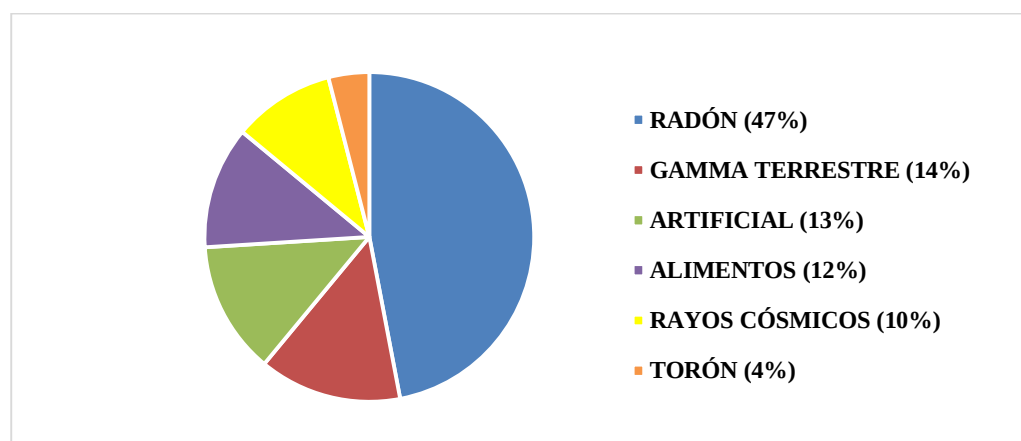


Figura 1-3 Contribución de las fuentes de exposición de radiación natural y artificial – Elaboración propia

En términos de radiactividad, el radón al desintegrarse emite partículas alfa, con 2 neutrones y 2 protones, que al atravesar la materia son frenadas rápidamente produciendo una alta ionización al liberar electrones de los átomos con los que interacciona.

Por ello, ofrecer una protección frente a estas partículas, que puede conseguirse con una hoja de papel o unos centímetros de aire, parece una tarea sencilla. Sin embargo, esto se complica cuando el foco de esta radiación se encuentra en el interior del cuerpo humano, generando el principal problema.

El radón, al ser gaseoso es capaz de viajar mediante el suelo poroso con alto contenido de radio hasta alcanzar la superficie, donde puede llegar a introducirse en el interior de edificios si no se encuentran correctamente protegidos frente a esta amenaza.

Las propiedades gaseosas y radiactivas del radón producen que este elemento sea capaz de actuar sobre los tejidos del cuerpo humano. Especialmente en los tejidos del aparato respiratorio debido a la alta concentración de radón del aire que se respire. También pueden verse afectados aquellos del aparato digestivo, debido a la ingesta radón disuelto en el agua [8].

Sin embargo, los tejidos del sistema respiratorio son los que más afectados resultan, ya que el principal problema viene cuando se inhala el radón disuelto en el aire; “las partículas radioactivas que permanecen en tejido pulmonar emiten radiación alfa a las células broncopulmonares y puede dañar directa e indirectamente el ADN de las células y provocar cáncer pulmonar (el único tipo de cáncer que se ha comprobado que está asociado con la inhalación de radón)” [8].

A través de la respiración, el radón y sus descendientes son introducidos en el aparato respiratorio. Mientras que el radón desaparece en poco tiempo, los otros quedan depositados sobre superficies interiores del aparato respiratorio, continuando allí su proceso de desintegración y dañando de esta manera las células presentes con las radiaciones emitidas. Esto presenta el principal efecto nocivo del radón en el ser humano.

1.1.3 Principales fuentes de radón

A lo largo del TFG se mencionará en numerosas ocasiones la presencia de radón en edificios o en una determinada zona. La manera en la que se medirá la existencia de radón en el ambiente será a través de la “concentración de radón”, y se expresará en “becquerelios¹ por metro cúbico” (Bq/m³), ya que se trata de medida de radiactividad por unidad de volumen. Aunque se trabajará con Bq/m³, también puede ser expresado en “picocurios por litro” (pCi/L), cuya conversión es:

$$37 \text{ Bq/m}^3 = 1 \text{ pCi/L}$$

Para que la concentración de radón sea considerablemente alta, es necesario que se esté formando continuamente. Por ello, si se quiere conseguir mayor información sobre el origen del radón en la edificación, es preciso saber en primer lugar dónde se encuentra presente el uranio del que deriva [9].

El uranio se halla en numerosos minerales, rocas y suelos de nuestro planeta en mayor o menor medida. Por ello, la presencia de uranio hará que los elementos que lo posean sean las principales fuentes de radón, como son las siguientes:



Figura 1-4 Principales fuentes de radón – Elaboración propia

¹ El bequerelio es la unidad de radiactividad del Sistema Internacional equivalente a una desintegración por segundo [33].

Suelo terrestre:

Es la principal fuente de radón, puesto que la corteza terrestre es donde mayor cantidad de uranio existe. Como es evidente, no todos los suelos tienen la misma concentración de uranio, por lo que dependiendo de la composición del suelo se encontrará en mayor o menor medida.

La concentración de uranio es variable dependiendo del tipo de roca o mineral en cuestión. Por tanto, un estudio de las características geológicas del suelo será necesario para determinar la presencia de la cantidad de uranio en la zona de estudio.

En la siguiente tabla se relacionan los minerales y tipos de roca con sus concentraciones de uranio:

Mineral	Se encuentra en:	Concentración de uranio (ppm ²)
Cuarzo	Granito	1,7
Feldespatos	Granito, vidrios, cerámicas	2,7
Moscovita (mica)	Granito	11,8
Biotita	Aislante eléctrico	8,1
Apatito	Fertilizantes	65
Alanita	Campo de investigación	200
Esfena	Gema (piedra preciosa)	280
Zircón	Piedras preciosas e instrumentos de fabricación	1330

Tabla 1-1 Concentración de uranio en minerales [10]

Si se desea ampliar la información en este campo, véase el “Anexo I: Concentración de uranio en las rocas más habituales”.

Materiales de construcción:

Estos constituyen la segunda fuente de radón, aunque no tan acusada como la corteza terrestre. Si bien es cierto que el efecto de los materiales de construcción puede llegar a ser incluso despreciable en comparación con el efecto de la corteza terrestre, es interesante indicar que dependiendo del material que se elija, aportará una mayor o menor cantidad de radón.

En términos de materiales de construcción, no solo es de interés conocer cuáles son los que mayor protección ofrecen frente al radón, sino también cuáles son los que más uranio poseen, y por tanto mayor cantidad de radón pueden aportar al interior de un edificio. Además, el conocer el origen de los materiales de construcción es de vital importancia debido a que han podido ser extraídos en zonas con alto nivel de uranio.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los materiales más utilizados en construcción con sus respectivas cantidades de uranio:

² Partes por millón

Material de construcción	Mínimo (Bq/kg)	Máximo (Bq/kg)
Ladrillos	45,2	143
Hormigón	21,1	192
Hormigón poroso	46,1	85
Mortero	19,8	82
Arena	13,3	41
Arcilla	40,9	199
Yeso	12,1	86
Cemento	36,5	88
Placas cerámicas	63,0	117

Tabla 1-2 Concentración de uranio en materiales de construcción [11]

Como puede comprobarse, las arcillas, el hormigón y los ladrillos son los elementos con mayor cantidad de uranio.

Agua:

El radón al ser emitido por las rocas, puede disolverse en aguas subterráneas o incluso en reservas de agua, como pozos profundos excavados a través de roca sólida sin depuración, que posteriormente se destinen al consumo humano. El radón en el agua puede ser perjudicial de dos formas:

- Ingesta de agua con radón: es decir, el agua entra a nuestro organismo al beber.
- Agua como conductor directo al aire: de esta manera el radón que ha sido emitido desde las rocas atraviesa el agua y posteriormente acaba en el aire.

La segunda causa es la más dañina, ya que la sensibilidad de los pulmones es mayor que la del estómago [8].

1.1.4 Movilidad del radón

No es suficiente únicamente con conocer el estado geológico del suelo del emplazamiento donde se halle el edificio, sino que habrá que tener en cuenta si el radón encuentra facilidades o dificultades para alcanzar la superficie terrestre.

Al desintegrarse los átomos de uranio dan lugar a átomos de radio. Ambos elementos se encuentran en estado sólido, y aunque podrían desplazarse por el efecto de corrientes de agua subterráneas, no tienen posibilidad de desplazarse desde la roca a la que pertenecen hacia la atmósfera. Sin embargo, esto no ocurre con el radón que, al estar en estado gaseoso, sí que puede desplazarse desde el suelo hacia la superficie mientras se desintegra dando lugar a sus descendientes.

Por otro lado, conocer el estado del suelo es de vital importancia, para observar cómo reaccionará frente a la movilidad del radón. Cuanto mayor porosidad tenga el suelo, al igual que si el mineral se encuentra en forma de polvo, el radón será expulsado al exterior con mayor facilidad. Una vez en el aire atmosférico se diluye quedando una concentración insignificante.

Existen dos procesos de salida de radón a la atmósfera:

DIFUSIÓN: es la salida de un soluto de un espacio de alta concentración a otro de baja concentración. Este fenómeno viene dado por el movimiento de las moléculas de la sustancia en

cuestión. En este caso, el radón será transportado desde el suelo, zona de alta concentración, al aire de la atmósfera, zona de baja concentración.

CONVECCIÓN: este proceso es el que mayormente influye en la tasa de exhalación de gas radón al aire. Tiene lugar por la diferencia de presión que existe en el aire y la que contiene el radón tras su desintegración en la corteza terrestre. Por lo tanto, como la presión en el suelo es mayor que la del exterior, se generarán flujos de aire desde el interior de la corteza hacia el aire tal y como se ve en la siguiente figura.

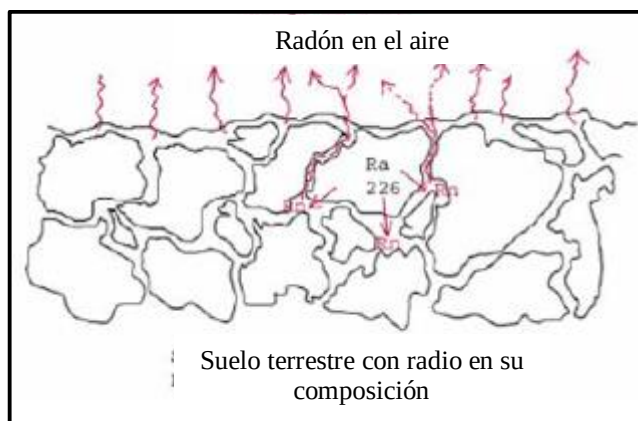


Figura 1-5 Fenómeno de convección en el suelo terrestre [6]

La presión en el interior de los edificios suele ser similar a la exterior, por ello, cuando la presión atmosférica cae, la interior también. Sin embargo, no ocurre lo mismo con la del suelo, sino que existe un desfase temporal para que ocurra ese fenómeno. Por ello, durante ese intervalo de tiempo, la presión del suelo está siendo mayor que la del interior de los edificios, permitiendo que el flujo de radón se produzca desde el suelo hacia el interior.

Existe una falsa creencia que afirma que la presencia de elementos como el granito u otras rocas similares, con altos niveles de uranio, van a provocar una exhalación de radón importante a la atmósfera. Dichas rocas, al ser tan densas y compactas, no permiten la movilidad del gas hacia el exterior a través de sus poros. Por lo que se afirma que, aunque las rocas con mayor cantidad de uranio como el granito, si no se encuentran fracturadas o fragmentadas, no supondrán una mayor exhalación de radón a la atmósfera [6].

La permeabilidad del suelo es el principal parámetro que caracteriza la dificultad o facilidad del paso de fluidos, y por tanto en este caso, el escape de radón del suelo. Véase el siguiente ejemplo:

ARCILLAS: son las que mayor cantidad de uranio poseen, por lo que a priori parecen ser una potencial fuente de radón, pero su alta impermeabilidad produce que el radón en superficie sea muy inferior.

CALCÁREAS: estas son muy permeables, y aunque tengan una cantidad escasa de uranio, la cantidad de radón exhalado al aire es diez veces el de la arcilla, ya que es capaz de viajar con mayor facilidad.

Con ello, se afirma que el proceso de convección tendrá lugar fundamentalmente en las rocas con poros abiertos, y por tanto dependerá en gran medida de la permeabilidad del suelo. Además, este proceso viene influenciado directamente por las diferentes condiciones meteorológicas que existan en un momento determinado:

- **TEMPERATURA:** en este aspecto influye el “efecto Stack”, que tiene lugar cuando existe una diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio. Cuando la temperatura exterior es menor que la interior se genera un “efecto chimenea” que obliga al aire interior a salir del edificio a través de grietas, puertas, ventanas, etc. Este flujo de aire

hacia el exterior produce un efecto de depresión en el interior del edificio que será el responsable de succionar el aire del terreno hacia dentro encontrándose presente el radón, y por lo tanto su concentración aumentará [6]. Además, esto explica el motivo de porqué la concentración de radón es mayor a primeras horas del día, puesto que es el momento con mayor diferencia de temperatura entre el exterior e interior.

- **PRESIÓN:** las bajas presiones (borrascas o presencia de viento) producirán que la salida del radón al exterior se vea incrementada, ya que tendrá mayor facilidad de alcanzar la superficie. Ocurre lo contrario cuando aparece un anticiclón, con el que vienen asociadas altas presiones, que hará que disminuya la concentración debido a que el radón encuentra mayor dificultad para llegar a la superficie.
- **HUMEDAD AMBIENTAL Y PRECIPITACIONES:** ya que estos pueden saturar los poros del terreno, dificultando así la exhalación del gas a la superficie, provocando que el suelo sea más impermeable. De esta manera va a generarse una mayor concentración de radón en el interior de los edificios debido a que el suelo bajo ellos se encuentra seco sin poros saturados. Por este motivo, el suelo seco bajo el edificio puede ser una vía preferente para el radón y penetrar dentro del edificio.

Sin embargo, la presión es el factor más determinante, con un orden de magnitud 10^3 mayor que el que ofrece la temperatura y 10^2 mayor que el viento [6].

Otro factor interesante a tener en cuenta es la altura con respecto al suelo (corteza terrestre): a medida que nos alejamos de la corteza, el radón va diluyéndose en la atmósfera provocando que la concentración sea menor.

Estos factores, sumandos a la escasa ventilación, justifican las elevadas concentraciones que se miden durante los periodos invernales, que pueden incluso superar a los de verano en un factor de dos.

La concentración de radón en el aire vendrá condicionada por lo tanto por: (ver Figura 1-6)

- **Emanación:** es la capacidad del gas para poder migrar de la roca a la atmósfera.
- **Exhalación:** la porosidad y humedad serán factores determinantes para que el radón pueda llegar a la superficie.
- **Condiciones metrológicas:** ya que serán decisivas para analizar cómo el radón sale a la atmósfera [6].

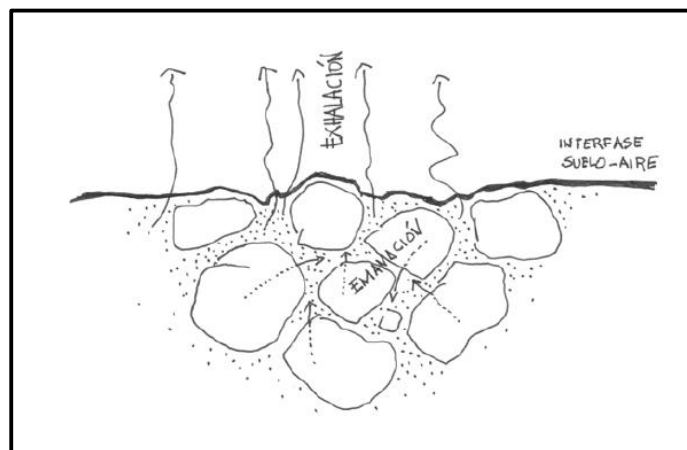


Figura 1-6 Fenómeno de exhalación de radón al aire [6]

1.1.5 Penetración y acumulación del radón en espacios habitados

La manera que tiene el radón de introducirse a las viviendas es diversa. Si un edificio no está correctamente protegido, el radón entrará por la solera, grietas, fisuras, tuberías, ventanas bajas, etc. Además, también puede estar contenido en el agua de pozos subterráneos que posteriormente se introduzca en la vivienda, por lo que prácticamente el radón puede entrar por cualquier vía posible, ya sea con mayor o menor dificultad, tal y como se puede ser en la Figura 1-7.



Figura 1-7 Cómo entra el radón en una vivienda [12]

Como se describe a continuación, y se aprecia en la imagen anterior, el gas radón puede introducirse al interior del edificio por casi cualquier vía. Aquí se destacan las vías más comunes de entrada, es decir, los puntos débiles que se pueden encontrar en la mayoría de los casos [13]:

- **CÁMARAS DE AIRE DE MUROS:** es una vía bastante frecuente por donde el radón, tras penetrar en ellas, será capaz de moverse con libertad, llegando incluso a viajar hacia pisos altos.
- **SOLERAS EN SÓTANOS:** es cierto que el hormigón puede ofrecer un gran aislamiento y protección al radón, sin embargo, la necesidad de dejar juntas de dilatación entre tramos de superficie de hormigón al realizar la solera, permiten el acceso del radón hacia el interior. Ocurre lo mismo con las fisuras de la propia solera o incluso a través de los propios poros del hormigón.
- **MUROS DE SÓTANO:** ocurre exactamente lo mismo que en el caso de las soleras de los sótanos, donde los muros al estar enterrados o semienterrados pueden ser traspasados por el gas del terreno.
- **CONDUCTOS DE SANEAMIENTO:** en numerosas ocasiones, los conductos de saneamiento verticales o tuberías están conectadas a las arquetas de red horizontal normalmente situadas bajo la solera o en el sótano. Las arquetas, al no ser elementos estancos, el radón puede ser capaz de penetrar en ellas pudiendo incluso llegar a ascender hasta cualquier punto del edificio.
- **FORJADOS SANITARIOS³:** el radón que proviene del terreno puede acumularse en la cámara de aire bajo el edificio, o en el forjado sanitario, si estos espacios no se encuentran

³ Elemento estructural de una edificación que queda separado del terreno por una cámara de aire ventilada, que transmite las cargas y que actúan sobre ellos a vigas y/o muros [31].

suficientemente ventilados, llegando incluso a obtener un resultado indeseado donde el radón podría traspasar el forjado del edificio hacia el interior [13].

1.2 Justificación

Tras haber realizado una introducción a la problemática que genera el radón, en este apartado se detallan los motivos y causas que dan pie a este trabajo.

Como se ha visto, es evidente que la presencia del radón en los edificios, y más en concreto en las viviendas o lugares de trabajo, tiene un efecto indeseado debido a los problemas que pueden desencadenarse en los seres humanos.

Si a esto se le añade el uso cada vez más frecuente de los materiales de construcción, especialmente de importación con productos de desecho industrial o derivados, contruidos con altos contenidos de radio, podría agravarse aún más la problemática del radón.

España presenta un mapa de radón elaborado por el CSN, donde se puede observar que no se concentra uniformemente [14]. La mayoría de los edificios contienen concentraciones de radón habitualmente bajas, pero existen zonas que se ven más afectadas debido a su geología.

En la Figura 1-8, se puede comprobar cómo se distribuye el radón a lo largo del territorio nacional en un código de colores, tal y como señala la leyenda, donde el verde indica la presencia mínima de radón, mientras que el naranja señala las zonas con mayor cantidad.

El mapa señala el potencial de radón que se puede encontrar en dichas áreas, lo cual no significa que todos los edificios lo tengan presente en su interior. Esta estimación se hace en base al percentil 90, lo que implica que al menos el 10% de los edificios supera el límite⁴ de 300 Bq/m³, mientras que el 90% restante no lo excede.

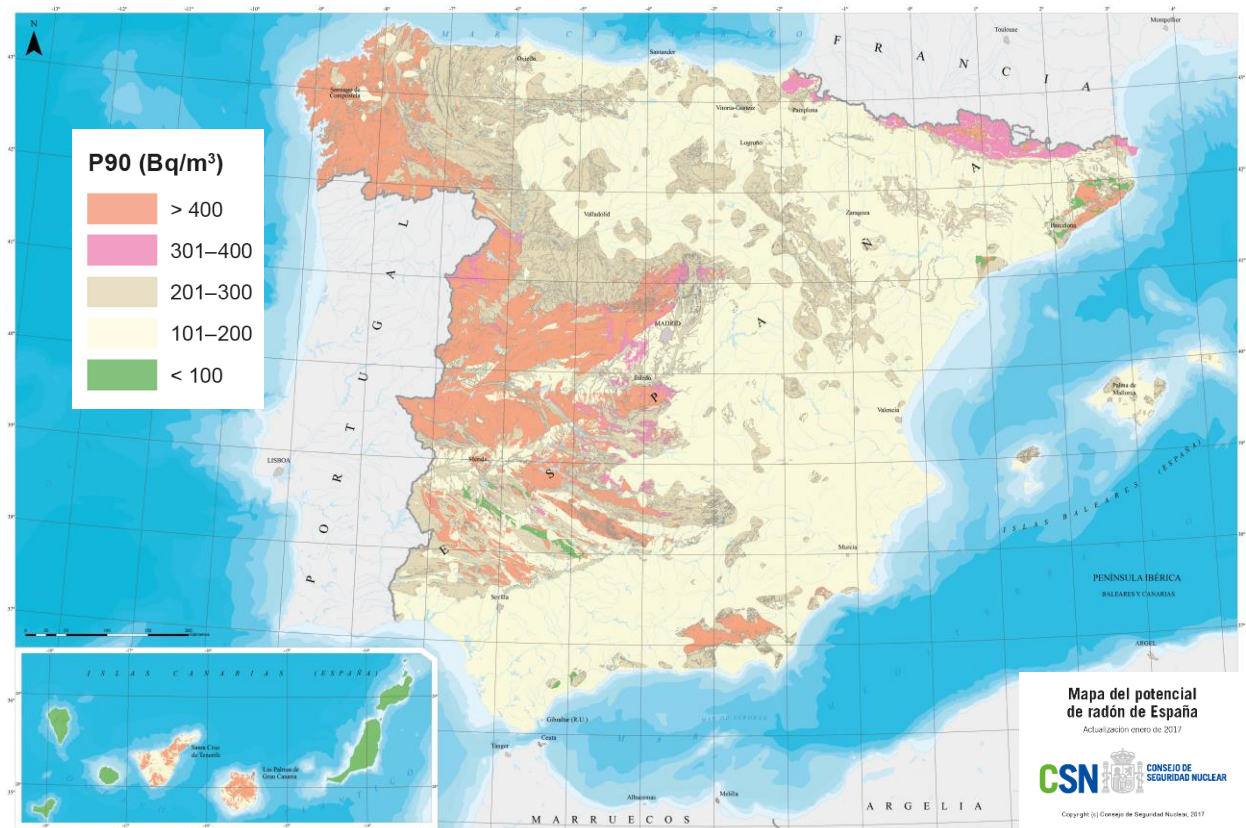


Figura 1-8 Mapa más reciente de concentración de radón (2017) [14]

⁴ Límite establecido en la normativa de la Unión Europea, de la que se fundamenta la normativa española.

Tal y como puede verse en la Figura 1-8, Las zonas más afectadas en el territorio nacional son: Galicia, Extremadura, la parte Este de Castilla y León, el Sistema Central junto con la parte Este de Castilla-La Mancha, Almería, parte Oeste de Cataluña, Norte de Aragón, Navarra, País Vasco, Murcia y las islas de Gran Canaria y Tenerife.

Por otro lado, existe otro mapa de actuación prioritaria donde incluye a las zonas citadas anteriormente. Estas zonas representan un 17% del territorio nacional y son las que poseen un potencial radón mayor de 300 Bq/m^3 , tal y como se puede comprobar en la siguiente figura en naranja:

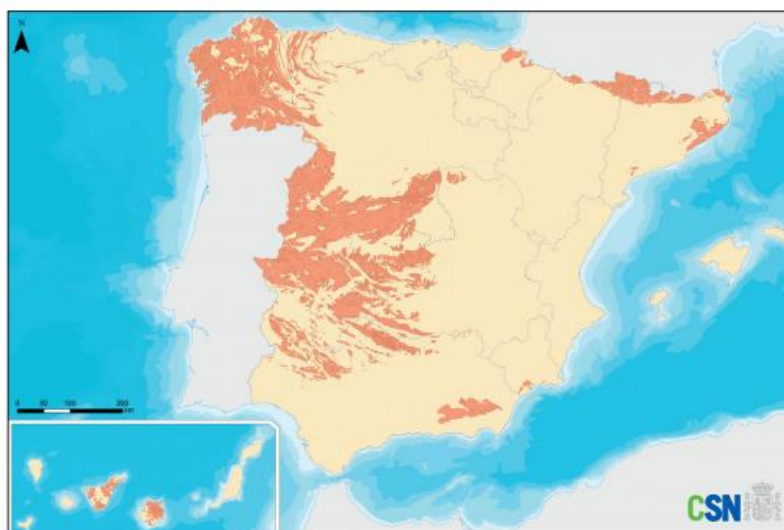


Figura 1-9 Zonas con potencial de radón ($P90 > 300 \text{ Bq/m}^3$) [14]

Además, el CSN ha elaborado un mapa, en el que incluye cómo de habitadas se hallan esas zonas. En él se muestra los municipios en los que hay población que reside en zonas de actuación prioritaria tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.

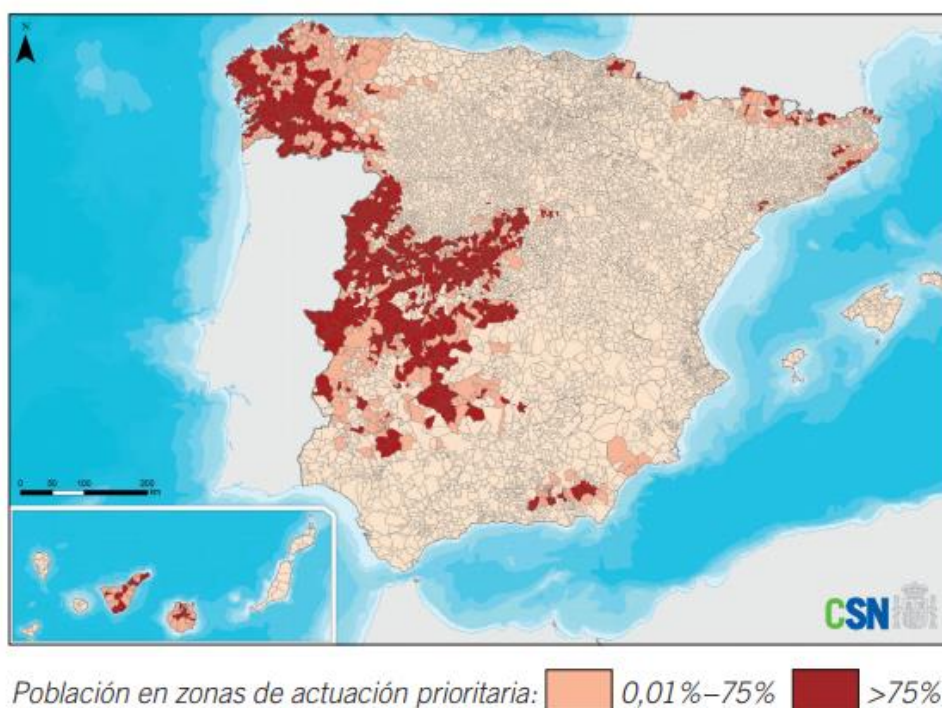


Figura 1-10 Zonificación por municipio [14]

Se muestran en color granate los municipios con mayor población expuesta al potencial de radón, es decir, más del 75% de ella, mientras que el color carnosos representa entre el 0,01 y 75% de la población. En resumen, la mayoría de las zonas con potencial de radón elevado están altamente pobladas.

Como se ha visto antes, la presencia del radón en España no es uniforme. Por ello, se han clasificado las áreas e incluso los municipios en diferentes zonas en función de la concentración de radón. Tras numerosos muestreos sobre la presencia de radón en España, estas son algunas de las comunidades autónomas más afectadas:

Comunidad autónoma	Concentración media anual de radón (Bq/m ³)
GALICIA	118
MADRID	95
EXTREMADURA	90
CASTILLA Y LEÓN	68
CANARIAS	64

Tabla 1-3 Comunidades autónomas con mayor concentración de radón [6]

La comunidad autónoma de Galicia es la más afectada en el territorio nacional, tal y como puede observarse en la Figura 1-8 y en la siguiente Figura 1-11 de forma más detallada:

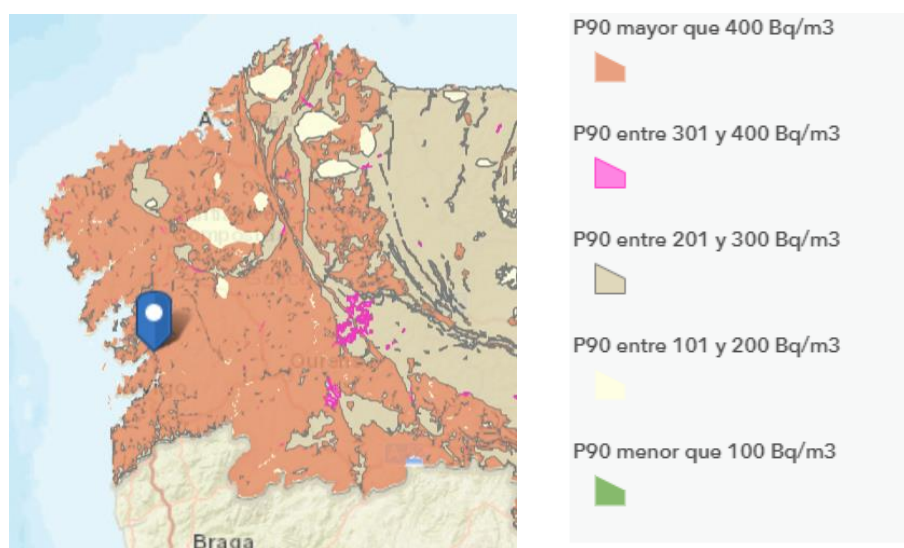


Figura 1-11 Concentración potencial de radón en Galicia [14]

Como puede apreciarse en la leyenda, más del 90% de los municipios se encuentran en un percentil 90 mayor de 400 Bq/m³, es decir, con altas probabilidades de “encontrar” radón en el interior de los edificios.

Tras haber analizado el mapa de España donde señala que Galicia posee los mayores niveles de radón, y a su vez, Pontevedra es una de las provincias más afectadas por la presencia de este gas, se considera de vital interés medir su concentración en los cuarteles de la Escuela Naval Militar, donde los alumnos viven y pasan la mayor parte de las horas del día, y donde nunca se han tomado mediciones de concentración de radón y tampoco se tiene constancia de su presencia.

Los edificios que se van a analizar se encuentran en el municipio de Marín, por lo que es importante conocer la concentración de radón a nivel provincial donde los municipios se clasifican en diferentes zonas. Como se puede observar en la figura de abajo, Marín, como la mayor parte de los municipios de la provincia, se encuentra en zona 2, es decir, donde existe riesgo alto de concentración de radón y que se deben tomar medidas para contrarrestar el efecto de este gas en caso de que fuera necesario. Este asunto se verá con mejor detalle a lo largo del capítulo 2.

Para ampliar la información sobre la clasificación de los municipios en función de la concentración de potencial de radón véase “Anexo III: Clasificación de municipios”.

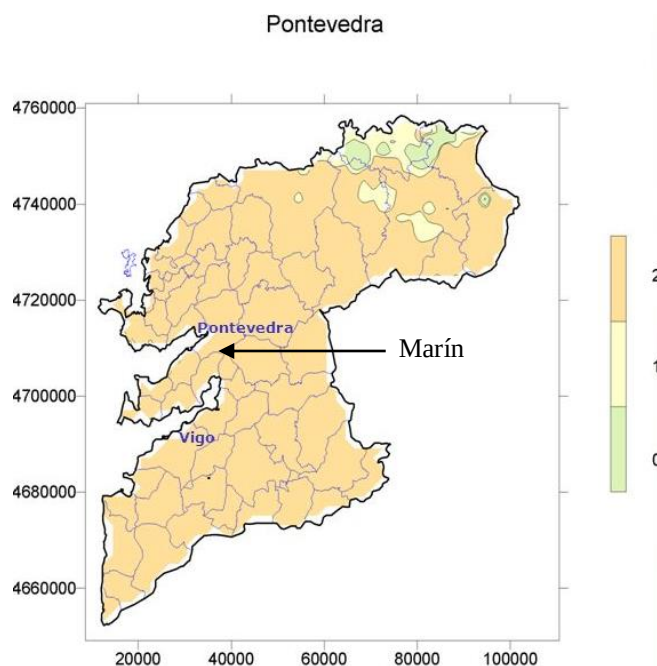


Figura 1-12 Mapa de exposición al radón de la provincia de Pontevedra [6]

1.3 Objetivos

Se considera firmemente que la problemática del radón en nuestro país no es un asunto despreciable. Por ello, en este Trabajo de Fin de Grado se pretende alcanzar siguientes objetivos:

- Realizar un estudio sobre la normativa actual de radón.
- Realizar una investigación sobre la inmisión de radón en edificios, así como las medidas protectoras que existen para mitigar este gas.
- Tomar medidas reales de concentración de radón en edificios de la Escuela Naval Militar y de forma más exhaustiva en el Cuartel Marqués de la Victoria.
- Analizar los datos obtenidos para estudiar el comportamiento del edificio frente al radón.
- Proponer medidas de protección para la disminución de la concentración de radón en caso de que sea necesario.
- Generar conocimiento y concienciación sobre el problema real que supone el radón.

1.4 Estructura de la memoria

Este apartado se dedica a explicar de forma general cómo se ha estructurado el contenido de este Trabajo de Fin de Grado:

En el capítulo 1 se ha introducido el gas radón y cómo puede afectar al ser humano. Asimismo, se ha expuesto la justificación y objetivos correspondientes a este proyecto.

En el capítulo 2, se explica cómo el radón se ha hecho un hueco en la sociedad, cómo es capaz de detectarse y medirse, así como las medidas que pueden emplearse para protegerse de dicho gas.

En el capítulo 3, se muestra el desarrollo del TFG, exponiendo paso a paso la metodología empleada para la elección de equipos y las fases de medición.

En el capítulo 4, se presentan y se discuten los resultados obtenidos de la fase experimental que dan base al TFG.

En el capítulo 5, se incluye una propuesta de actuación para reducir el gas radón en el cuartel Marqués de la Victoria en vista a sus futuras obras.

En el capítulo 6, se enumeran las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo del TFG y además se citan varias líneas futuras que sirven de inspiración para futuros estudios y trabajos.

Por último, en el capítulo 7 se encuentra la bibliografía empleada. Tras ella, los diferentes anexos que complementan la información del TFG.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Normativa del radón

2.1.1 Perspectiva histórica de la problemática del radón

El problema que presenta el radón no es actual, desde hace un largo periodo de tiempo, se llevan observados sucesos en los que el ser humano se ha visto implicado y ha sentido curiosidad respecto a ellos. Ya en 1500, un exceso de mortalidad alarmó por enfermedad respiratoria en mineros en las montañas del Erz, en Europa del Este. Este no es el único momento que la sociedad aprecia anomalías en temas que se relacionan con el actualmente conocido efecto del radón sobre la salud y la protección de la población frente a este factor de riesgo. En la siguiente figura se puede apreciar la evolución de este fenómeno, así como los acontecimientos que han tenido lugar a lo largo de la historia [15].



Figura 2-1 Evolución de la influencia del radón en la sociedad – Elaboración propia

En el año 1879, Karting y Hesse encuentran que el exceso de mortalidad en los mineros se debe al cáncer de pulmón, es decir, supieron enlazar la causa de esos fallecimientos, cuando en 1921, Uhlig fue capaz de relacionar las emanaciones del radio con la causa que producía cáncer de pulmón.

Se tendría que esperar hasta la década de los 70 para que aparezcan estudios sobre el cáncer en los mineros, y, aun así, hasta 1987, el país pionero en tomar conciencia de ello, Estados Unidos no establece una cifra por la cual deben tomarse medidas de reducción en los domicilios. Un año más tarde, la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer clasifica el radón y sus descendientes como carcinógeno⁵ para el humano. Además, aparece el BEIR IV, un documento redactado por varias agencias norteamericanas, donde analizan los peligros de exposición al radón y llevan a cabo análisis pormenorizados de los estudios realizados sobre el radón en mineros y en animales. Además, son capaces de asociar la evidencia del riesgo de cáncer que produce este gas [16].

En 1990 aparece por primera vez en normativas europeas, cuando el Comisión Europea para la Energía Atómica redacta “Euratom” [17], y en ella señala que se recomienda que no se superen los 400 Bq/m³ en viviendas ya construidas y 200 Bq/m³ en viviendas de nueva construcción. Durante esta época se desarrollan numerosos estudios sobre el radón residencial y riesgo de cáncer de pulmón, especialmente por parte de los países nórdicos, siendo pioneros en este asunto a nivel europeo. A finales de los noventa, en 1999 se aparece el BEIR VI [18], actualizándose el informe anterior, donde se indica que el radón es el segundo factor de riesgo de cáncer de pulmón después del tabaco.

Ya en el siglo XXI, se inicia en 2005 el International Radon Project, patrocinado por la Organización Mundial de la Salud, para elaborar un informe técnico de recomendaciones para implantar programas de reducción de radón por los gobiernos miembros. En 2009 finalmente se publica el “Handbook of radon”, de la OMS [19]. Por otro lado, los estudios de manos de agencias norteamericanas y británicas se publican de forma combinada.

2.1.2 Normativa en vigor

En el año 1990, la Unión Europea redacta las primeras recomendaciones, sin tener carácter normativo aún. La última directiva redactada y que sigue en vigor, es de 2013, la 2013/59/Euratom, haciendo que se deroguen las directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom anteriores⁶ [20].

En esta directiva se establecen las directrices que los países miembros deben tomar para una protección del radón en los edificios. La Unión Europea, por otro lado, deja libertad a los estados miembros para cumplir los requisitos de concentración de radón, donde se establece el límite en 300 Bq/m³ [20].

Dentro de la propia normativa de 2013, los principales artículos que indican limitaciones sobre la concentración del radón son los siguientes [20]:

El artículo 54, del “Radón en los lugares de trabajo”:

“Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. El nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superará los 300 Bq m⁻³, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional”.⁷

El artículo 74, de la “Exposición al radón en recintos cerrados”:

⁵ Cancerígeno.

⁶ Diario Oficial de la Unión Europea (17 de enero de 2014)

⁷ Diario Oficial de la Unión Europea (17 de enero de 2014)

“Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superarán los 300 Bq m⁻³”.

Por otro lado, el artículo 106, de la *“Transposición”*:

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

Por otro lado, OMS, ha redactado el *“Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública”*, donde recomienda que no se superen los 100 Bq/m³ como norma general para nuevas construcciones y, siempre que sea posible, no superar los 300 Bq/m³ [19].

En el caso de España, tras la publicación de la normativa europea, se desarrollaron varias instrucciones y recomendaciones. Tal y como señala la OMS, la puesta en práctica de un programa nacional del radón eficaz destinado a proteger al público frente a la exposición del radón requiere la aportación de numerosas entidades nacionales y otras partes implicadas. El CSN, con la colaboración de la Universidad de Cantabria, ha sido el órgano designado para establecer los criterios y procedimientos para la regulación de los niveles de radón [21].

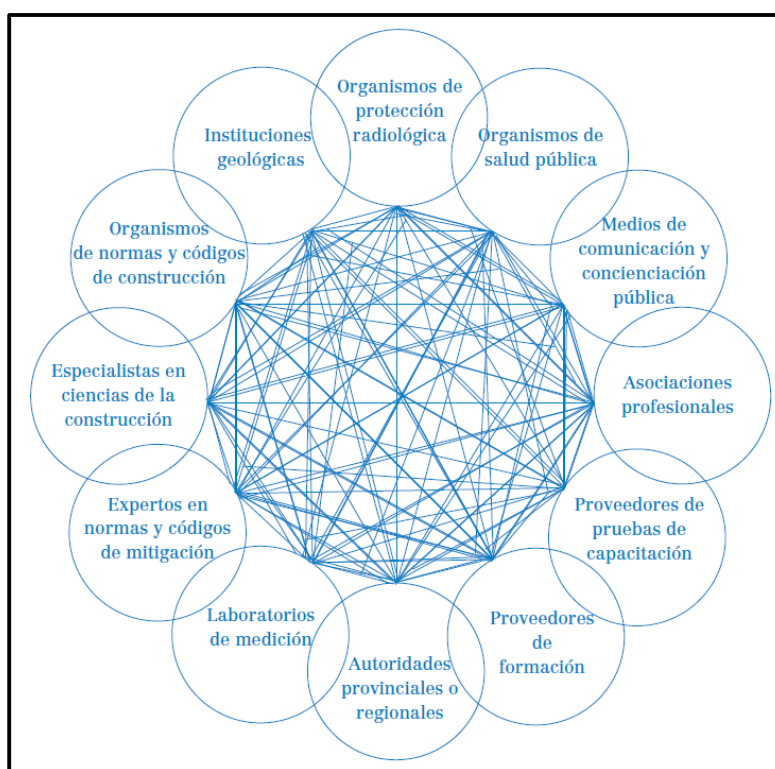


Figura 2-2 Partes implicadas que participan en un programa contra el radón [19]

Aunque a de hoy todavía sigue sin existir un plan nacional de actuación contra el radón, se tomaron ciertas medidas recientemente a nivel constructivo. La manera de introducir la normativa en España ha sido a través del documento que regula cómo ha de llevarse a cabo la construcción de la edificación, es decir, se ha modificado el Código Técnico de Edificación, de aquí en adelante “CTE” [4]. Este documento es el que regula a nivel nacional las normas y condiciones que toda edificación debe cumplir, desde las solicitudes que debe soportar un edificio en base a la actividad a la que va a estar sometido, hasta los equipos contraincendios que debe poseer, pasando por las condiciones de salubridad que debe de tener el aire de su interior.

Esta medida supone una inclusión de un nuevo capítulo en la sección HS 6 en el Documento Básico DB HS de Salubridad, perteneciente al CTE, llamado “*Protección frente a la exposición del radón*”. Esta normativa entra en vigor modificando el la normativa aprobada por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [22].

Dentro del propio nuevo capítulo del CTE, el Apéndice B clasifica los municipios de cada provincia en dos zonas en función del *potencial radón*⁸ en base a las estimaciones efectuadas por el CSN. Además, se tiene en consideración que hay una probabilidad significativa de que los edificios allí construidos sin soluciones específicas frente al radón presenten concentraciones de radón superiores al de referencia [23]. Las zonas, junto con las medidas a llevar a cabo son las siguientes:

Zona I:

Existe un riesgo medio de exposición al radón, y únicamente se actuará con medidas de protección básica. Se dispondrá de una barrera de protección entre el terreno y los locales habitables del edificio para limitar el paso de gases provenientes del terreno.

Zona II:

Existe un riesgo alto de exposición, por lo que los municipios incluidos en esta zona deberán adoptar medidas de protección elevada, lo que incluye, además del sistema de protección de zona I, un mecanismo adicional que podrá ser [23]:

- Un espacio de contención ventilado situado entre el terreno y los locales a proteger mediante la ventilación natural o mecánica.
- Sistema de despresurización del terreo que permita extraer los gases contenidos en el terreno bajo el edificio.

2.1.3 Comparativa con otros países

Aunque no existe ninguna estrategia ni tratado global en contra del radón, en el ámbito internacional se puede encontrar un amplio espectro políticas frente a este gas. La OMS, como se ha citado anteriormente, redactó unas premisas que se consideran necesarias para no poner el peligro la integridad de las personas. Sin embargo, existen países que dan un paso hacia adelante y establecen medidas aún más estrictas, y otros que todavía no han tomado acción sobre esta materia.

En el caso de Estado Unidos, que es uno de los países más avanzados en el control y protección de la población frente al radón, desde 1988 establece el nivel de acción en 148 Bq/m³, menos de la mitad que la Unión Europea [24]. Además, cuenta con la Environmental Protection Agency, que se encarga de redactar recomendaciones e informar al país sobre el radón.

Siguiendo en el continente americano, Canadá estableció un límite de 200 Bq/m³ en 2007 [25], con numerosas campañas de concienciación de la población, promoviendo la medición y mitigación. Además, cuenta con una sección en su normativa de edificación desde 2014 [25].

En el ámbito europeo, aunque exista una nueva normativa que lo regule, existen países que han tomado la delantera en prevención y corrección. Un caso claro es Suecia, que ya desde 2004 posee una legislación referente, marcando el límite de 200 Bq/m³ para viviendas y edificios públicos [25]. De hecho, el gobierno sueco ofrece ayudas tanto para la medición como corrección en viviendas particulares.

Conviene mencionar el caso de República Checa, que es uno de los países pioneros en la política contra el radón [25], con un plan de acción nacional en vigor donde otorga subvenciones a

⁸ Percentil 90 (P90) de la distribución de niveles de radón de los edificios de esa zona. Al menos el 10% de los edificios supera el límite de 300 Bq/m³.

particulares y además posee estudios propios desde la década de los 90 sobre suelos y materiales de construcción con presencia de radio.

Junto a él, se encuentra Irlanda, siendo uno de los países que antes ha intervenido en este asunto, ya que desde 1998 todos los edificios de nueva construcción deben poseer medidas contra el radón [24]. Por otro lado, Reino Unido también posee una fuerte concienciación teniendo incluso su propia agencia acreditadora [24].

2.2 Equipos de medida

Existen diferentes métodos para medir la presencia de radón, en concreto se distingue entre si el método mide la concentración de gas radón o si además mide alguna otra característica de los productos descendientes del radón. Sea cual sea el caso, las técnicas se pueden clasificar como activas o pasivas, y en función de ello, se utilizan unos equipos de medición u otros [26]. A continuación, se explica en primer lugar las técnicas que existen y después los métodos más comunes y eficaces hoy en día.

2.2.1 Clasificación de las técnicas

En función de cómo se obtengan las muestras de concentración de radón existen diversas técnicas a emplear. En este apartado se explicará cuáles son las principales [27]:

Técnicas activas:

Se hace pasar aire a través del equipo para la captación de la muestra. Son sistemas que trabajan en continuo y se emplean para investigación y protección radiológica. En general, son muy precisos, de mayor coste y dependen de la red eléctrica para su funcionamiento. Su instalación depende de técnicos especializados.

Técnicas pasivas:

No existe aire conducido hacia el instrumento para conseguir el resultado final, sino que son métodos en los que las trazas de la radiación crean algún efecto que luego será revelado un laboratorio. Es frecuente en campañas de medida a gran escala en viviendas, lugares de trabajo, minas, etc. Su coste es bajo, no dependen de la corriente eléctrica y se pueden adquirir en tiendas comerciales pero su revelado final deberá realizarse en un laboratorio.

Además, existe otro modo de clasificar los equipos de medidas, en este caso en función del tiempo:

Métodos continuos:

Las muestras se obtienen por la obtención de aire recogidas en intervalos pequeños de tiempo, entre 1 segundo y 30 minutos. Permiten conocer de forma rápida el valor de la concentración de radón. Las muestras se obtienen gracias a un flujo de aire que circula por un área a medir durante largos periodos de tiempo. Por medio de un detector adecuado se consigue información rápida y completa. El equipamiento usado es complejo, de uso científico, y son imprescindibles para obtener las fluctuaciones en tiempo real de nivel de radón. Permite conocer resultados fiables sobre las actividades y el edificio en cuestión.

Métodos integrados:

En este caso se obtiene el promedio de las concentraciones de radón durante un tiempo en el que se registran las trazas de desintegración durante un tiempo de exposición, luego son estudiados en laboratorio y se promedia la concentración por el tiempo de exposición. Es un proceso que puede prolongarse desde días hasta meses, siendo más útiles y fiables los datos obtenidos cuanto mayor sea el tiempo de medida. Este método se suele utilizar para inspección y reconocimiento de zonas o en campañas de mediciones.

2.2.2 Equipos de medición

Cámaras de ionización:

Son sistemas que utilizan tanto técnicas activas como pasivas basados en cilindros recubiertos en su interior por una capa uniforme de sulfuro de zinc activado con plata que responde ante partículas alfa. El aire se introduce en su interior y se mide el número de destellos de luz con un tubo fotomultiplicador para conocer la concentración de radón en el aire. Esto son típicos de métodos instantáneos.

Detectores de trazas:

Son sistemas pasivos que se basan en láminas finas de nitrato de celulosa o policarbonato que poseen la capacidad de que las trazas debidas a las radiaciones emitidas por el radón y sus descendientes queden impregnadas tras un tiempo de exposición. Estas trazas pueden contarse mediante sistemas de microscopio, ya que su número es proporcional a la concentración que existe durante ese tiempo. Por ello, se pueden dar aproximaciones muy certeras sobre la concentración de radón. Estos equipos son utilizados en métodos integrados.

Detectores de carbón activo:

Son sistemas pasivos, basados en la capacidad que tiene el carbón activo para retener el radón. El tiempo necesario para tomar medidas son entre tres y siete días. El nivel de radón se mide mediante la su acumulación en las paredes de un envase o cánister, donde se queda incrustado y posteriormente puede analizarse mediante una sustancia luminiscente capaz de absorber la energía de la radiación y emitirla en forma de fotones para que, de forma posterior, un fotomultiplicador transforme la señal luminosa e una señal eléctrica. Es propio de los métodos integrados.

2.3 Medidas de protección en edificaciones de nueva construcción

Las principales medidas contra el radón son las siguientes:

2.3.1 Barreras de protección

Es el método más elemental, que consiste básicamente en situar una lámina o membrana entre el edificio y terreno para aislarlo de los gases provenientes de la corteza e impedir que penetren en el interior. Estas barreras tienen un funcionamiento similar a aquellas destinadas a proteger de las humedades, sobre todo en las terrazas debido a la acumulación de aguas por las lluvias. En cambio, en este caso, hay que aislar al edificio de un gas y no de un líquido, por lo que las características del material cambiarán. Existen diversos materiales para su fabricación, aunque la combinación de mástico⁹ elastómero con núcleo de aluminio y armadura de polietileno suele ser la más efectiva.

Si bien es cierto que no es el método más eficaz, debido a que es una medida únicamente que dificulta la entrada de radón y no lo extrae mediante un flujo de aire como se verá en los demás métodos, permite disminuir considerablemente la concentración del radón en el interior de los edificios, dificultando su penetración en ellos y produciendo que este se escape hacia la superficie eliminando una cantidad potencial que, en caso de no tener barrera, acabaría en el interior. En la Figura 2-3 se puede observar de forma gráfica y más intuitiva el mecanismo de la barrera de protección instalada en un edificio. La línea discontinua representa la barrera de protección en cuestión, en este caso situada por debajo de la solera de sótano y en las paredes en contacto con el terreno que a la vez tiene funciones de aislante de humedad.

El objetivo de esta medida es la aplicación de un material estanco frente al paso del gas, y sobre todo con un bajo coeficiente de difusión, de gran elasticidad y alta durabilidad con resistencias a

⁹ Derivado de la destilación del petróleo y completamente impermeable.

componentes químicos. Por lo general, estas membranas se comercializan prefabricadas, en rollos y son multicapa como se muestra en la Figura 2-4.

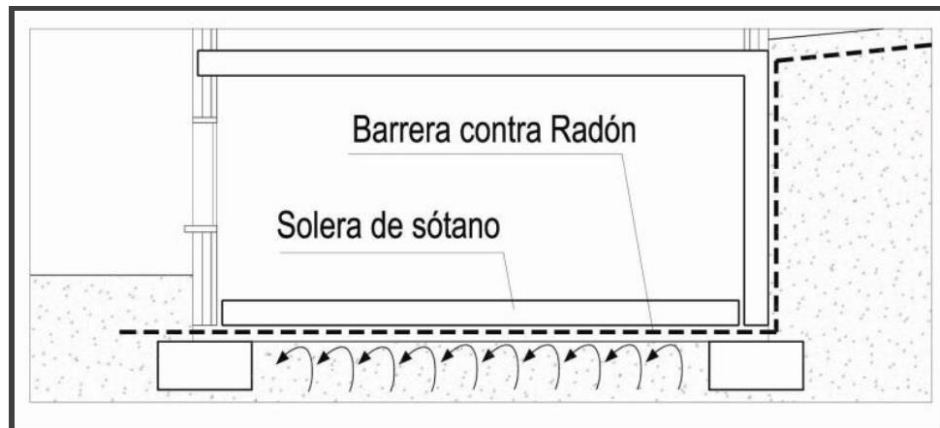


Figura 2-3 Sistema de barrera de protección de radón bajo solera [28]

Es de vital importancia que las membranas que vayan a colocarse tengan unas características mecánicas óptimas con el fin de asegurar la estanqueidad. Las membranas se verán sometidas a presión, desgarró, punzonamiento y tracción por lo que es importante que estas respondan correctamente para evitar fisuras durante su vida útil como en la fase de construcción. Es importante recordar que cualquier rotura o poro puede disminuir considerablemente la capacidad de aislamiento del radón.



Figura 2-4 Operario instalando barrera de protección de radón [29]

En cuanto al ámbito de aplicación, no solo se instalan en bajo las soleras, sino también muros en contacto con el terreno, en juntas de dilatación, posibles grietas o fisuras que presente el revestimiento del edificio, principalmente las partes en contacto con el suelo.

2.3.2 Sistemas de presurización

Este método genera un aislante natural de manera que el radón no llegue a las proximidades del edificio. Para ello, se lleva a cabo una inyección de aire a través de un tubo al terreno, creando así una zona de altas presiones bajo el edificio obligando al radón a buscar otros caminos de menor presión a través de los poros del suelo con el fin de alcanzar la superficie alejado del edificio.

Como puede observarse en la siguiente imagen, la principal idea reside en generar un “bulbo de presiones”. Es decir, un hueco que posea una mayor presión, imposibilitando en mayor medida el camino del radón para alcanzar la base del edificio.

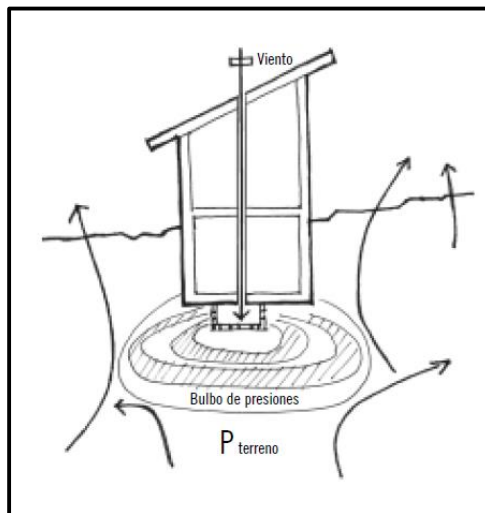


Figura 2-5 Sistema de presurización mediante bulbo de presiones bajo edificio [28]

2.3.3 Sistemas de extracción

Este supone el método más eficaz para contrarrestar los efectos del radón. Su funcionamiento se basa fundamentalmente en la evacuación del gas que se encuentra por debajo del edificio y en la creación de vías preferentes por las que después el gas pueda ser expulsado hacia el exterior. Normalmente se hará a través de un tubo de extracción que desemboca en una chimenea. De esta manera, el radón será expulsado evitando así que penetre hacia el interior. Es decir, se trata de crear un “captador” de radón en forma de cámara de aire para que el gas tienda a converger en él para expulsarlo posteriormente de forma natural o forzada.

Como es obvio, el tiro de aire forzado será más eficaz que el natural debido a que se genera continuamente un flujo de mayor fuerza, por lo que, en zonas con mayor concentración de radón, se necesitarán mecanismos de aire forzado para llegar a conseguir los efectos deseados. En la Figura 2-6 se puede apreciar esta explicación, pudiendo ver la distribución de los elementos esenciales del mecanismo: cámara de aire (actuando como elemento de captación), tubo y extractor.

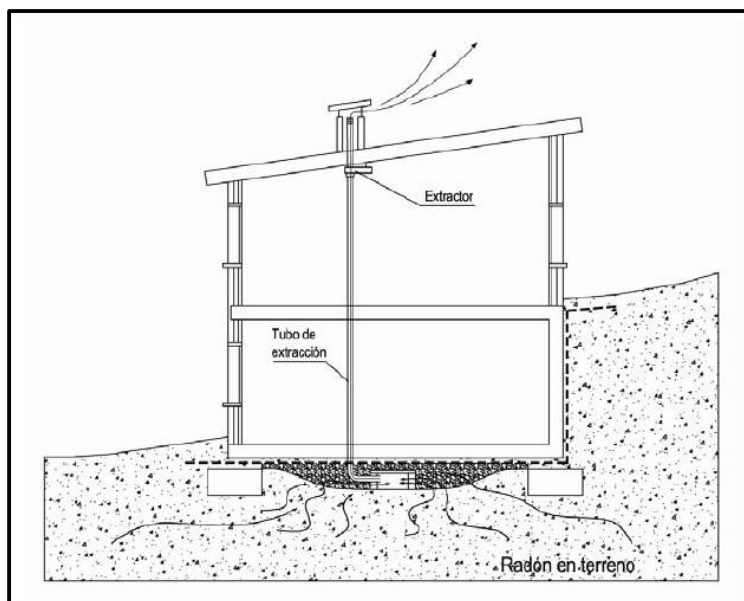


Figura 2-6 Sistema de extracción forzada bajo edificio [28]

Existen varias soluciones creativas para llevar a cabo este proceso, tanto una simple excavación o una simple cámara de aire, aunque la aplicación práctica más típica de este sistema se basa en la instalación de una arqueta enterrada bajo la solera. Este elemento es característico por tener unas propiedades más porosas que el propio edificio con el fin de que el radón tenga más facilidad de penetración hacia ella que hacia el propio edificio. Además, esta arqueta está conectada a un tubo que desembocará o en el tejado o en los muros laterales. Este proceso es posible debido a la diferencia de presión que existe entre el tubo y la arqueta, generando un efecto de succión y finalmente produciéndose un flujo natural hacia el exterior.

En la siguiente imagen se puede ver de forma esquemática la forma de la arqueta, en este caso fabricada con ladrillo perforado para favorecer la entrada de radón. Esta a su vez, posee un tubo de PVC para conducir el flujo de aire hacia el exterior.

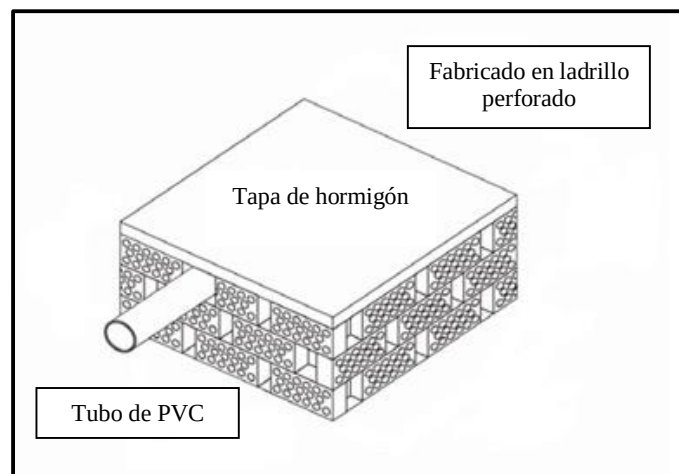


Figura 2-7 Arqueta de captación con ladrillo perforado [6]

Dicha arqueta, es muy sencilla de instalar en nuevas construcciones, sin embargo, no lo es para las existentes. Por ello, existe una variante que se trata de la instalación de una arqueta en el exterior del edificio, junto al exterior de los muros. Se explicará de manera más clara en el apartado 2.4.

Alternativamente, existe un método que consiste en la creación de una cámara de forjado sanitario, es decir, una cámara de aire destinada a mitigar no solo la humedad del suelo, sino también la entrada de gas radón a los locales habitables. Esta técnica consiste en dejar un hueco que debe estar ventilado de forma natural o forzada, entre el forjado y el terreno y solo es posible de crear antes de comenzar la construcción.

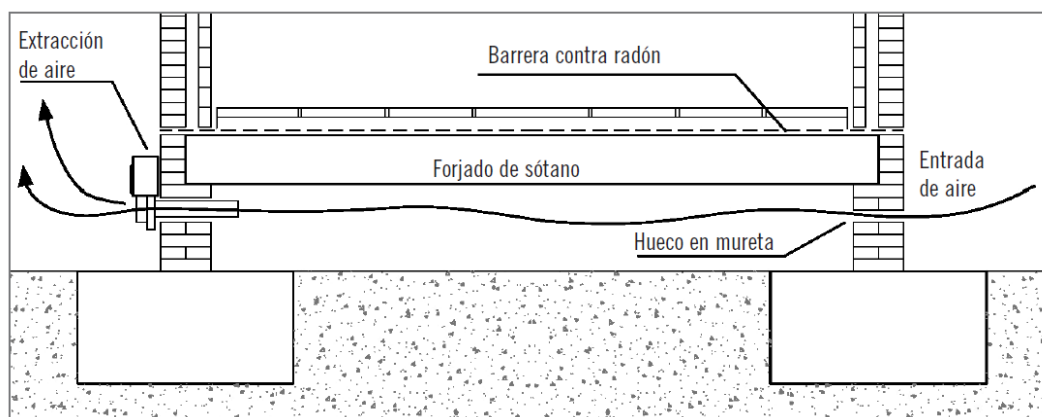


Figura 2-8 Cámara de forjado sanitario [13]

Existe otra variante dentro de los métodos de extracción, para casos extremos en los que es muy complicada la aplicación de métodos de actuación frente al radón, como puede ser el caso de sótanos sin ventilar, cuevas¹⁰ habitables o edificios antiguos. Este consta de una ventilación forzada donde el sótano del edificio actúa como captadora de radón, es decir, como una gran arqueta en interiores del tamaño de una habitación.

El principio de funcionamiento es el mismo que el explicado en el apartado 2.3.2; se procedería a crear una ventilación forzada que permitiera expulsar el aire con alto contenido en radón hacia afuera del edificio mediante el acople de un sistema de extracción como se puede ver en la Figura 2-9.



Figura 2-9 Extracción forzada en sótano [28]

2.4 Medidas de protección en edificaciones existentes

Cuando se trate de un edificio ya construido, las medidas a adoptar pueden complicarse. Lo ideal en estos casos es actuar desde fuera [6]. De esta manera se consigue que la intervención a la estructura sea la menor posible, ya que es más compleja llegando incluso a ser imposible o peligrosa en ciertas ocasiones. Estos métodos son correctivos y se basan en técnicas de mitigación, que tratan de causar la menor cantidad de molestias posibles en la estructura. Es posible que no consigan disminuir el flujo de radón por debajo del valor límite, pero que aun así quede la concentración de radón reducida en gran medida.

2.4.1 Ventilación

Este método, puede sonar arcaico y poco efectivo, sin embargo, aunque no sea una solución constructiva, una correcta ventilación puede suponer casi el mejor remedio para disminuir la concentración de radón el aire. Posiblemente no se consiga alcanzar concentraciones óptimas, sobre todo en zonas con alto nivel de radón, pero si ayudará a eliminar en gran medida el problema.

Sin embargo, no todos los espacios son ventilables, como es el caso de los sótanos, habitaciones, compartimentos sin ventanas, etc. Además, normalmente no es suficiente para alcanzar registros aceptables y no nocivos, por ello habrá que diseñar otros mecanismos para conseguir el efecto que se busca. Asimismo, si se quisiera emplear la ventilación habitual en los domicilios a diario como medida contra el radón, tendría una gran repercusión en la eficiencia energética, debido que sería muy difícil mantener las condiciones térmicas en el interior de una vivienda sin un gran aporte energético. Este hecho implicaría una mayor inversión en el sistema climatizador del edificio que en el propio sistema “anti-radón”.

¹⁰ Cavidad subterránea más o menos extensa, ya natural, ya construida artificialmente. (RAE)

Existen diferentes técnicas constructivas que tienen utilidad sin dañar ni interferir en gran medida en los edificios:

2.4.2 Arquetas exteriores

Se trata de un sistema de captación instalado en el exterior del edificio cuyo funcionamiento es similar al de la arqueta interior comentada anteriormente, con la singularidad de estar instalada fuera de las paredes del edificio. Debido a este factor, la arqueta no tendrá la misma capacidad que si se encontrase en una parte céntrica, pero se consigue una gran mejora que permite no interferir en la estructura. Además, al igual que el resto de métodos, si se le instala un extractor mecánico su eficiencia será aún mucho mayor.

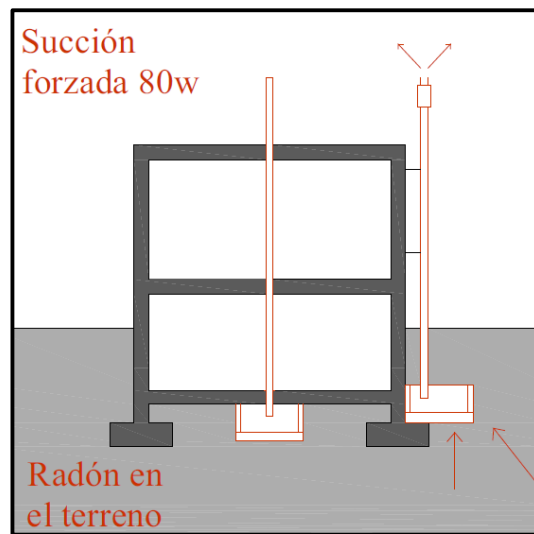


Figura 2-10 Instalación de arqueta exterior [28]

2.4.3 Barreras de protección

Con las que se recubren suelos o paredes de los sótanos. Es el método más sencillo pero el que menos protección ofrece. En viviendas ya construidas, las barreras suelen colocarse por encima de la solera, y por dentro de los muros, ya que hacerlo por fuera supondría destruir la solera, tal y como se puede ver a continuación:

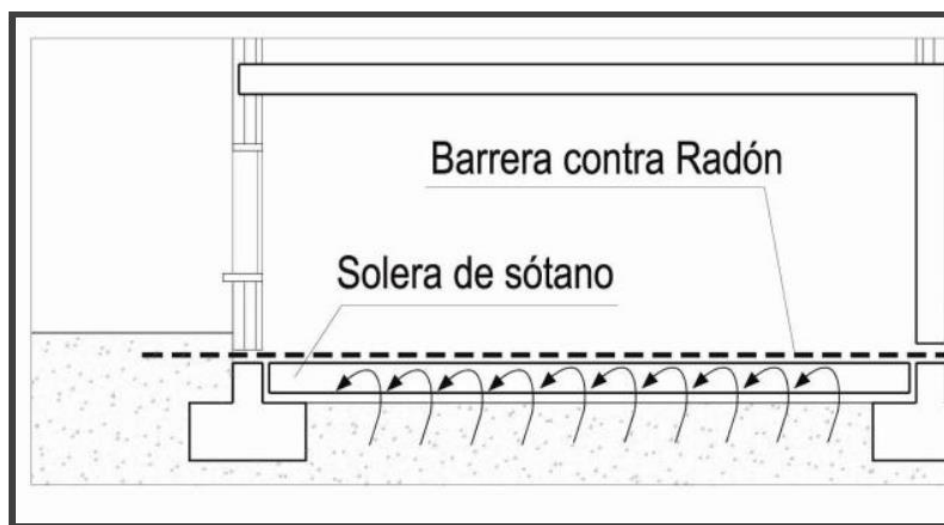


Figura 2-11 Sistema de barrera de protección de radón sobre solera [28]

2.4.4 Extracción exterior

Es un método por el cual se realiza una excavación desde fuera del edificio dejando un espacio hueco bajo la solera del mismo, ver Figura 2-12. El radón tenderá a colarse en el hueco y posteriormente, con un sistema de extracción exterior natural o forzado, se conseguirá expulsar el radón contenido en el hueco evitando de esta manera que traspase al interior del edificio a través de la solera.

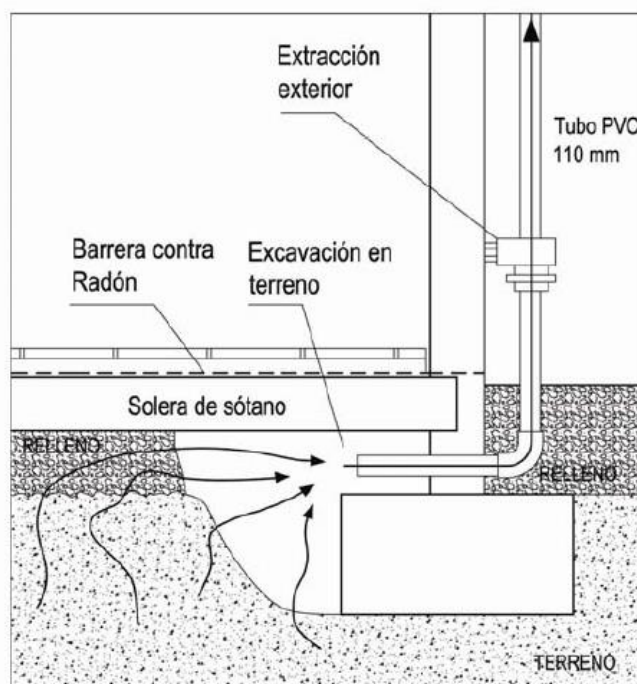


Figura 2-12 Sistema de captación por exterior [28]

2.5 Comparativa de medidas de protección contra el radón

Una vez explicadas las diferentes medidas a tomar, es de gran interés incluir un gráfico que elaboró la Fundación de Investigación en la Edificación de Reino Unido (BRE), donde aparecen ordenados los métodos, así como la probabilidad de éxito que poseen.

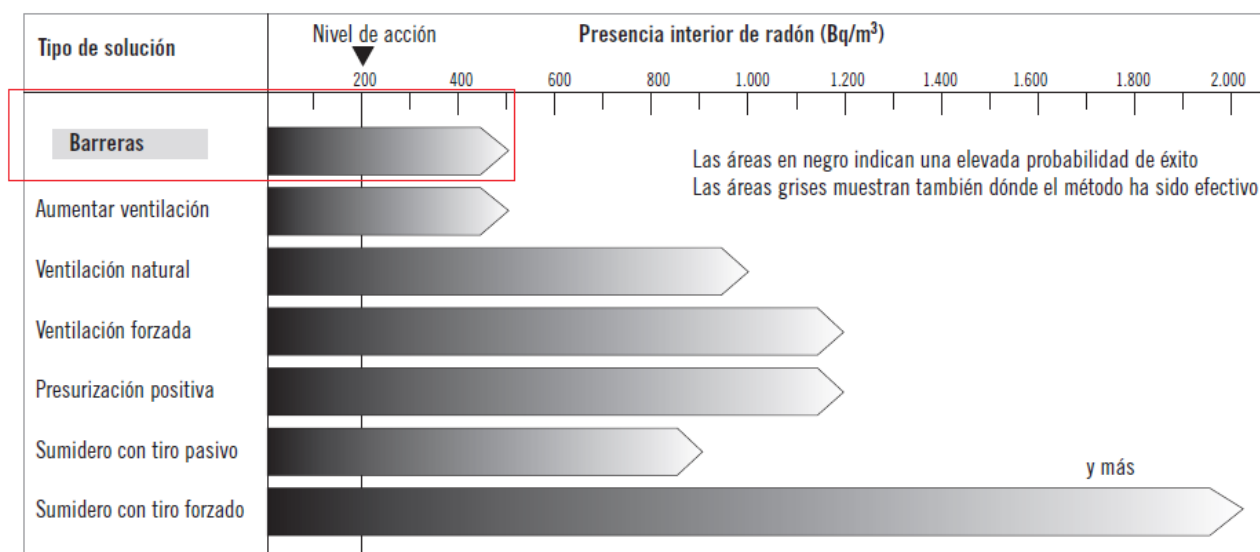


Figura 2-13 Efectividad de las técnicas de actuación contra radón [28]

Como se puede observar, y ya se ha comentado antes, el aumento de la ventilación interior es de bastante utilidad para reducir la concentración de radón el aire, pero en la mayoría de las veces no será suficiente o incluso será imposible si esta supera los 400 Bq/m³. Además, las barreras de protección también aportan una gran ayuda para el aislamiento del edificio, pero, aun así, es insuficiente para conseguir los efectos deseados por encima de los 400 Bq/m³.

Dando un salto diferencial y claro, la ventilación bajo suelo aporta una mayor efectividad, siendo útil casi hasta los 800 Bq/m³ en el tipo natural y 900 Bq/m³ en el tipo forzado.

En cuanto a la presurización positiva bajo suelo se encuentra prácticamente al mismo nivel que la ventilación forzada bajo suelo, siendo un buen método para atacar al radón en concentraciones de 850 Bq/m³.

Por último, el métodos más eficaces frente al radón son los mecanismos de extracción, o “SUMP” en inglés [6], que, aunque bien es cierto que una extracción pasiva, con tiro natural, no será útil para concentraciones superiores a 600 Bq/m³. Sin embargo, si se le acopla un mecanismo para conseguir un tiro forzado, representará la medida más eficaz para combatir el gas radón.

3 DESARROLLO DEL TFG

A lo largo de este capítulo se describirá de lo general a lo particular el desarrollo del TFG realizado durante los meses de trabajo; desde la elección de los equipos para la detección de radón, hasta las diferentes fases que se han llevado a cabo, así como la metodología que se ha seguido.

3.1 Descripción del edificio Marqués de la Victoria

Este TFG tiene como objeto obtener unas medidas preliminares sobre la concentración de radón en edificios de la Escuela Naval Militar. Uno de los principales objetivos principales es obtener unas medidas detalladas del cuartel Marqués de la Victoria, que se encuentra en la zona señalada en la siguiente imagen.



Figura 3-1 Ubicación general del Marqués de la Victoria en la ENM – Google Earth



Figura 3-2 Vista aérea del edificio – Google Earth

Se trata de un edificio que se construyó en el año 1946, (Véase Anexo II: Referencia catastral) y que a lo largo de su vida ha sido reformado e intervenido en varias ocasiones. Dado que el edificio posee una larga vida, se desconoce los cambios que ha sufrido con exactitud. Además, no existen registros sobre datos geológicos de la época de construcción de la zona donde se asienta el edificio, lo cual limita el conocimiento de otros factores que puedan explicar el flujo de gas radón hacia su interior.

El cuartel posee un total de 6.982 metros cuadrados construidos y está compuesto por tres alturas, una planta baja, primera y segunda. La planta baja está formada fundamentalmente por el Comedor de Alumnos y tres camaretas donde se alojan los alumnos enfermos (Camaretas Zulú). La planta primera, al igual que la segunda, está compuesta por las camaretas (habitaciones) de los alumnos, así como salas de estar y los halls. La planta primera además posee una sala de estudio en la parte central del edificio.



Figura 3-3 Planta del edificio – ENM

3.2 Descripción de la metodología y equipos empleados

3.2.1 Elección del equipo (3 de diciembre – 13 de diciembre)

Se estuvo investigando la amplia gama de equipos, también llamados “detectores”, en el mercado para medir concentración de radón y tras ello, se decidió que la adquisición de equipos domésticos sería la mejor opción debido a la limitación de presupuesto y a la falta de experiencia en este campo.

Tras haber clasificado las diferentes técnicas y métodos de medición del radón en el apartado 2.2, y después de haber investigado sobre ello, se tomó la decisión de elegir uno los equipos domésticos que a continuación se relacionan.

En la siguiente tabla queda reflejada la comparativa de equipos que se estudiaron para su posible adquisición. El factor que más influyó fue la relación precisión-precio, debido a las limitaciones de presupuesto.

Equipo	RadonEye RD200	Corentium Home	Corentium Plus	Sarad Radon Scout Home
Foto				
Procedencia	Corea del Sur	Noruega	Noruega	Alemania
Precio aproximado (Euros)	300	200	950	450
Precisión	10%	20%	10%	10%
Observaciones	Fácil uso y utilizado por expertos	No permite conexión para traspaso de datos	Elevado precio	Elevado precio y difícil adquisición

Tabla 3-1 Comparativa de posibles equipos de compra – Elaboración propia

Tras una investigación detallada sobre los equipos que existen en el mercado sobre la medición de radón, se tomó la decisión de adquirir el modelo “RadonEye RD200”, debido a que, realizando una comparación con el resto, posee una serie de características y precio que lo posicionan en cabeza frente a la competencia.

Se contactó con diversas empresas nacionales que comercializaban estos equipos, entre ellas:

- RADIANSÁ
- RADON-ELEKTRON

Tras varias conversaciones y negociaciones con ellas, la empresa RADIANSÁ fue la que ofreció el mejor presupuesto, ya que aplicaba un 5% de descuento en los productos, por lo que fue la encargada de proveer los equipos, cinco en total.

El equipo que se deseaba adquirir presentaba un gran inconveniente: no todas las empresas con las que se contactaba disponían de ello ya que aún no estaba muy comercializado en España, por ello, finalmente solo dos empresas eran las únicas opciones que se tenían para adquirir estos equipos. Además, las empresas afirmaban que, a pesar que poder conseguir el equipo, tardarían varios días en distribuirlos y mandarlos a la dirección que se deseara.

Debido a ese inconveniente, los equipos se recibieron después de las vacaciones de Navidad y por lo tanto no pudieron ponerse en funcionamiento antes de dicha fecha como estaba previsto anteriormente para poder obtener unos datos de concentración de radón durante un periodo de tiempo más extenso.

3.2.2 Descripción del equipo

Se trata de “RadonEye RD200” del fabricante RadonEye, con unas características que se pueden encontrar en su documentación y ficha técnica [30]. Este equipo se puede clasificar de la siguiente manera:

- Técnica activa, ya que se necesitará energía (eléctrica) para poder realizar las mediciones.
- Método continuo: los resultados sobre la concentración de radón comenzarán a registrarse después de una hora de funcionamiento.
- Cámara de ionización como procedimiento de medida.

Este equipo permite registrar datos en Bq/m^3 o pCi/L . Además, posee una pantalla LED que refleja las siguientes características de forma intermitente:

- Nombre del equipo en forma de código.
- Sensor de agitación.
- Concentración de radón actualizada cada 10 minutos.
- Unidad de medida
- Valor pico registrado
- Media del último día.
- Media del último mes.
- LED que se ilumina al conectarse vía Bluetooth y cuando la concentración se excede de valor límite de peligro, en este caso el detector establece el límite de Estado Unidos, 148 Bq/m^3 .

La transferencia de datos desde el medidor se hace mediante la aplicación “RadonEye”, disponible tanto para Android como para OS, la cual permite descargar los registros de datos al smartphone mediante conexión Bluetooth.

Una vez establecida la conexión, aparece la siguiente pantalla, donde aparece la concentración de nivel en el momento exacto de conexión, así como el pico y la media del día en cuestión.

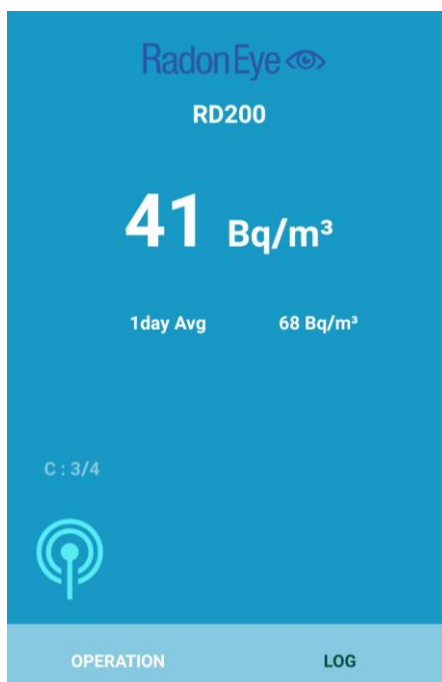


Figura 3-4 Pantalla principal de la aplicación – Figura propia

Tras varias horas de funcionamiento, la aplicación permite graficar los datos registrados, donde se representa la concentración de radón frente a las horas desde que empezó a almacenar datos, de tal forma que permite presentarlos de la siguiente manera:

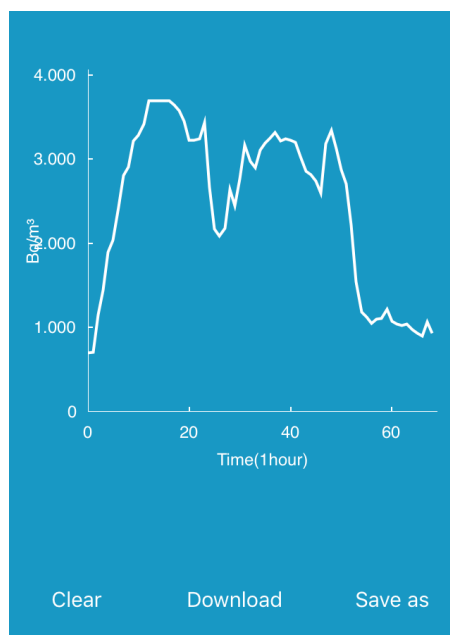


Figura 3-5 Gráfica generada por la aplicación tras el paso de varias horas – Figura propia

Existen tres opciones en la parte inferior de la gráfica, las cuales son:

- *Clear*: permite eliminar todo el registro de datos almacenados en el equipo.
- *Download*: la opción que carga los datos para generar la gráfica en el smartphone.
- *Save as*: que se usará para transferir los datos al móvil para posterior análisis en el ordenador.

3.2.3 Pruebas previas (11 de enero – 15 de enero)

Una vez adquiridos los cinco equipos, se realizaron una serie de pruebas con el objeto de comprobar su correcto funcionamiento, así como para conocer los mismos mediante la lectura de los manuales de usuario (en inglés) que adjunta el fabricante y la familiarización con la aplicación disponible en smartphones para la lectura y transferencia de datos.

En concreto:

- 2 equipos se instalaron en la camareta del alumno.
- 2 equipos se instalaron en el despacho de los profesores tutores.
- 1 equipo en la planta baja del edificio del CUD.

El equipo adquirido posee una gran facilidad para observar y analizar los datos que presenta, tanto por la pantalla donde refleja la medida actual, como por su conexión Bluetooth que permite transferir los datos acumulados. Por ello, se ha podido comprobar cómo el equipo reacciona frente a actividades diarias y rutinarias a las que estará sometido cuando tome las medidas definitivas. Por ejemplo: la habitación sin ventilar tras más de 10 horas, los efectos de abrir las ventanas para su ventilación, o cuando el espacio se queda totalmente cerrado más de 2 días (fin de semana), etc.

La decisión de dejar 2 equipos juntos en el mismo espacio se hizo con el fin de poder comprobar que no existía un gran desfase entre medidas de equipos, en concreto, el 10% que acredita el fabricante.

3.2.4 Descripción de la metodología

El objetivo de este apartado es detallar cual ha sido la metodología que se ha llevado a cabo para la fase experimental del proyecto con el fin de obtener unas medidas para poder observar y analizar la presencia de gas radón en los edificios de la Escuela Naval Militar, y más en detalle en el Cuartel de Alumnos Marqués de la Victoria.

Debido a la limitación temporal de la que se cuenta, los detectores de radón no han podido contar con el tiempo mínimo que recomienda la normativa para poder tener resultado fiables extrapolables a largo plazo, sin embargo, es suficiente para conseguir una aproximación sobre el estado actual de la presencia de radón.

En este proyecto, aprovechando la opción de tener cinco detectores, se usarán de manera que permitan desarrollar tanto un análisis durante un intervalo corto de tiempo, como también otro más largo para poder tener una perspectiva más general. Además, tener aparatos que son capaces de almacenar registros horarios permite poder observar con mayor detalle cómo fluctúa la concentración de radón.

La metodología que se ha seguido es la que aparece en el Apartado C del CTE y comprende las siguientes fases:

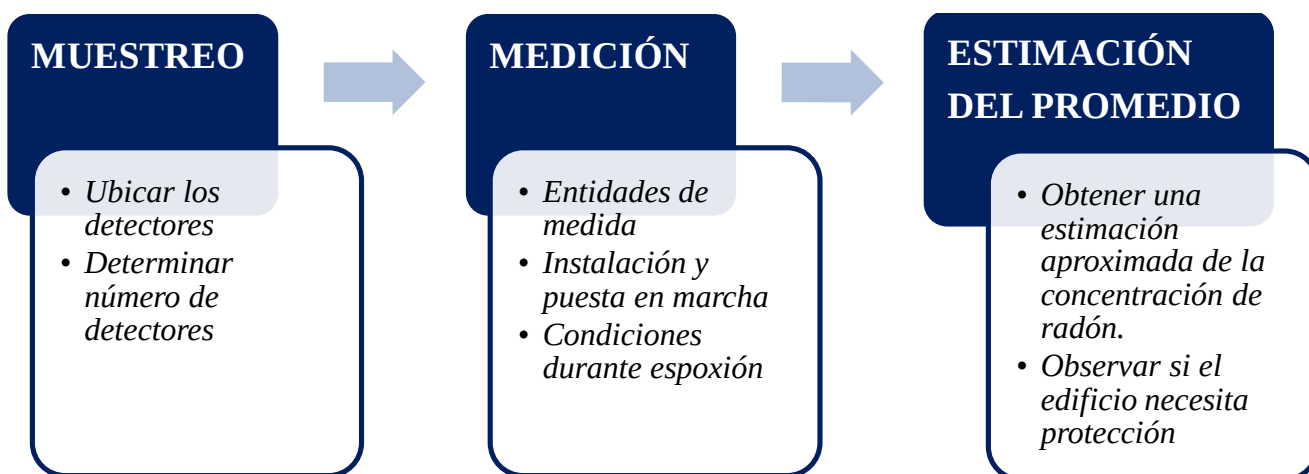


Figura 3-6 Fases de la metodología a seguir – Elaboración propia

Además, se obtendrán datos de las temperaturas de las zonas donde se coloquen detectores de radón y se utilizarán datos meteorológicos extraídos de la estación meteorológica de Lourizán, en Pontevedra, disponible en la página web de Meteogalicia¹¹.

3.2.5 Fase de muestreo

1. Determinación del número de detectores

En esta parte se definirán en primer lugar las zonas de muestreo necesarias en el edificio. Estas zonas se establecen en aquellas plantas del edificio donde exista una probabilidad más alta de presentar elevados niveles de radón. La normativa exige que se tomen mediciones en las plantas baja,

¹¹ Servicio meteorológico local de la comunidad autónoma de Galicia.

primera y última, es decir, la más alta, y que además posean locales habitables¹². En el caso del edificio Marqués de la Victoria, será en todas las plantas: baja, primera y segunda, ya que en todas ellas hay locales habitables.

Para limitar la zona de muestreo se tiene en cuenta que se debe establecer:

- 1 zona de muestreo por cada 200 m² de superficie útil: en este caso se consideran el conjunto de camaretas como unidad de uso¹³. Al haber 20 camaretas en la planta, y cada una de ellas tiene 38 m², la superficie total suma 760 m². Por ello, son necesarios al menos 4 detectores.
- 1 zona de muestreo por planta: con ello, además de estar cumpliendo la normativa del CTE, se pretende analizar como varía en nivel de cantidad de radón colocando tres detectores (uno en cada planta) en la misma línea vertical.
- Cuando la superficie sea entre 1000 m² y 1500 m² se establece 1 zona por cada 400 m²: este es el caso que aparece en la planta baja, ya que en ella se encuentra el comedor de alumnos con 1100 m², por lo que son necesarios al menos 3 detectores.

Al poseer únicamente 5 detectores, lo que se decide hacer es establecer una estrategia para conseguir una toma de datos lo más certera posible acorde con la normativa del CTE para conseguir obtener un mapeo claro del mayor número de puntos posibles a lo largo de todo el edificio. Dada la importancia de la limitación temporal, no se podrán obtener medidas de todos los puntos del edificio, pero sin embargo sí que se obtienen de los más representativos, pudiendo observar cómo reacciona el edificio ante el gas radón. Para ello, se realizan varias fases de medición de 7 días en cada punto elegido del edificio con el fin de levantar unas medidas lo más completas posibles.

En los planos siguientes se indica la situación de los detectores a lo largo de las 4 etapas que se encuadran en el calendario de la Figura 3-7.

- Primera etapa (18 enero – 25 enero) en color amarillo.
- Segunda etapa (25 enero – 1 febrero) en color azul.
- Tercera etapa (1 febrero – 8 febrero) en color verde.
- Cuarta etapa (8 febrero – 15 febrero) en color rojo.
- Quinta etapa (15 febrero – 22 febrero) en color morado.

LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	1	2	3

Figura 3-7 Calendario de toma de medidas – Elaboración propia

¹² Recinto interior destinado al uso de personas cuya densidad de ocupación y tiempo de estancia exige unas condiciones acústicas, térmicas y de salubridad adecuadas.

¹³ Edificio o parte de un edificio que se destina a un uso específico.

2. Ubicación de los detectores

La localización de los detectores en cada zona de muestreo se elige de forma que sea representativa en las estancias donde la presencia y actividad de las personas sea más elevada, así como las más propensas a presentar altos niveles de radón. En cuanto la ubicación de los detectores, se tiene en cuenta los sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación, así como las entradas y salidas de aire.

A lo largo de la planta baja se colocaron en total los cuatro detectores distribuidos tal y como aparecen en la siguiente figura.

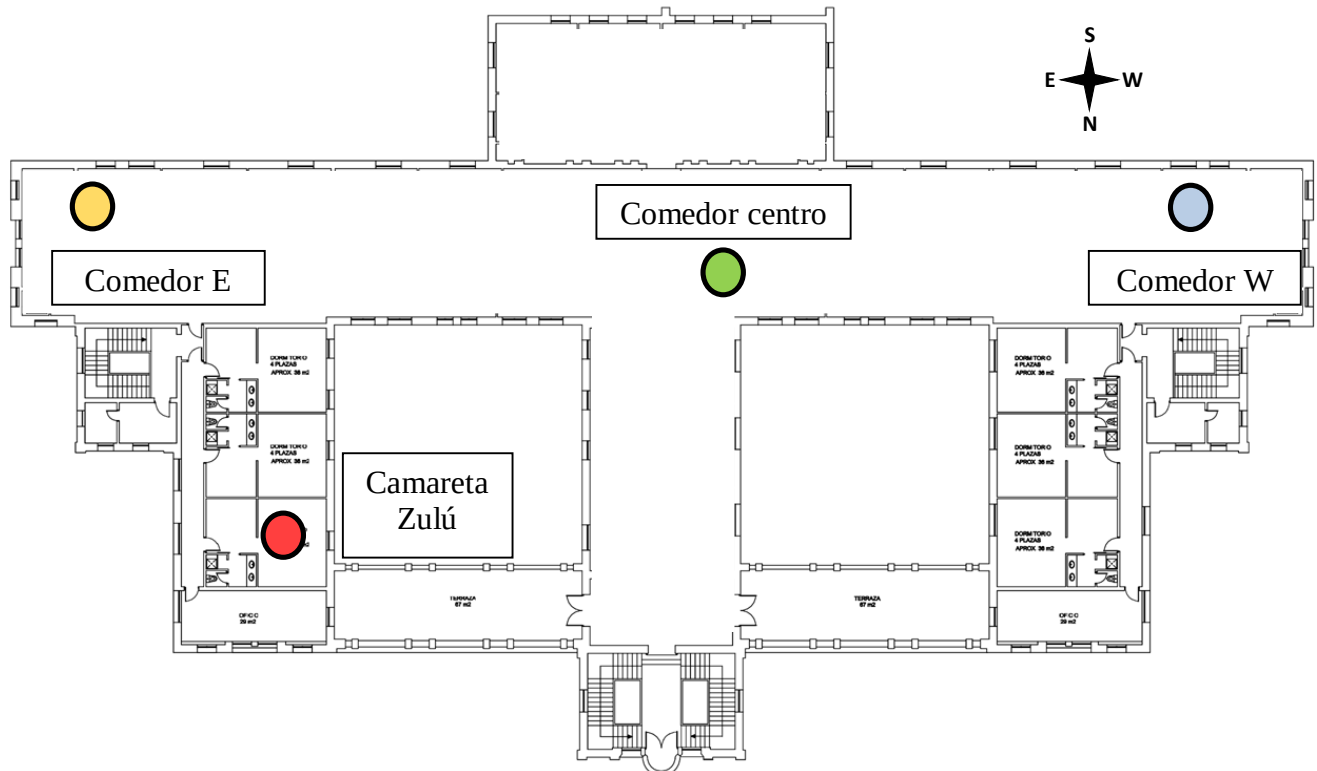


Figura 3-8 Ubicación de los detectores en la planta baja del cuartel – ENM

En la primera planta se colocaron en total nueve puntos de medida a lo largo de todo el tiempo de fase de medición como se puede observar en la Figura 3-9.

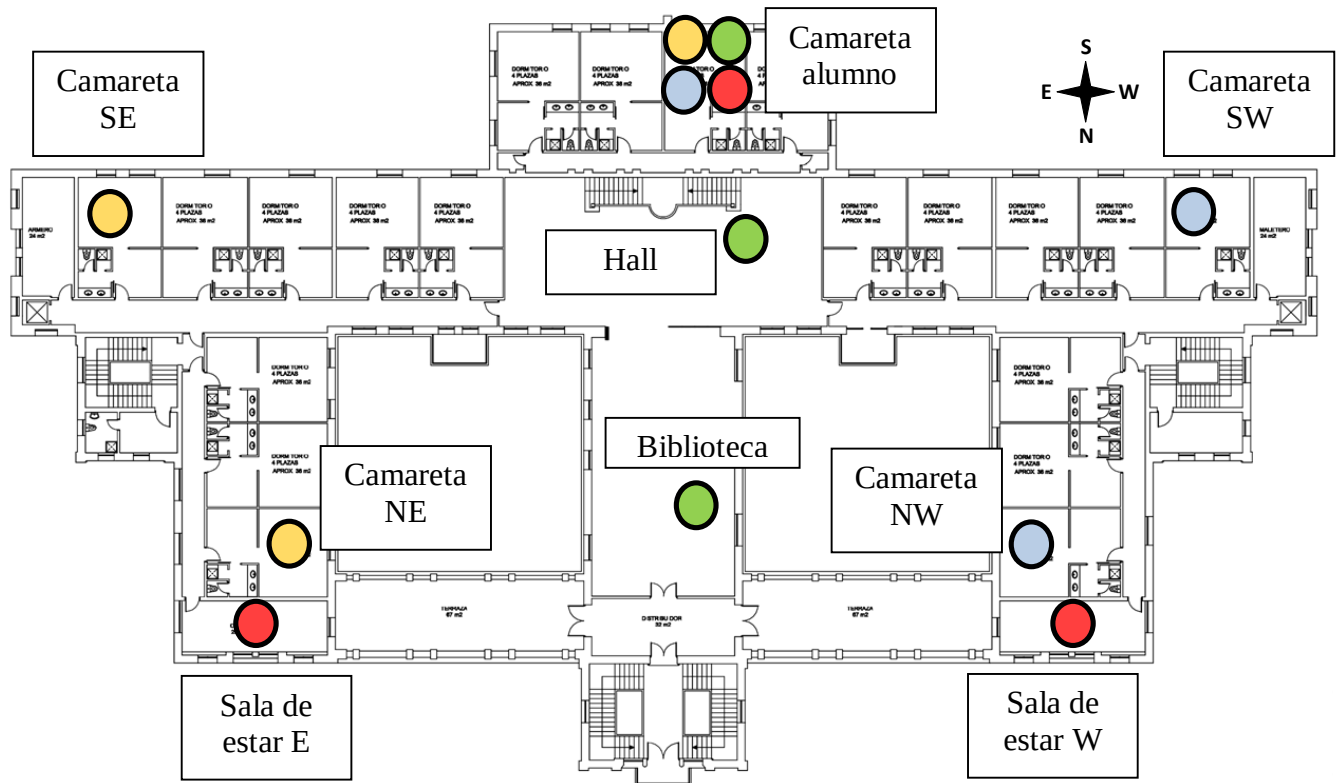


Figura 3-9 Ubicación de los detectores en la planta 1 del cuartel – ENM

En la segunda planta se situaron los detectores tal y como aparecen en la Figura 3-10.

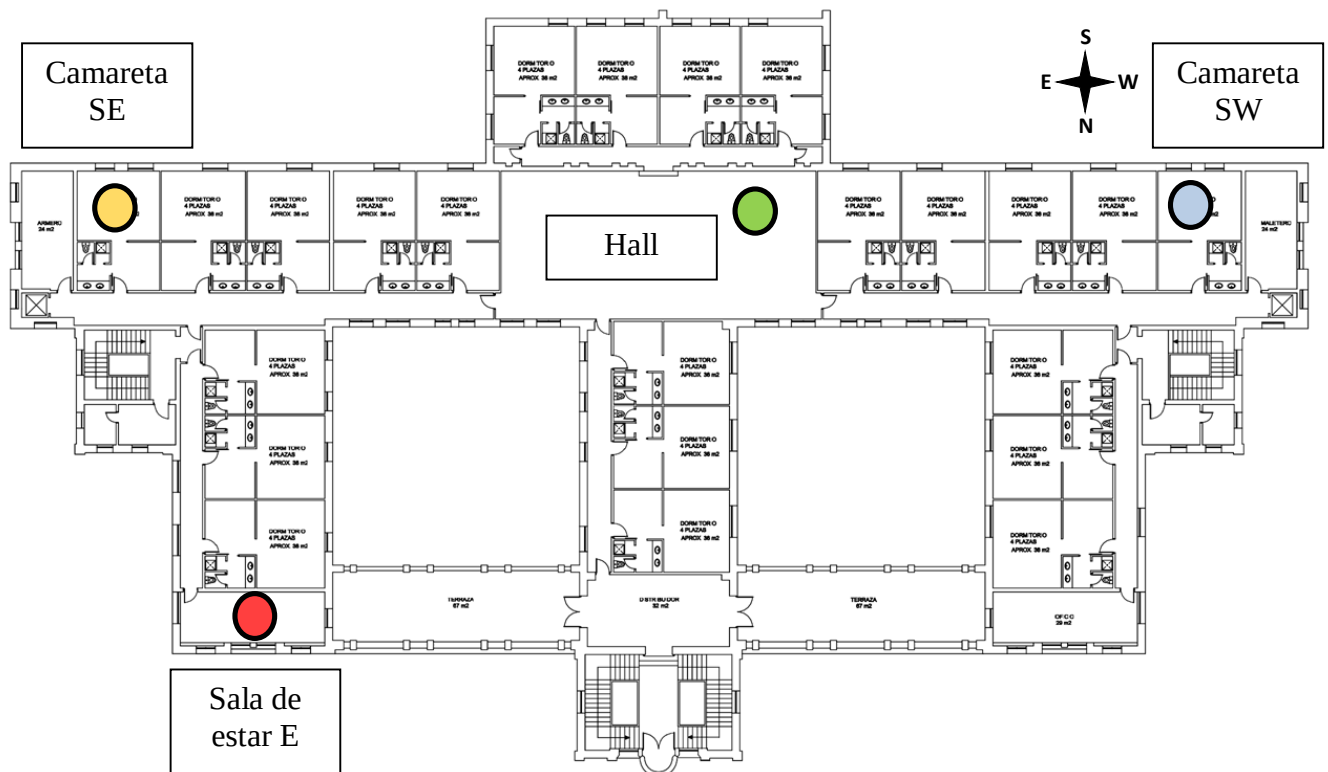


Figura 3-10 Ubicación de los detectores en la planta 2 del cuartel – ENM

En resumen, los detectores se han colocado como se indica a continuación:

PRIMERA ETAPA (18 ENERO – 25 ENERO)

- 3 DETECTORES EN LA MISMA VERTICAL: de esta manera se podrá observar como varía la concentración de radón en la misma línea vertical del edificio en la parte Este, situando un detector en cada planta. El primero se encuentra situado la planta baja, en el comedor de alumnos, el segundo en la primera planta en una de las camaretas, y el tercero de ellos en una camareta de la segunda planta.
- 1 DETECTOR EN LA PRIMERA PLANTA EN LA PARTE NORTE: con él se pretende contrastar los resultados con el otro detector situado en su misma planta. De esta manera se pretende observar si la concentración de radón varía en función de la parte del edificio.
- 1 DETECTOR EN LA CAMARETA PROPIA DEL ALUMNO: así se podrá tener un control detallado de las condiciones en las que opera el detector. Es decir, horas de apertura de ventanas de ventilación, horas de uso de sistemas de calefacción, entrada y salidas de personas, etc. con el fin de conseguir posteriormente un detallado análisis de cómo afectan todos estos factores a la concentración de radón en una camareta de forma habitual.

SEGUNDA ETAPA (25 ENERO – 1 FEBRERO)

- 3 DETECTORES EN LA MISMA VERTICAL: de esta manera se podrá observar como varía la concentración de radón en la misma línea en la parte Oeste del edificio situando un detector en cada planta. El primero se encuentra situado la planta baja, en el Comedor de Alumnos, el segundo en la primera planta en una de las camaretas, y el tercero de ellos también es una camareta de la segunda planta.
- 1 DETECTOR EN LA PRIMERA PLANTA EN LA CARA NORTE: con él se pretende contrastar los resultados con el otro detector situado en su misma planta, pero en la cara SUR del edificio. De esta manera se observan los contrastes a diferentes temperaturas.
- 1 DETECTOR EN LA CAMARETA PROPIA DEL ALUMNO: con la misma finalidad de la “PRIMERA ETAPA”.

TERCERA ETAPA (1 FEBRERO – 8 FEBRERO)

- 3 DETECTORES EN LA MISMA VERTICAL: de esta manera se podrá observar como varía la concentración de radón en la misma línea vertical del edificio situando un detector en cada planta. En este caso, se colocaron los detectores en el centro del Comedor de Alumnos en la planta baja, en el hall de la primera planta, y en el hall de la segunda planta.
- 1 DETECTOR EN LA BIBLIOTECA DE LA PRIMERA PLANTA: con él se pretende tener las mediciones de un área de tránsito, frecuentemente ventilada.
- 1 DETECTOR EN LA CAMARETA PROPIA DEL ALUMNO: con la misma finalidad de la “PRIMERA ETAPA”.

CUARTA ETAPA (8 FEBRERO – 15 FEBRERO)

- 3 DETECTORES EN LA MISMA VERTICAL: de esta manera se podrá observar como varía la concentración de radón en la misma línea vertical del edificio situando un detector en cada planta. En este caso, se colocaron los detectores tanto en locales poco frecuentados, como es el caso de la planta baja, como también en zonas sin acceso de personal en las plantas primera y segunda de la parte Este del edificio.
- 1 DETECTOR EN LA PRIMERA PLANTA: en la zona Oeste. Con él se pretende contrastar las medidas de dos locales sin acceso de personal en la misma planta, pero en diferente ubicación y sometidos a las mismas condiciones.
- 1 DETECTOR EN LA CAMARETA PROPIA DEL ALUMNO: con la misma finalidad de la “PRIMERA ETAPA”.

QUINTA ETAPA (15 FEBRERO – 25 FEBRERO)

Durante esta etapa se tomaron resultados de otros edificios para tener una estimación de concentración de radón aproximada. Teniendo en cuenta que la cantidad de detectores que se tiene es cinco, se decidió instalarlos en cinco edificios diferentes. Los detectores se situaron en las plantas bajas de cada uno, ya que es donde existe mayor probabilidad de encontrar elevada concentración de radón.

Los edificios en los que se tomaron medidas fueron los siguientes:

- ISAAC PERAL: en el aula 40.

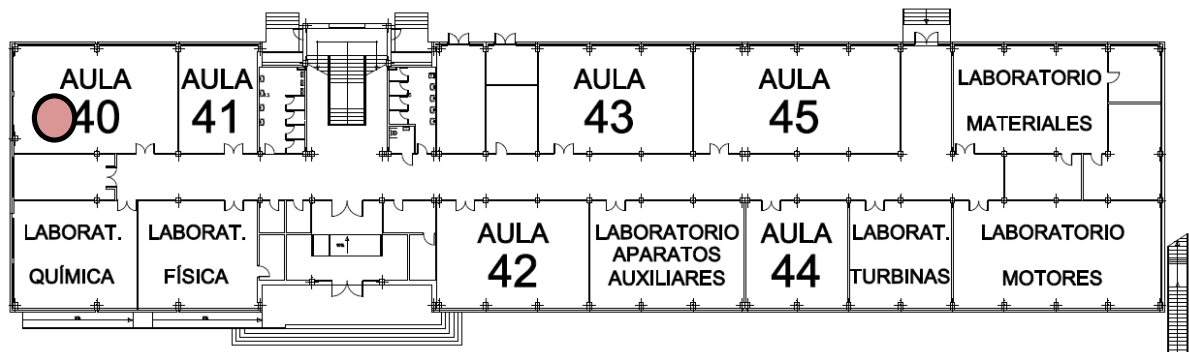


Figura 3-11 Ubicación del detector en la planta baja del edificio Isaac Peral – ENM

- CENTRO UNIVERSITARIO DE LA DEFENSA: en concreto en la planta baja, en la Sala de Grados.
- PATIO DE AULAS: en el aula 16.

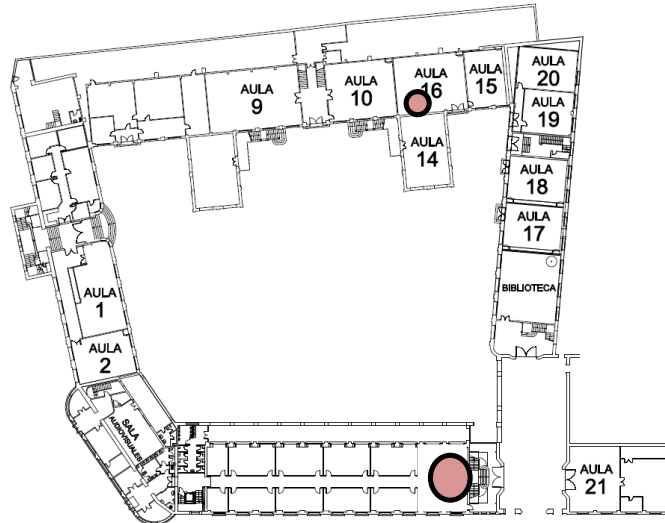


Figura 3-12 Ubicación de los detectores en la planta baja del Patio de Aulas – ENM

- CUARTEL DE ALUMNOS FRANCISCO MORENO: en la biblioteca Ciscar y Ciscar.

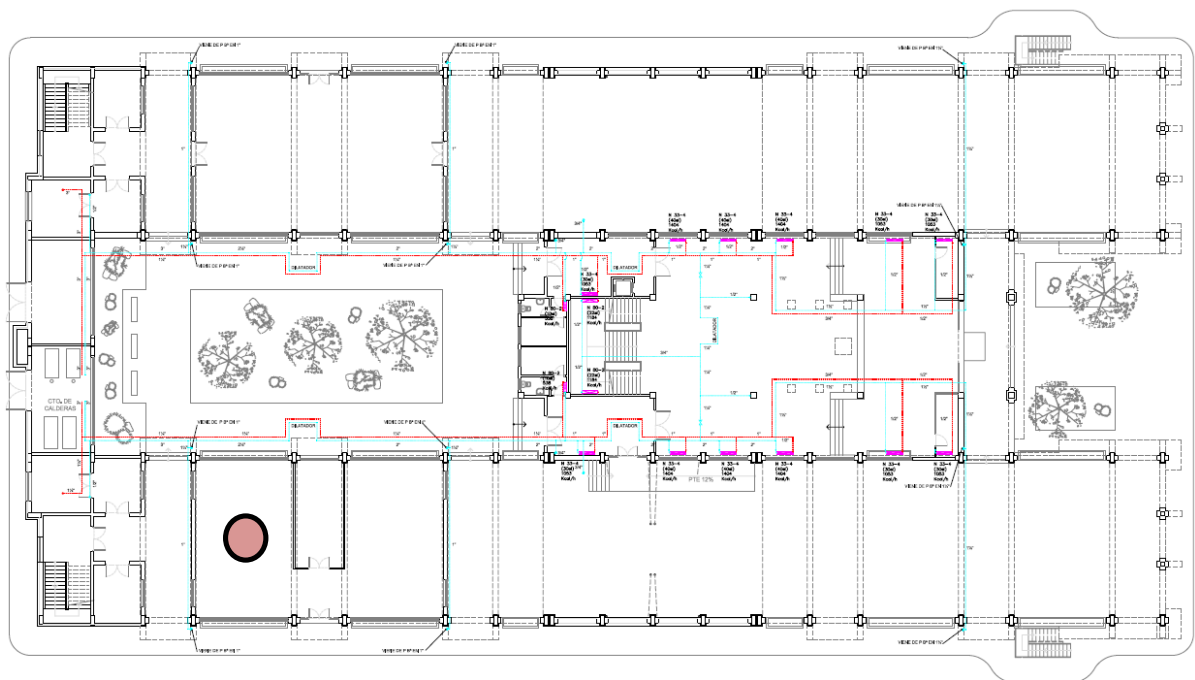


Figura 3-13 Ubicación del detector en la planta baja del edificio Francisco Moreno – ENM

- EDIFICIO DE INVESTIGACIÓN: en el laboratorio de mecánica

3.2.6 Fase de medición y de estimación del promedio anual de concentración de radón

- Una altura entre 50 y 180 cm sobre el nivel del suelo.
- Una distancia mayor de 30 cm de las paredes y puertas.
- Estar a más de 10 cm de otros objetos.

Durante el periodo de exposición de los detectores se deben de seguir los hábitos comunes de ocupación del edificio, con el fin de observar la cantidad de radón más objetivamente. En caso de que existieran medidas de protección frente al radón (en este caso no), estos deberán estar en el régimen habitual de funcionamiento.

45

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de las mediciones del Cuartel Marqués de la Victoria

En este apartado se adjuntan los resultados de las mediciones obtenidas por los detectores de radón durante las diferentes fases de muestreo. Estos datos darán soporte al posterior análisis donde se llegará a conclusiones en base a los registros de los diferentes muestreos.

La clasificación de resultados puede ser muy variada. En este TFG se van a clasificar por las fases de medición que tienen lugar los mismos días, en concreto de viernes a viernes, durante 7 días, ya que los resultados están sujetos a las mismas condiciones meteorológicas. Por otro lado, también se compararán los resultados de cada planta por separado y se analizará el efecto de las condiciones meteorológicas.

A lo largo de este capítulo aparecerán diversas gráficas donde se muestran los resultados de una forma intuitiva. Para poder interpretarlos de una forma más visual, se seguirá un código de colores en función de la planta en la que se encuentre el detector de radón. Los colores a usar serán el rojo, amarillo y el verde, asociándose a la planta baja, primera y segunda respectivamente. Por lo general, corresponderá a un mayor nivel de concentración de radón cuanto más cerca se encuentren del suelo, haciendo un símil a los colores del semáforo. Exceptuando las gráficas en las que se comparen los resultados de dos o varias zonas en la misma planta, donde se utilizarán otros colores para poder interpretarlas mejor.

Planta	Código de colores
BAJA	
PRIMERA (1)	
SEGUNDA (2)	

Tabla 4-1 Código de colores para cada planta en las gráficas - Elaboración propia

Las diversas gráficas con varias curvas representadas, estarán en función de la concentración de radón en el eje vertical primario (izquierda) y del tiempo en el eje horizontal primario (abajo). Además, en varias de las gráficas se añade un segundo eje vertical, (derecha) que representa otro factor como puede ser la presión, precipitaciones o cualquier otra condición meteorológica para ver cómo afecta a la concentración de radón. En cualquier caso, en todas las gráficas aparecerá una leyenda en la que aparecerá reflejado qué se está representando.

4.1.1 Fase 1 (18 de enero – 25 de enero)

En la Tabla 4-2 se muestra la concentración media durante los siete días que los detectores estuvieron en funcionamiento:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
1 – Este del Comedor	481
2 – Camareta NE Planta 1	92
3 – Camareta SE Planta 1	50
4 – Camareta SE Planta 2	71
5 – Camareta del alumno	87

Tabla 4-2 Concentración media de radón en la fase 1 - Elaboración propia

(Véase Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

En la Figura 4-1 se muestran los tres detectores que se colocaron en la misma vertical en cada una de las plantas. Como se puede observar, la concentración de radón en la planta baja es significativamente mayor en comparación con las otras dos.

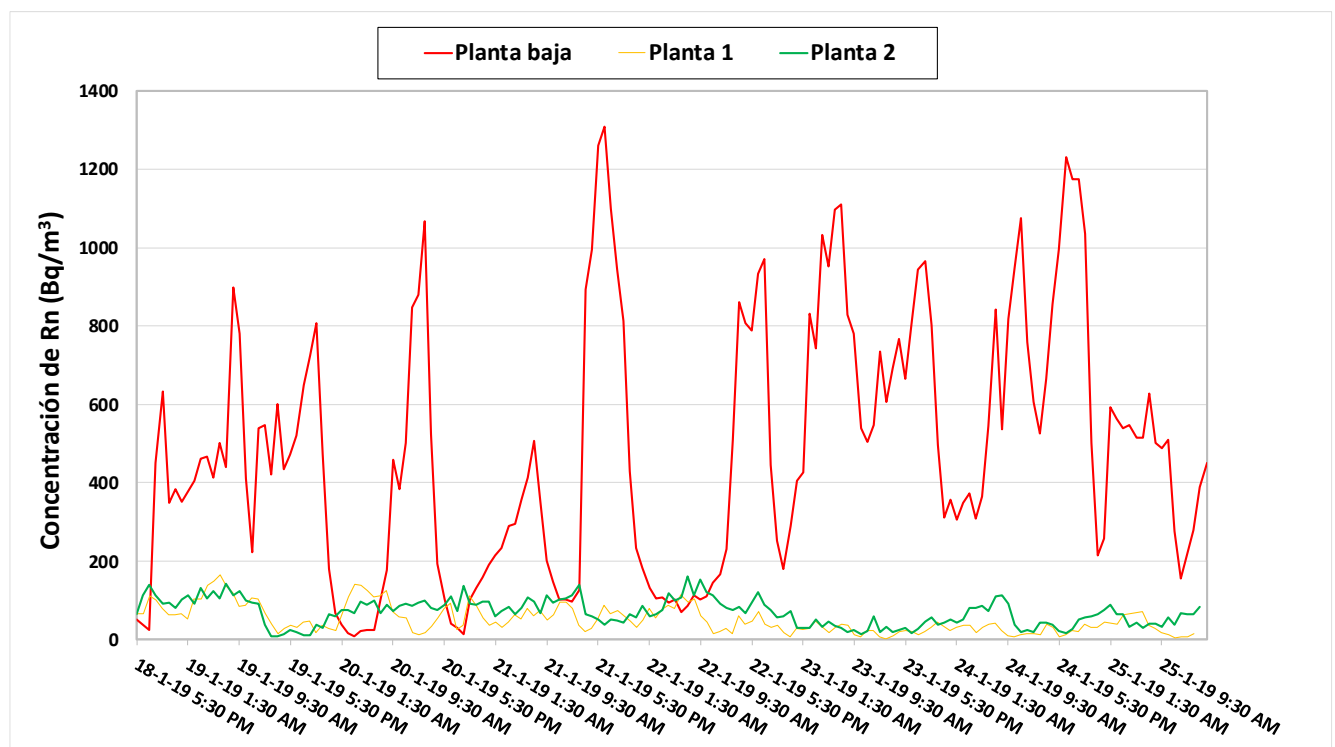


Figura 4-1 Tres detectores en misma línea vertical en parte Este del edificio - Elaboración propia

Se aprecian picos altos de concentración a lo largo de toda la semana. Generalmente se producen a primeras horas del día debido a que la presencia de radón empieza a incrementarse y acumularse a lo largo de la noche, lo que está acorde con la literatura especializada.

Sin embargo, se da el caso de que los registros de la segunda planta son mayores que los de la primera. Al estudiar las costumbres de las personas que viven en esas camaretas, se observa que cuando en la camareta de la segunda planta no existe un hábito constante de ventilar, o en caso de que exista, es una hora como máximo al día, la camareta de la primera planta es totalmente opuesta

en comportamiento, ya que los ocupantes de esta última suelen tener la ventana abierta a lo largo de la mañana. Y lo que es más relevante aún, desde el lunes 21 hasta el jueves 24 durmieron con la ventana abierta.

Lo que es evidente sobre esta fase de medición es la considerable diferencia que existe entre la planta baja y el resto de plantas, ya que la concentración de radón es de hasta 9,5 veces mayor que en la primera planta el día 21, siendo esta la que posee frecuente ventilación.

Por otro lado, los altos registros en la planta baja se deben a la proximidad del suelo, ya que solo la solera lo separa de la zona de habitabilidad, y a la nula o escasa ventilación de esta zona del comedor (zona Este). Además, como puede comprobarse, la tendencia es que a medida que se asciende en las plantas va disminuyendo la concentración considerablemente.

En la Figura 4-2 se comparan las dos camaretas situadas al Este del edificio. Al estar en la misma planta (primera) ambas deberían ir en color amarillo, pero se han cambiado de color para que sea más sencillo interpretar la gráfica.

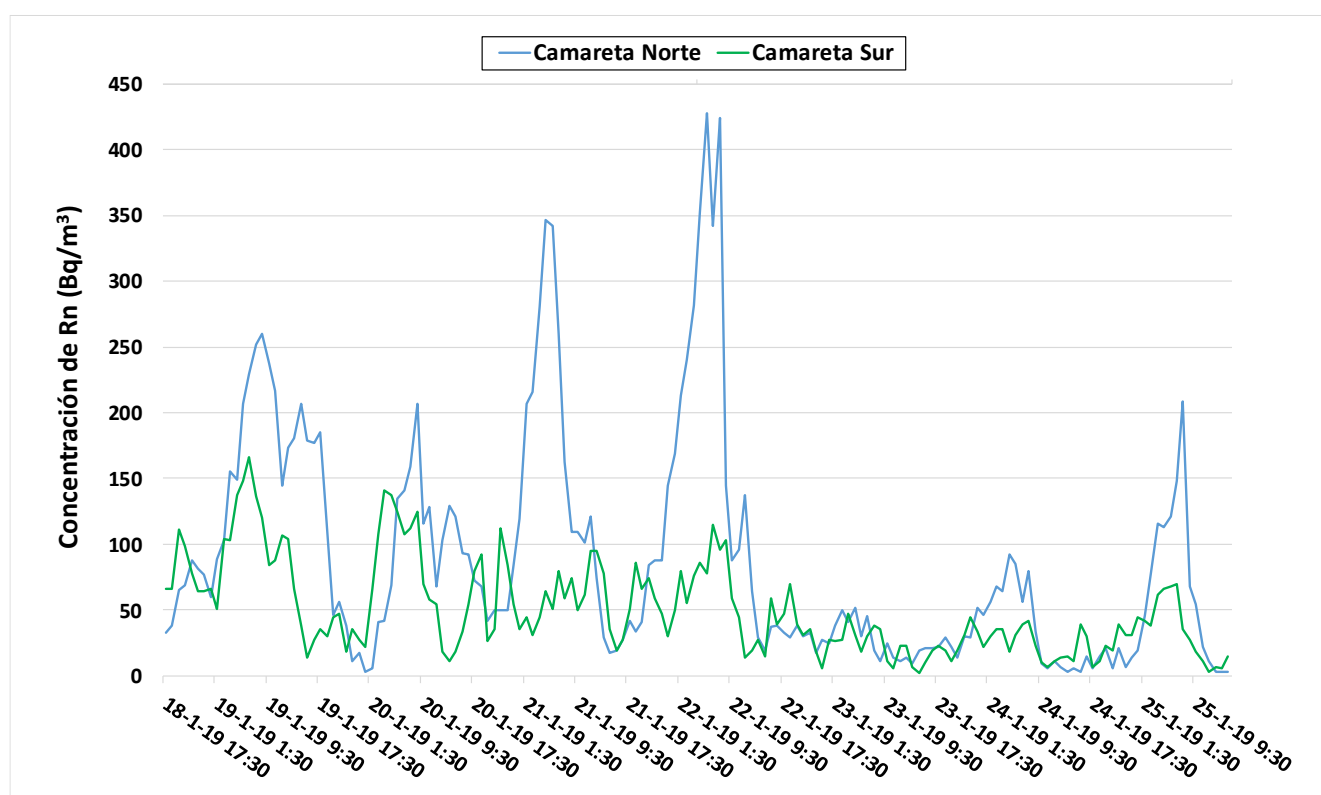


Figura 4-2 Camaretas N y S de la parte E de la planta 1 - Elaboración propia

Únicamente les separan unos 15 metros, aun así, la diferencia de concentraciones entre una y otra son considerables. Como ya se ha comentado antes, la camareta Sur estaba continuamente ventilada, mientras que la Norte apenas lo estaba. Esto puede ser debido a que las camaretas de la zona Sur tienden a ser más cálidas por la ubicación en la que se hallan y, por tanto, se ventilan con mayor frecuencia.

Se colocó un termómetro en cada camareta, y se observó que la diferencia de temperatura media era de 1,5°C entre ambas, por lo que aparentemente puede influir, puesto que una mayor diferencia de temperatura entre el interior y exterior facilitará la entrada de radón. Sin embargo, los hábitos diarios para conseguir esas temperaturas similares son completamente diferentes en cada camareta, ya que, mientras que la camareta del Sur suele tener más de ocho horas la ventana abierta y tener la calefacción encendida únicamente en ocasiones muy puntuales, la camareta del Norte se encuentra con la calefacción en funcionamiento todo el día y sin apenas ventilar para poder conseguir esa temperatura de “confort” para los ocupantes.

Con ello, no se observa que la temperatura sea decisiva para la entrada de radón, pero la manera de conseguir esa temperatura (mediante los hábitos de las personas que la ocupan) afecta directamente a favorecer que se acumule en mayor o menor medida.

4.1.2 Fase 2 (25 de enero – 1 de febrero)

En la Tabla 4-3 se muestra la concentración media durante los siete días que los detectores estuvieron en funcionamiento:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
1 – Oeste del Comedor	245
2 – Camareta NW Planta 1	242
3 – Camareta SW Planta 1	583
4 – Camareta SW Planta 2	134
5 – Camareta del alumno	65

Tabla 4-3 Concentración media de radón en la fase 2 - Elaboración propia

(Véase Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

Como se ha ido enunciando a lo largo del TFG, la concentración de radón va a ser mayor en las plantas más cercanas al suelo, sin embargo, no siempre ocurre lo mismo.

En la siguiente gráfica se exponen los 3 detectores situados en la misma línea vertical en la parte Oeste del edificio. Como puede comprobarse, la planta 1 registra unos datos considerablemente altos.

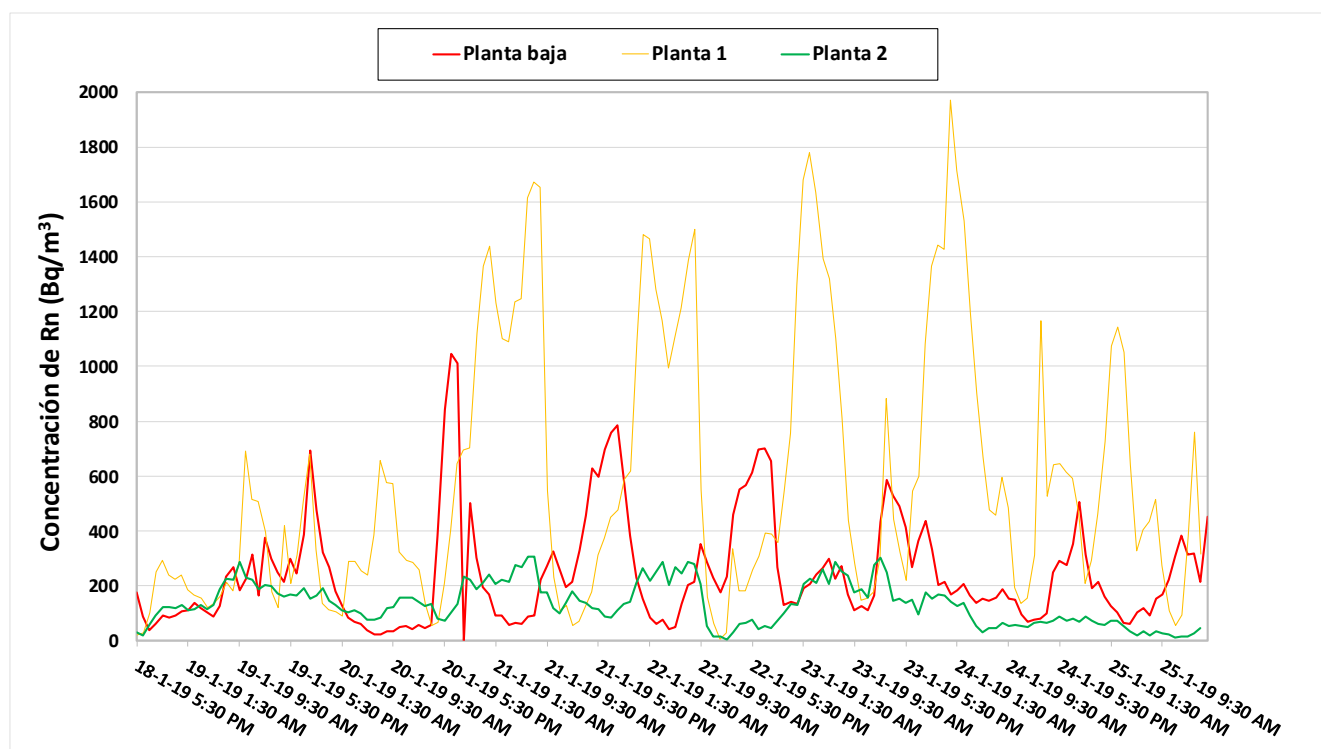


Figura 4-3 Tres detectores en misma línea vertical en parte Oeste del edificio - Elaboración propia

En la Figura 4-3, se puede apreciar como la camareta de la planta 1 posee niveles de radón mucho mayores frente a la planta baja y planta 2. Esto puede relacionarse a que en la zona de la

planta baja se encuentra el comedor, con una puerta de acceso de personal donde el flujo de personas es casi constante a lo largo del día y, por lo tanto, que la zona se encuentra en constante ventilación. Esto supone que los niveles de radón sean más bajos frente a la planta 1, que tiene una ventilación escasa de únicamente de tres horas durante la mañana.

En concreto, la camareta de la planta 1 registra una media de 583 Bq/m^3 , mientras que planta baja únicamente 245 Bq/m^3 , es decir 2,4 veces más. Por otro lado, como cabe esperar, la camareta de la planta 2 registra datos sensiblemente menores debido a estar más alejada del suelo a pesar de tener los mismos hábitos de ventilación que la camareta de la planta 1.

Por otro lado, se analizaron los dos detectores situados en la cara Oeste del edificio de la planta 1, en concreto el de la parte Norte y el de la Sur. Los resultados que se obtuvieron fueron los que aparecen en la siguiente gráfica:

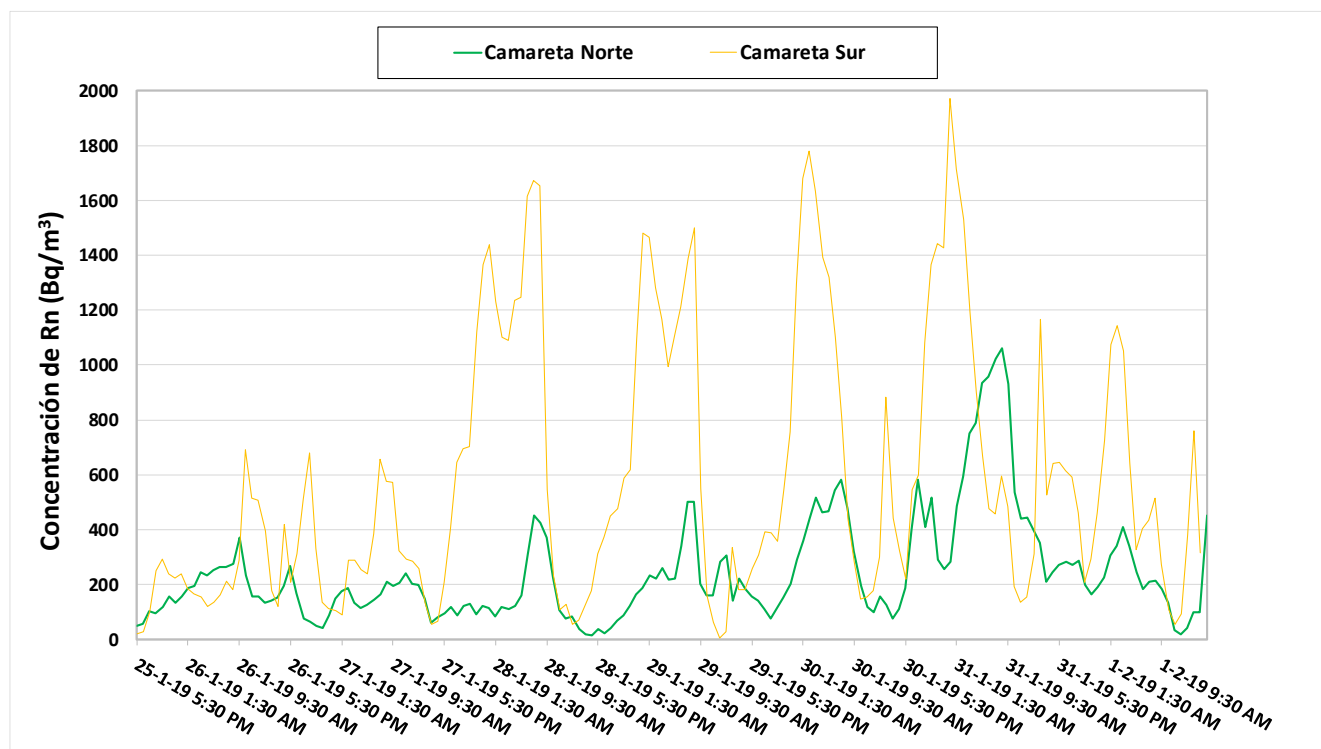


Figura 4-4 Camaretas N y S de la parte W de la planta 1 - Elaboración propia

Como puede comprobarse, la camareta Sur registra unos datos significativamente mayores que los de la Norte. Se puede apreciar como ambas curvas tienen similar tendencia, sobre todo desde el día 27 al 31, es decir, durante los días laborables, donde existe un patrón similar. Esos mismos días, se registraron picos más acentuados de lo habitual a lo largo de la semana, y todos ellos tuvieron lugar entre las 01:30 y 09:30. Además, los días 28 y 29 llegan incluso a registrarse dos picos en un intervalo de tiempo de apenas ocho horas.

Por otro lado, tan solo 15 metros separan a ambas camaretas, pero los picos de concentración de radón llegan a ser de casi cuatro veces mayor, como es el caso del día 28 a las 09:30, a pesar de tener prácticamente las mismas costumbres de actividad humana y de ventilación (tres horas de apertura de la ventana durante la mañana).

La temperatura media en ambas camaretas es prácticamente similar, por lo que no será un factor decisivo para explicar la diferencia de concentración de radón entre ambas camaretas, por lo que serán necesarios estudios más avanzados y en profundidad para investigar este caso. Con todo ello, se

observa que el edificio claramente no posee una concentración de radón regular y uniformemente distribuida.

4.1.3 Fase 3 (1 de febrero – 8 de febrero)

En la Tabla 4-4 se muestra la concentración media durante los siete días que los detectores estuvieron en funcionamiento:

Durante los 7 días que los detectores estuvieron en funcionamiento, se registró:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
1 – Centro del Comedor	360
2 – Biblioteca Planta 1	56
3 – Hall Planta 1	44
4 – Hall Planta 2	89
5 – Camareta del alumno	113

Tabla 4-4 Concentración media de radón en la fase 3 - Elaboración propia

(Véase Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

En la siguiente gráfica se representan los tres detectores situados de forma vertical en las tres plantas en la zona central del edificio. Se puede ver cómo la planta 2, que en principio debería tener una menor concentración de radón, posee por el contrario notablemente más que la planta 1, en concreto dos veces más.

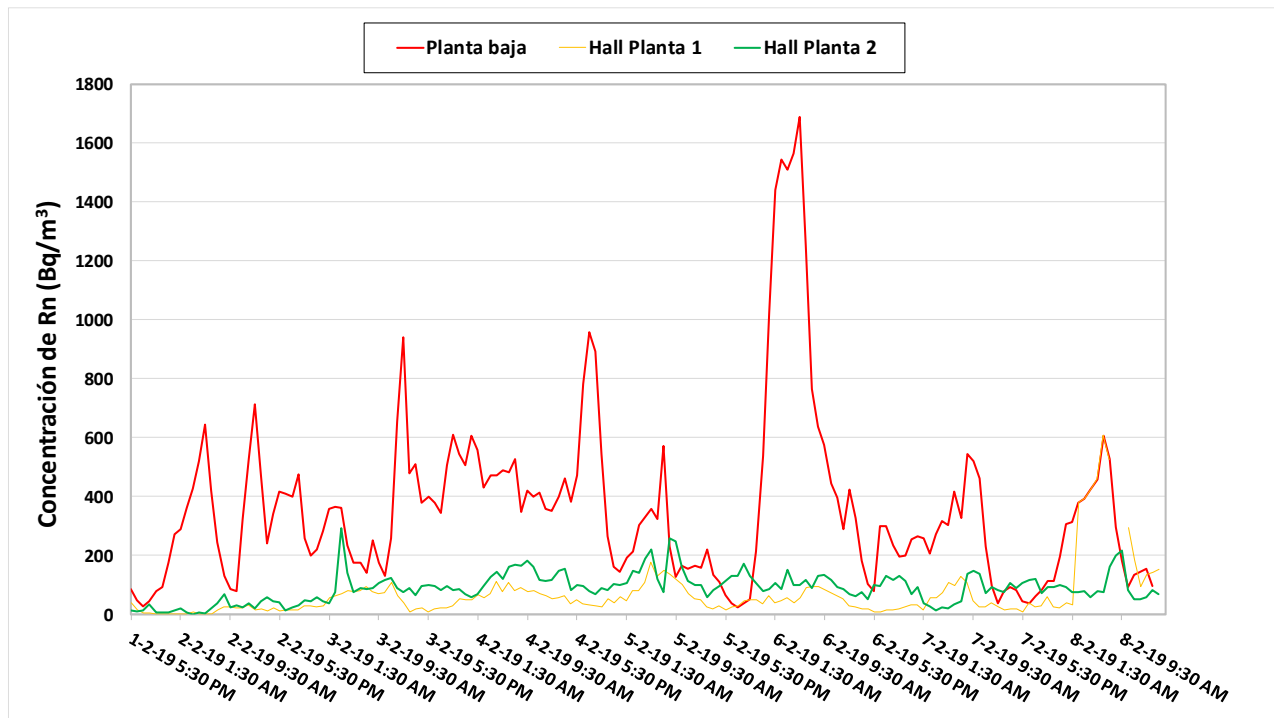


Figura 4-5 Tres detectores en misma línea vertical en parte central del edificio - Elaboración propia

Sin embargo, a diferencia de la planta 2, la planta 1 no posee una fila de camaretas en la parte central del edificio, sino que en ella se encuentra la biblioteca, una zona amplia, y que además es una zona de tránsito habitual para las personas que acceden a las camaretas de la primera planta, por lo que se encuentra constantemente ventilada a lo largo de todo el día. En cambio, la planta 2, posee un

acceso por la parte central, a través de un pasillo, y no a través de una zona amplia como es la biblioteca, y que además se encuentra con las puertas cerradas habitualmente, lo que produce el efecto que queda representado en la Figura 4-5.

Por lo tanto, aparentemente, la concentración de radón se ve afectada por la ventilación no solo en espacios pequeños, sino que también en zonas amplias como pueden ser los distribuidores de cada planta.

4.1.4 Fase 4 (8 de febrero – 15 de febrero)

En Figura 4-6 se muestran los registros de los tres detectores situados de nuevo en la misma línea vertical en la parte Este del edificio, pero en este caso, colocados en locales poco habitados y frecuentados. Este es el caso de la Camareta Zulú, que corresponde a la camareta donde se alojan los alumnos enfermos en la planta baja, y las dos salas de estar, tanto de la primera y segunda planta, que se encuentran en desuso y que, por tanto, nadie accede a dichas zonas en ningún momento.

Durante los 7 días que los detectores estuvieron en funcionamiento, se obtuvieron los valores medios que en la Tabla 4-5 se indican. Se constata que al no haber factores externos que alteren los resultados, los valores disminuyen a medida que la distancia al suelo aumenta.

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m³)
1 – Camareta Zulú	575
2 – Sala de estar - Planta 1 Este	361
3 – Sala de estar - Planta 2	271
4 – Sala de estar - Planta 1 Oeste	525
5 – Camareta del alumno	120

Tabla 4-5 Concentración media de radón en la fase 4 - Elaboración propia

(Véase Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

En la siguiente gráfica se representan los datos de los tres detectores situados en la línea vertical en la parte Este del edificio.

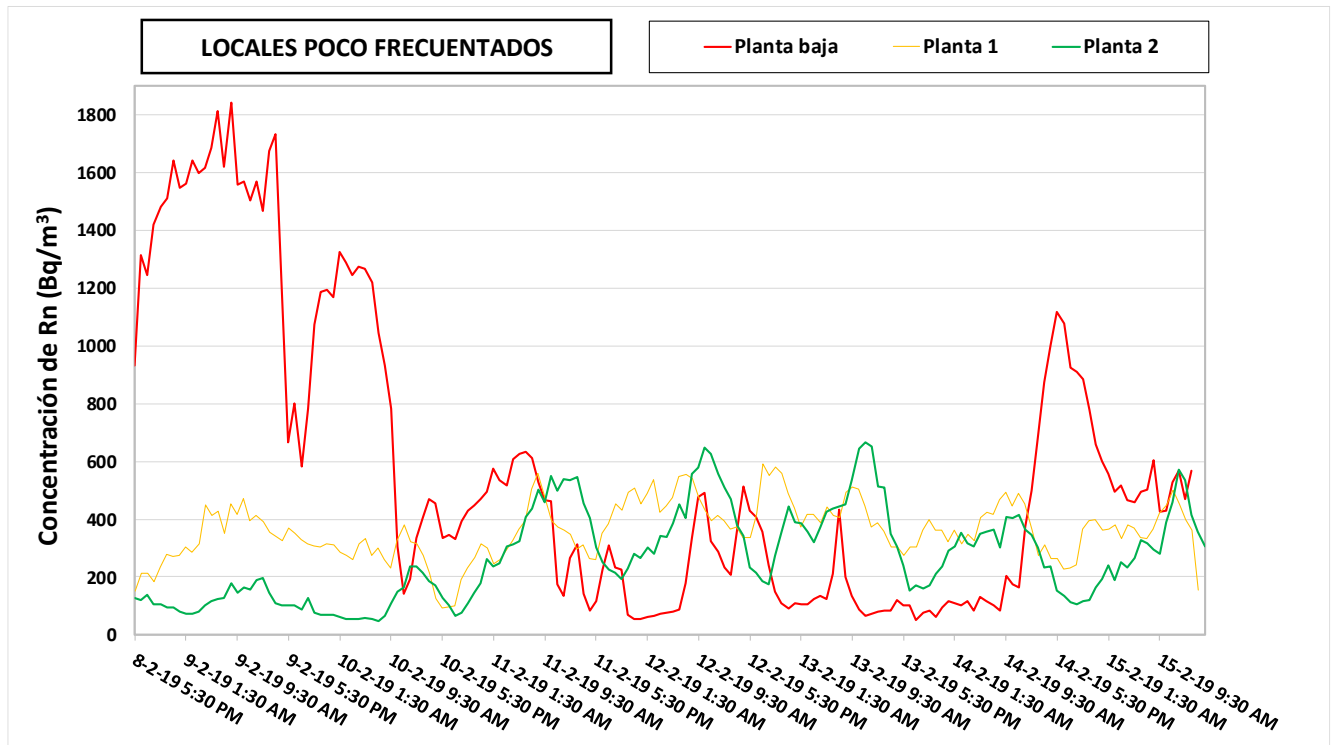


Figura 4-6 Tres detectores en misma línea vertical en parte Este del edificio en zonas con poca o inexistente actividad humana - Elaboración propia

En este caso, aparece la situación más habitual que cabe esperar tal y como se ha ido explicando a lo largo del TFG, pues se trata de resultados comunes y propios de zonas poco frecuentadas o en desuso.

Como se puede observar en la gráfica, la concentración de radón en la planta baja (Camareta Zulú) registra unos picos durante las primeras 24 horas muy elevados, y tras ellos, va disminuyendo hasta que vuelve a aparecer otro pico sobre las 01:30 del día 10. Después, la gráfica sigue fluctuando, pero con valores mucho más inferiores, alcanzando apenas los 600 Bq/m³ y manteniendo esa dinámica hasta las 09:30 del día 14, que vuelve a producirse una subida significativa, llegando a producirse otro pico de 1160 Bq/m³ ocho horas, y tras él vuelven a caer los valores.

Aunque se desconocen los hábitos perfectamente detallados de las personas que estuvieron en la camareta Zulú, los registros de concentración de radón se ven afectados y se pueden asociar a la presencia y actividad humana, tanto la entrada y salida de los propios alumnos, como de los médicos que acuden a visitarlos, el personal de limpieza y las aperturas de las ventanas. El día que se instaló el detector, no había ningún enfermo en la camareta, por lo que la acumulación de radón era mucho mayor. Sin embargo, un alumno ingresó el día 9 en la camareta y estuvo interno durante cuatro días hasta el día 12, desconociéndose la hora, lo cual supuso una caída considerable de concentración de radón. Por último, otra persona ingresó de nuevo el jueves 14 a las 20:00 y estuvo el resto del tiempo que el medidor estuvo en funcionamiento, lo que puede explicar la caída de nuevo del radón tras el pico de 1160 Bq/m³.

Por otro lado, se situaron dos detectores en la planta 1 (en las salas de estar); uno en la Este y otro en la Oeste, con el fin de poder comparar dos zonas sin actividad humana, sometidos a las mismas condiciones temporales y meteorológicas. Los resultados son los correspondientes a los de la siguiente gráfica:

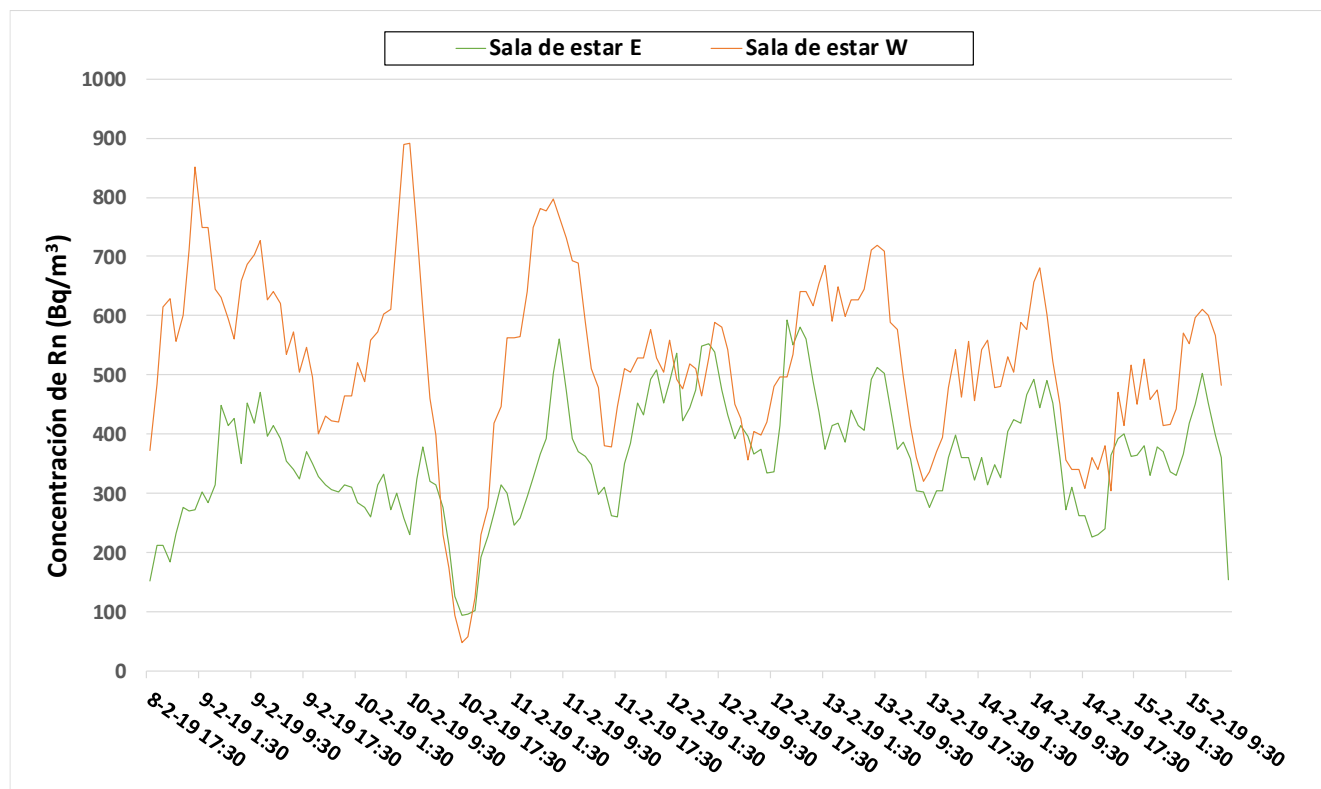


Figura 4-7 Salas de estar sin actividad humana de la planta 1 - Elaboración propia

Los resultados que se hallan son los esperados, es decir, unas fluctuaciones continuas a lo largo del tiempo y que a la vez ambas curvas siguen similar tendencia. Lo que más destaca de la gráfica es que la curva Oeste siempre refleja valores más elevados que la zona Este, a pesar de coincidir en la tendencia a lo largo de los siete días, excepto los días 11 y 12 donde los valores son similares. Los picos de ambas curvas van teniendo el mismo patrón, salvo del pico de casi 900 Bq/m³ de las 09:30 del día 10 que la curva de la sala de estar Oeste se dispara en comparación con la Este. En definitiva, se puede apreciar una tendencia similar en ambos lados del edificio, aunque la zona Oeste registra valores mayores que la Este de forma general.

Tras analizar las temperaturas de ambas salas, se aprecia que la sala de estar Oeste tiene una temperatura media mayor de 2,3°C con respecto a la Este. Este hecho puede relacionar que, a mayor diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del edificio, mayor concentración de radón queda acumulada.

Además, como puede observarse en la siguiente tabla, la concentración media de ambos detectores registrada durante toda la semana no coincide:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
1 – Sala de estar E en Planta 1	361
2 – Sala de estar W en Planta 1	525

Tabla 4-6 Concentración de radón media en salas de estar de la planta 1 - Elaboración propia

4.1.5 Mediciones durante un largo periodo de tiempo (18 de enero – 15 de febrero)

Durante este intervalo de tiempo el detector de la camareta del alumno estuvo en funcionamiento en todo momento, con el fin de poder tener unas medidas más extensas para poder analizar de forma general cómo puede fluctuar la concentración de radón en un punto. Además, de esta manera, se

podía tener en todo momento control de la apertura de la ventana (para analizar los periodos de ventilación de la camareta) creando un registro de las horas que se encontraba abierta o cerrada. Esta es la concentración media que se registró durante los 28 días:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
Camareta del alumno	96

Tabla 4-7 Concentración media de radón de la camareta del alumno - Elaboración propia

La Figura 4-8 representa los valores de los 28 días de funcionamiento en la camareta del alumno. Se observan fluctuaciones diarias en las que es habitual que se superen los 150 Bq/m³ prácticamente todos los días. Durante los días laborales, la concentración de radón sigue una secuencia muy similar, con ascensos de descensos durante el día y la noche.

Resalta la pendiente antes y después de cada pico en la mayoría de las veces, excepto desde el día 1 al 3 de febrero, donde tras alcanzar el pico, los valores de la concentración de radón no cayeron hasta los mínimos habituales, sino que se mantuvieron en 100 Bq/m³. Los días 1, 2 y 3 de febrero coincidieron en fin de semana, y durante ese intervalo de tiempo la camareta se mantuvo totalmente cerrada y nadie accedió a ella, por lo que esa ausencia de actividad humana y de ventilación puede asociarse a que la concentración de radón disminuyese como es habitual diariamente, pero no de forma tan significativa quedando acumulado radón durante esos días.

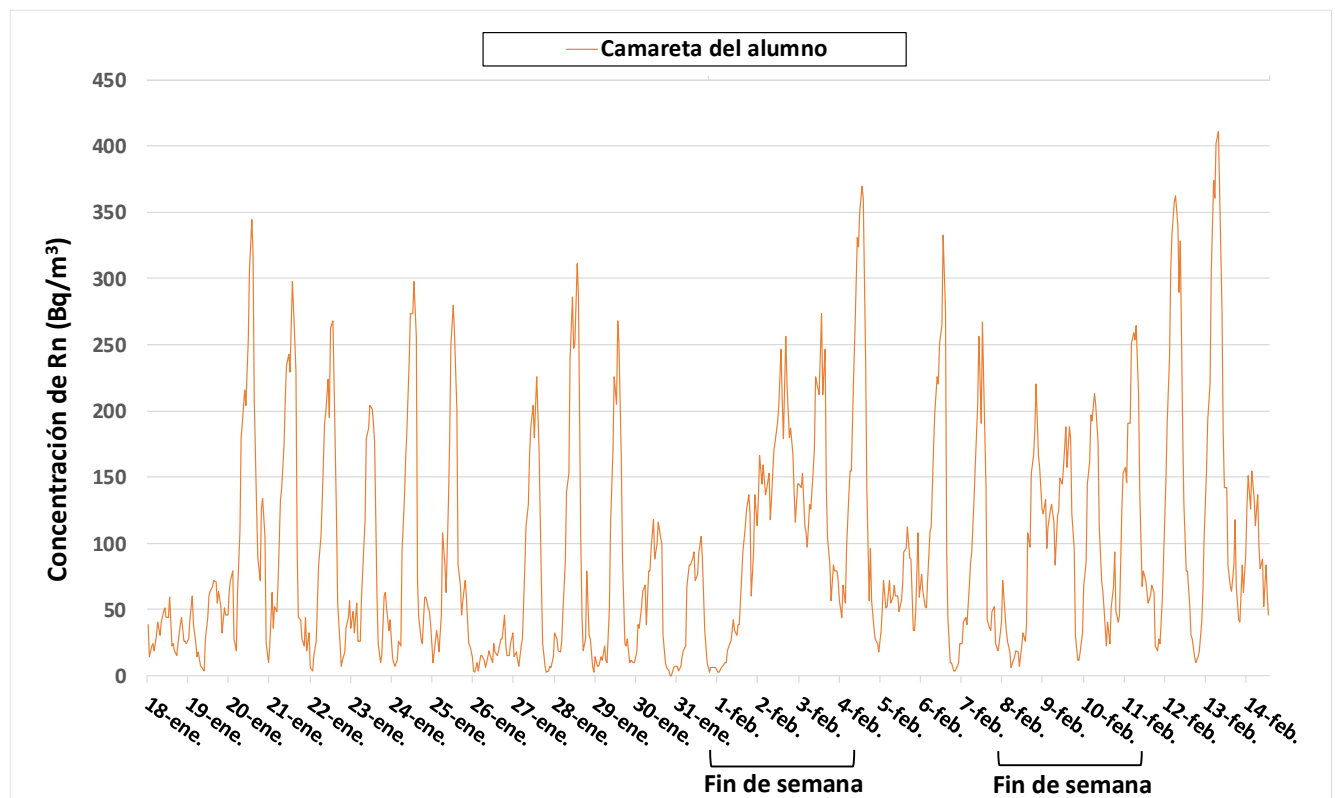


Figura 4-8 Concentración de radón en la camareta del alumno durante un mes - Elaboración propia

Los días 8, 9 y 10 de febrero vuelve a ocurrir lo que los días 1, 2 y 3 pero no de forma tan acusada. Al tratarse de un fin de semana, nadie accedió a la camareta y se mantuvo cerrada durante esos días. En este caso, tras el pico del día 8, la concentración de radón cae, pero no llega a registros casi nulos, sino que se registran 80 Bq/m³ aproximadamente durante el día 9, y tras ello, vuelve a ascender hasta 180 Bq/m³ horas después. Una vez alcanzado el pico siguiente, la concentración de radón vuelve a caer el lunes 10 continuando con la tendencia usual durante los días laborales.

Por otro lado, gracias al registro de horas donde se anotó cuánto tiempo la ventana estuvo abierta, se pueden explicar los motivos por los que los días 23, 26 y 31 de enero y el 5 y 14 de febrero poseen valores de pico diarios más bajos que el resto. En todos estos días la ventana se mantuvo abierta como mínimo tres horas (en el caso del día 23), y 12 como máximo (durante el día 26). Por ello, el pico diario más bajo durante los 28 días, corresponde al día que más horas se tuvo la ventana abierta, es decir, el 26, llegando a alcanzar apenas los 50 Bq/m³. Teniendo esto en consideración, puede afirmarse que la ventilación, al menos en un espacio tan reducido como una camareta, tiene un papel fundamental.

4.1.6 Análisis por planta

En este apartado se adjuntarán las gráficas por planta que se consideran de interés para obtener una perspectiva general de la cantidad de radón existente del edificio. Es importante recordar que no todas estas mediciones se realizaron durante los mismos días, por lo que no todos los detectores estuvieron sometidos a las mismas condiciones.

Planta Baja

En el siguiente caso se adjunta el gráfico de valores donde se muestran los tres registros de los detectores que se situaron en cada uno de los tres lugares del Comedor: Este, Oeste y en el centro del mismo, situados a 30 metros separados uno de otro.

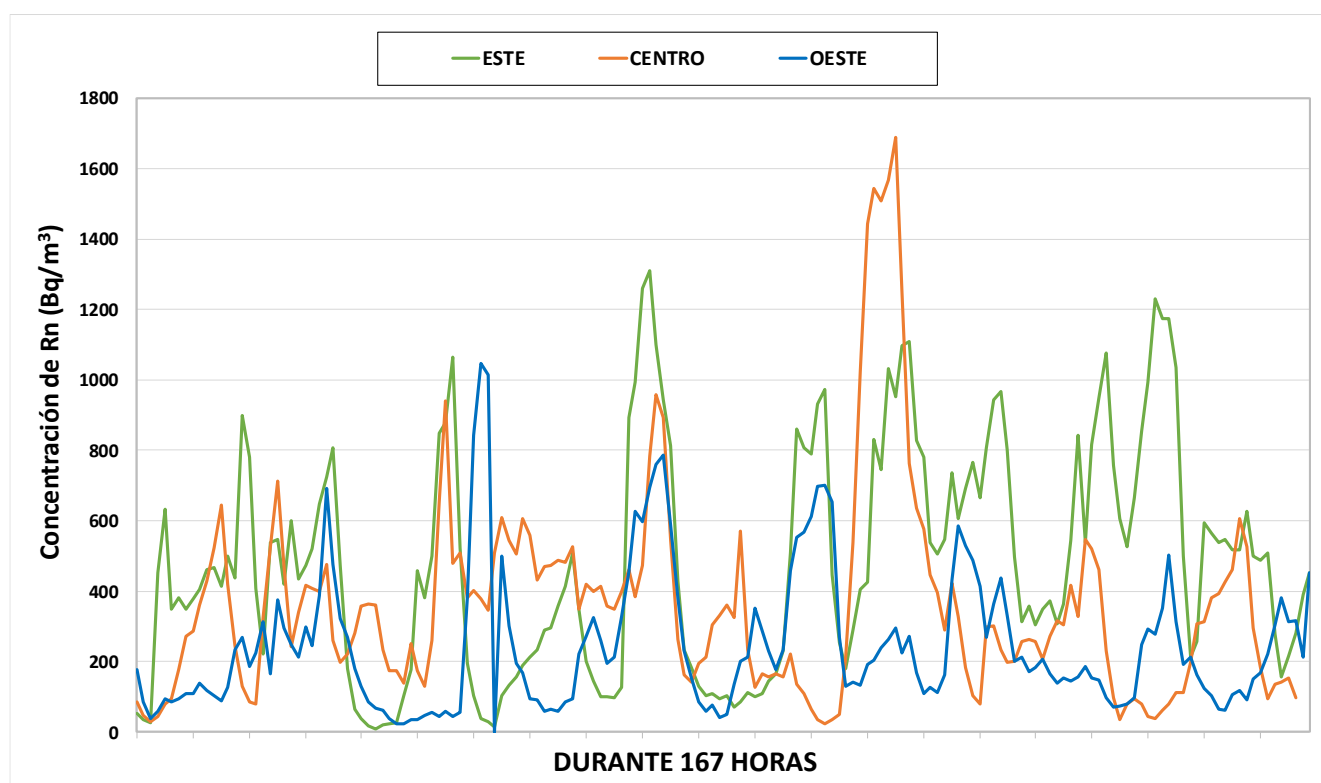


Figura 4-9 Tres detectores en el Comedor de Alumnos - Elaboración propia

El detector que se encuentra en la zona Este del Comedor, está situado en una zona que no posee ninguna puerta en las proximidades, es decir, la ventilación en esta parte es prácticamente inexistente, y la concentración media registrada es de 481 Bq/m³.

Por otro lado, el detector que se halla en el centro, se ve influenciado por la puerta principal del Comedor, en concreto a 25 metros de ella, que está abierta en numerosas ocasiones por las mañanas y por las tardes debido a la entrada y salida de alumnos para las comidas, del personal de limpieza, etc. Se encuentra en una zona bajo los efectos de la ventilación de forma frecuente, lo que supone que su

concentración se vea disminuida si se compara con el detector 1 que no recibe apenas influencia de la ventilación. Este dispositivo registra un valor 1,4 veces menor.

Por último, el detector 3, situado en el Oeste del Comedor de forma simétrica al detector 1, es decir, a la misma distancia del detector 2 y de la puerta principal, pero en cambio, no registra los mismos resultados. Esto es debido a que el emplazamiento del detector 3 es bastante singular, ya que posee una puerta de acceso a escasos 10 metros, frecuentemente utilizada por las personas que entran al edificio a lo largo de las 24 horas del día, permitiendo que esta parte del Comedor se halle bastante ventilada, sobre todo si se compara con la ubicación del detector 1 que, como se ha explicado antes, apenas posee ventilación.

En conclusión, lo más significativo de esta gráfica es que el hecho de comer en un extremo u otro del Comedor, que ni siquiera está compartimentado, sino que es un espacio grande y amplio, puede suponer que una persona esté expuesta casi al doble de la concentración de radón si esta se sitúa en la parte Este del edificio.

La estimación del promedio de concentración de radón en la planta baja será, por tanto:

Planta	Detector	Promedio por detector (Bq/m ³)	Promedio de concentración de radón en planta (Bq/m ³)
Baja	Comedor E	481	415
	Comedor W	245	
	Comedor centro	360	
	Camareta Zulu	575	

Tabla 4-8 Concentración y promedio de radón en la planta baja - Elaboración propia

Como se observa, el promedio de concentración de radón en la planta baja se encuentra por encima del valor límite de los 300 Bq/m³ que establece el CTE.

Planta primera

En la siguiente gráfica aparecen los cinco puntos más representativos de la primera planta: una camareta en cada extremo de la parte Sur del edificio (Este y Oeste), la camareta del alumno y las dos salas de estar en la parte Norte (Este y Oeste). Es decir, quedan representadas todas las zonas situadas más hacia los extremos y la camareta del alumno situada en la parte central.

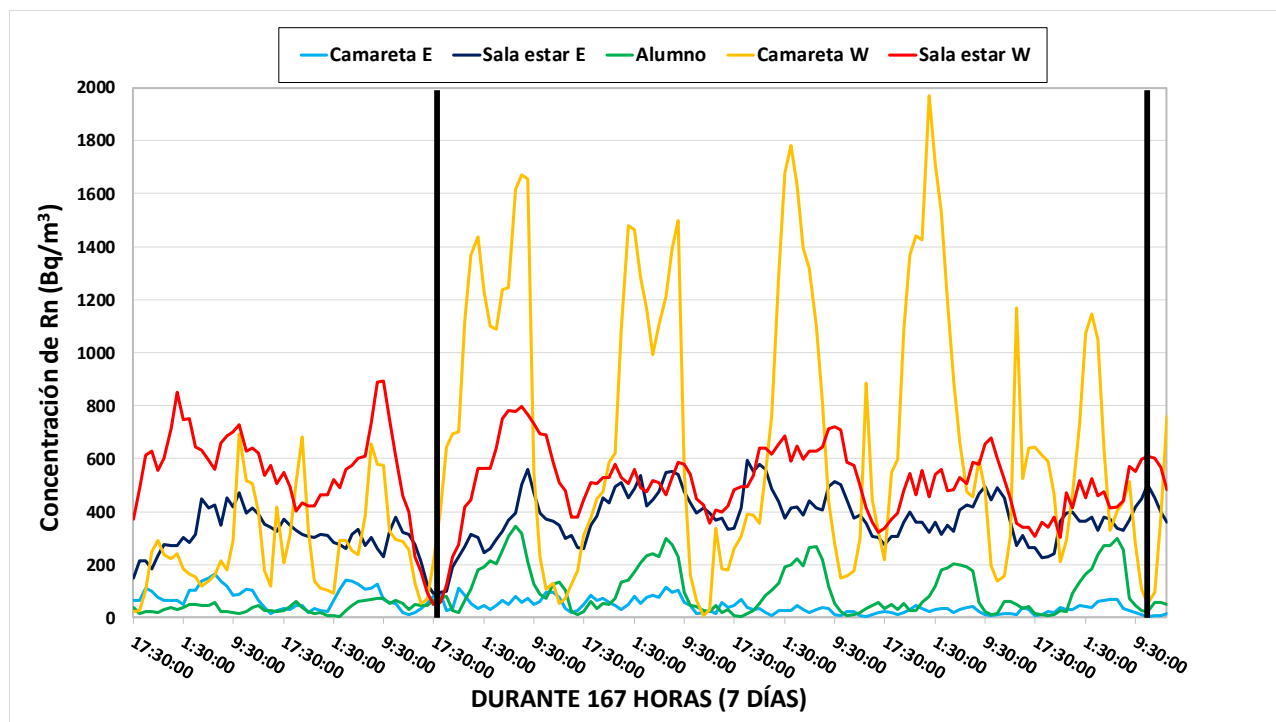


Figura 4-10 Principales cinco puntos de medición de la planta 1 - Elaboración propia

Como puede apreciarse, a pesar de encontrarse en la misma planta, cada zona posee unos registros diferentes, sobre todo dependiendo de los hábitos que haya en cada una. Sin embargo, lo que esta gráfica fundamentalmente remarca es la tendencia que tienen las curvas especialmente los días laborales, representados entre las dos barras negras, donde hay un patrón diario en el comportamiento de la concentración de radón. Mientras que, por otro lado, el fin de semana no tiene una tendencia con forma repetitiva, sino que existe un comportamiento difuso e impredecible.

De nuevo, es significativo que las zonas Oeste por lo general poseen mayor concentración de radón que las Este. La estimación del promedio de concentración de radón en la planta primera será, por tanto:

Planta	Detector	Promedio por detector (Bq/m ³)	Promedio de concentración de radón en planta (Bq/m ³)
Primera	Camareta NW	242	228
	Camareta SW	583	
	Camareta NE	93	
	Camareta SE	50	
	Hall	44	
	Biblioteca	56	
	Camareta del alumno autor del TFG	97	
	Sala de estar E	361	
	Sala de estar W	526	

Tabla 4-9 Concentración y promedio de radón en la planta 1 - Elaboración propia

La planta primera, aunque registre datos significativamente altos en forma de picos a lo largo de la semana, el promedio no supera el límite del CTE. Sin embargo, comparado con otras normativas más estrictas en vigor, como la de Estados Unidos, se supera 1,5 veces más.

Planta segunda

En la siguiente gráfica se interpretan los resultados de las camaretas Este y Oeste de la segunda planta en diferentes semanas, pero en el mismo número de horas de funcionamiento.

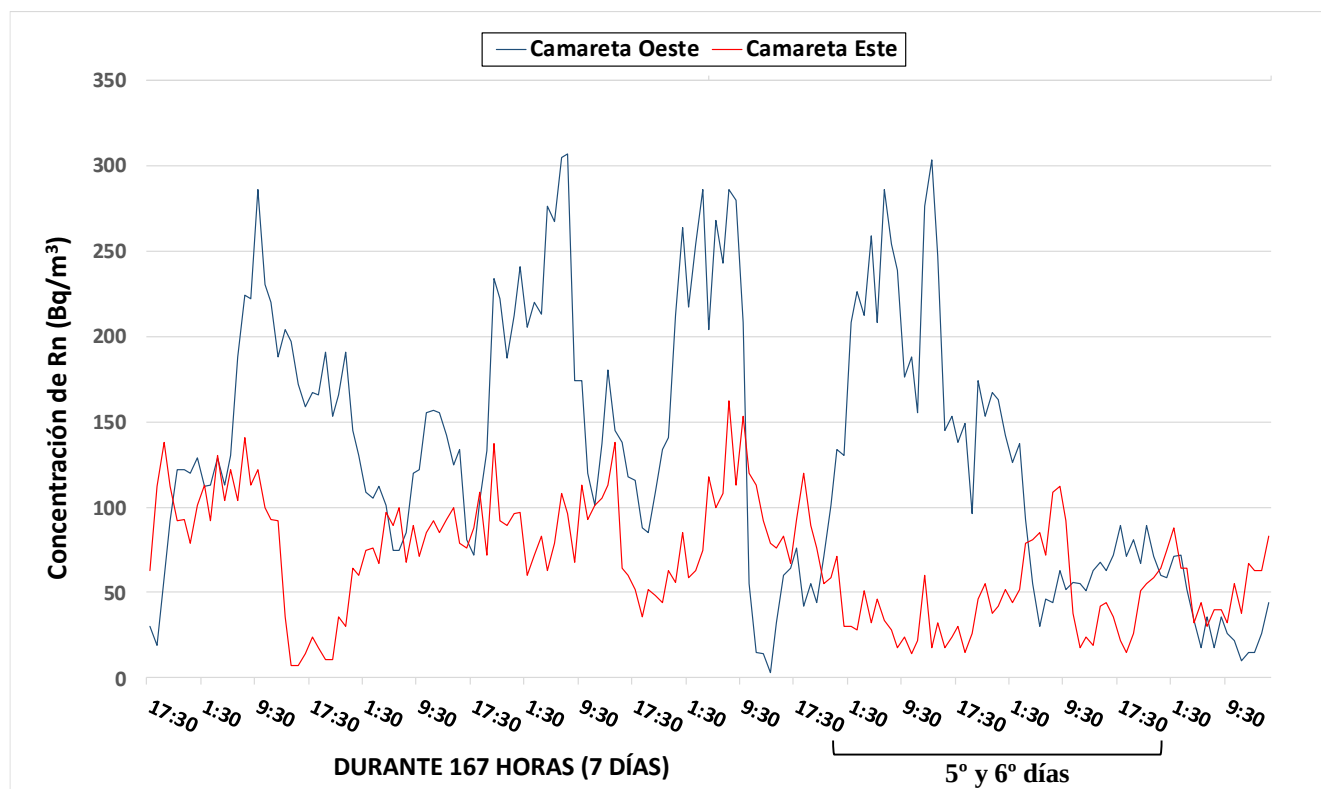


Figura 4-11 Camaretas E y W de la planta 2 - Elaboración propia

Los registros de la parte Oeste son notablemente mayores que las de la Este, llegando incluso a superar los 300 Bq/m³ en dos ocasiones. En cambio, la camareta Este apenas supera los 150 Bq/m³ una única vez. Existe una tendencia similar entre ambas curvas a lo largo de los días, exceptuando el quinto y sexto donde ambas camaretas tienen un comportamiento diferente. La mayoría de los picos aparecen a las 09:30 en ambas curvas, disminuyendo su valor considerablemente tras esa hora.

La estimación del promedio de concentración de radón en la planta segunda será, por tanto:

Planta	Detector	Promedio por detector (Bq/m ³)	Promedio de concentración de radón en planta (Bq/m ³)
Segunda	Camareta SE	71	164
	Camareta SW	134	
	Hall	90	
	Sala de estar E	361	

Tabla 4-10 Concentración y promedio de radón en la planta 2 - Elaboración propia

La planta segunda, aunque supera en numerosas ocasiones el límite en forma de picos, el promedio no excede del valor límite del CTE.

4.1.7 Efectos de las condiciones meteorológicas

Con el objetivo de observar los efectos de las diferentes condiciones meteorológicas, este apartado se dedica a explicar cómo estas pueden afectar a la concentración de radón en el interior de edificios.

Para ello, se realizará el estudio con zonas que se encuentran cerradas sin acceso de personas, (en este caso la Sala de Estar Oeste y Este) con el fin de poder analizar cómo se acumula el radón eliminando factores externos como la actividad humana, aperturas de ventanas y puertas, etc. que puedan afectar al flujo de radón hacia el interior. De esta manera, se consigue que las condiciones meteorológicas sean las principales causas de entrada de radón al interior.

Presión:

A lo largo del capítulo 2 se explicó que la presión atmosférica era el factor que determinaba en mayor medida la concentración de radón. En la siguiente gráfica se analizará como la presión ha afectado al flujo de radón hacia el interior del edificio.

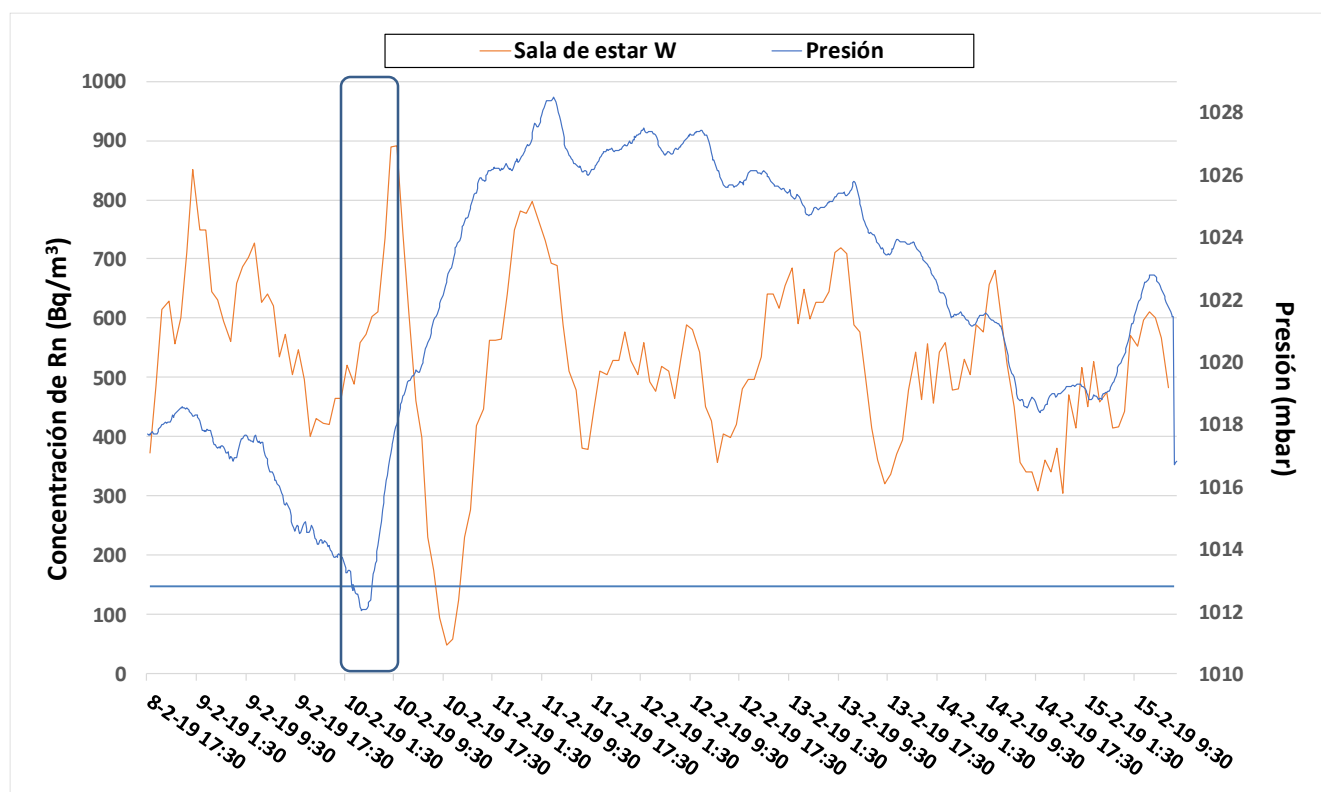


Figura 4-12 Efecto de la presión atmosférica en la concentración de radón - Elaboración propia

Como puede apreciarse, la presión fluctúa a lo largo del tiempo por encima de 1013 mbar excepto durante aproximadamente cinco horas en la madrugada del día 10 de febrero que la presión cae por debajo de este valor.

Por otro lado, la concentración de radón también fluctúa a lo largo de la semana con una tendencia que se repite diariamente, exceptuando el día 10 de febrero donde a las 09:30, como es habitual, se registra el pico diario. Esta vez por encima de cualquier valor de la semana llegando a alcanzar el máximo durante los siete días de medición en 895 Bq/m^3 .

Teniendo en cuenta ambos factores, existe una relación entre ambos, pues tras únicamente ocho horas de que la presión disminuyera de 1013 mbar, durante únicamente cinco horas, la concentración de radón se vio incrementada considerablemente. El resto de días, mientras la presión se mantuvo por encima de la presión normal¹⁴, no se produjo ninguna anomalía, sino que la tendencia de la curva repetía su patrón diariamente.

Viento:

La acción del viento puede tener dos efectos opuestos a la hora de influir sobre la concentración de radón. Por un lado, puede favorecer el flujo de ventilación interior con el exterior, permitiendo así la renovación del aire. Por el contrario, puede suponer un efecto de succión hacia el interior del edificio cuando el viento impacta sobre las fachadas, ya que se genera una depresión en el interior, permitiendo así que el aire (con contenido de radón) acceda al interior. En la siguiente gráfica puede observarse el efecto del viento, probablemente favorable a la acumulación de radón y poco acusado en este caso, durante la semana.

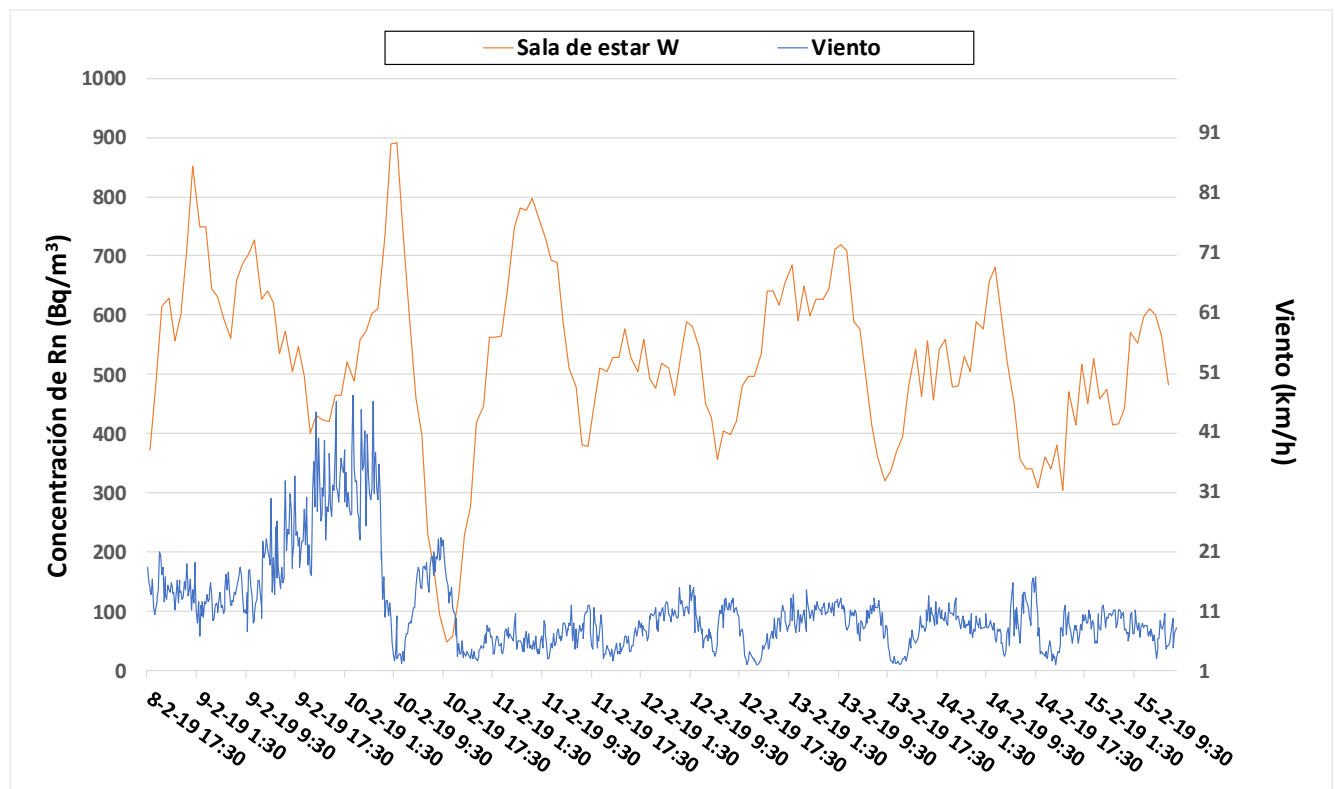


Figura 4-13 Efecto del viento en la concentración de radón - Elaboración propia

Durante el día 9 y 10 tienen lugar rachas de viento por encima del valor habitual registrado durante la semana, llegando a alcanzar los 48 km/h. Estas rachas aparecen horas antes del pico elevado de radón del día 10, lo cual pudo tener un efecto que favoreció al aumento de concentración. Tras el pico, la intensidad del viento decrece y se mantiene en valores que no superan los 18 km/h a lo largo de la semana.

Precipitaciones:

Tienen una influencia que no es despreciable, ya que el agua saturará los poros del terreno produciendo que el radón tenga una difícil salida al exterior y por tanto encuentre mayor facilidad de escape a través de la base seca donde están asentados los edificios.

¹⁴ Presión normal = 1 atm = 1013 mbar

En la siguiente gráfica se han introducido los datos de los valores de precipitaciones durante la semana.

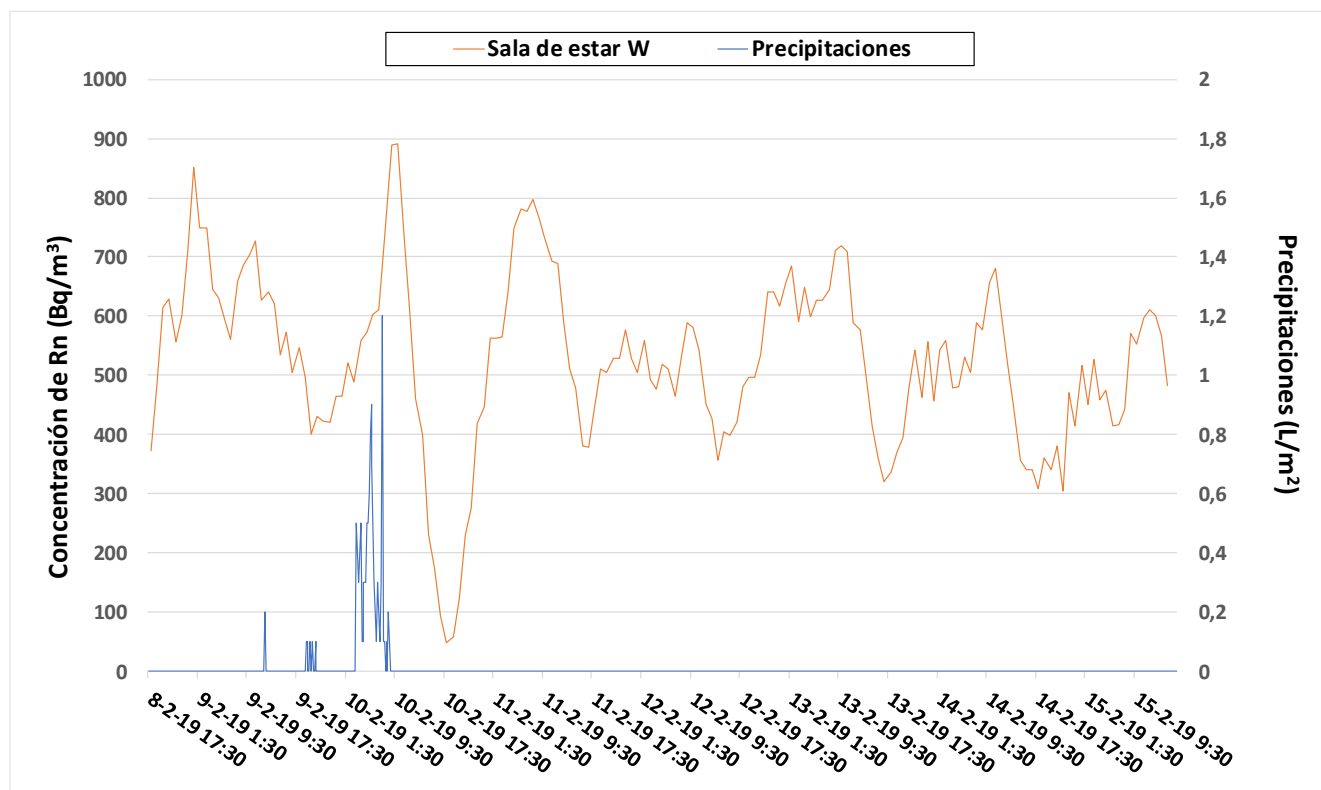


Figura 4-14 Efecto de las precipitaciones en la concentración de radón - Elaboración propia

Las precipitaciones durante esta semana son escasas, tratándose de una semana muy seca. Las únicas registradas son durante el día 9 y 10, siendo mínimas durante el 9 y en mayor medida el día 10. Los mayores registros de precipitaciones se producen escasas horas antes del pico de radón durante el día 10, por lo que se aprecia una relación entre ambas curvas, favoreciendo que el flujo de radón entre con mayor facilidad.

Temperatura:

No tiene una relación significativa con respecto al flujo de radón hacia el interior, aunque sí que favorece en muy pequeña proporción. En la Figura 4-15 se muestra la concentración de radón junto con la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la Sala de estar Este. Se dispone de datos de temperatura solo durante los días 12, 13, 14 y 15 donde se aprecia la correlación de los picos de radón cuando la diferencia de temperatura es mayor.

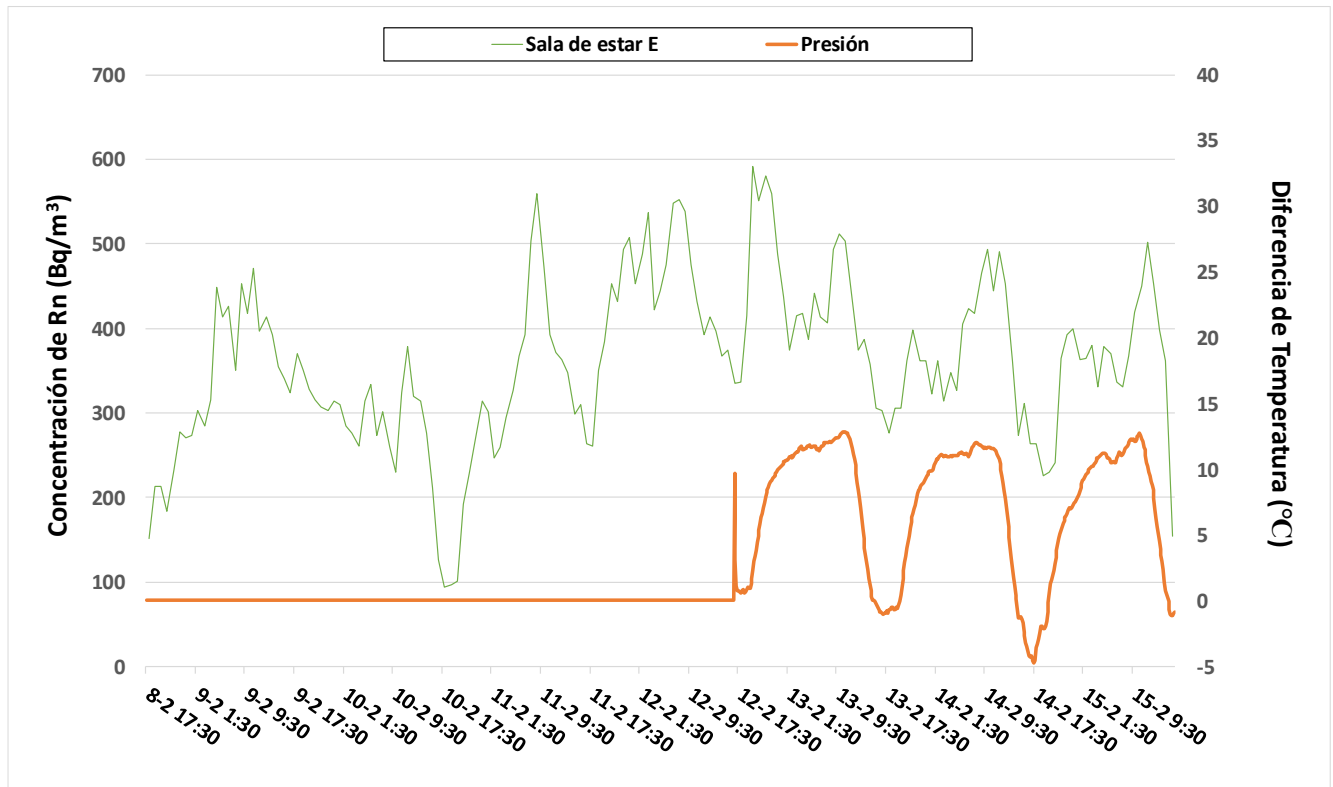


Figura 4-15 Influencia de la temperatura en la concentración de radón - Elaboración propia

Para complementar lo anterior, ya que las temperaturas fueron similares durante esos días, en la Figura 4-16 se representa la concentración de radón de la camareta del alumno, donde hay mayor diferencia de temperaturas a lo largo de los 28 días de medición.

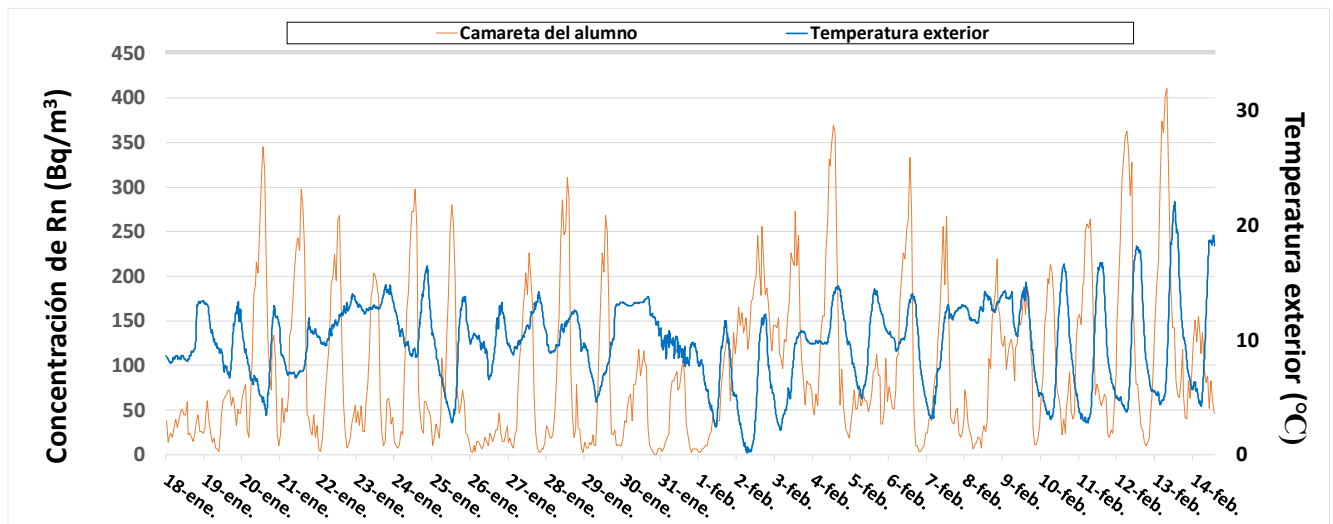


Figura 4-16 Efecto de la temperatura en la concentración de radón - Elaboración propia

Para estudiar este caso se escogió la hora donde se producen los picos diarios, es decir, 09:30. Se tomaron los datos de concentración y de temperaturas interior y exterior para los dos días más significativos, como son el 5 de febrero (pico bajo) y 13 de febrero (pico alto) donde se observó lo siguiente:

Como puede apreciarse, el 5 de febrero tuvo lugar uno de los picos diarios más bajos de todo el mes, y en ese momento se obtuvieron los siguientes datos:

- Temperatura exterior: 10,8 °C
- Temperatura interior: 23,8 °C
- Diferencia de temperatura: 10 °C

Por otro lado, el día 13 de febrero tuvo lugar el pico más alto de todo el mes donde a dicha hora se registró:

- Temperatura exterior: 6,1 °C
- Temperatura interior: 24,3 °C
- Diferencia de temperatura: 18,2 °C

Con estos dos casos se puede observar la posible correlación que existe entre la diferencia de temperatura y el flujo de radón hacia el interior. Por lo que puede confirmarse que cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será el flujo de radón hacia el interior.

No obstante, a pesar de que este hecho favorezca la entrada de radón, comparado con el efecto de la presión atmosférica puede llegar a ser casi insignificante. Además, aunque se pueda encontrar cierta correlación diaria, es importante tener presente que las temperaturas vienen asociadas a cambios de presión atmosférica, siendo este último el factor más determinante [6]. Es importante recalcar que la presión posee un orden de magnitud 10^3 mayor que el que ofrece la temperatura y 10^2 mayor que el viento [6].

4.2 Resultados de las mediciones de otros edificios de la ENM

En la Tabla 4-11 se muestra la concentración media durante los siete días que los detectores estuvieron en funcionamiento:

Dispositivo	Concentración de radón media (Bq/m ³)
1 – Aula 40 (Isaac Peral)	251
2 – Edificio de Investigación	620
3 – Biblioteca (Almirante Francisco Moreno)	149
4 – Aula 16 (Patio de Aulas)	342
5 – Sala de Grados en planta baja del CUD	581

Tabla 4-11 Concentraciones de radón medias en otros edificios - Elaboración propia

(Véase Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10)

Como se puede apreciar, las zonas más afectadas son la Sala de Grados y el Edificio de Investigación, y la que menos, la Biblioteca del cuartel Almirante Francisco Moreno. Además, la mayoría de edificios se encuentran por encima del límite de 300 Bq/m³. Sin embargo, comparándolos con la normativa de Estados Unidos, todos ellos se encuentran significativamente por encima de su valor límite.

A continuación, se representan las medidas de los cinco edificios en conjunto para poder tener una idea general de la evolución de los datos a lo largo de los 10 días de medición. En este caso ya no se utiliza el código de colores anterior en función de la planta en la que se encuentre el detector, ya que todos ellos se encuentran en la planta baja de cada edificio respectivamente.

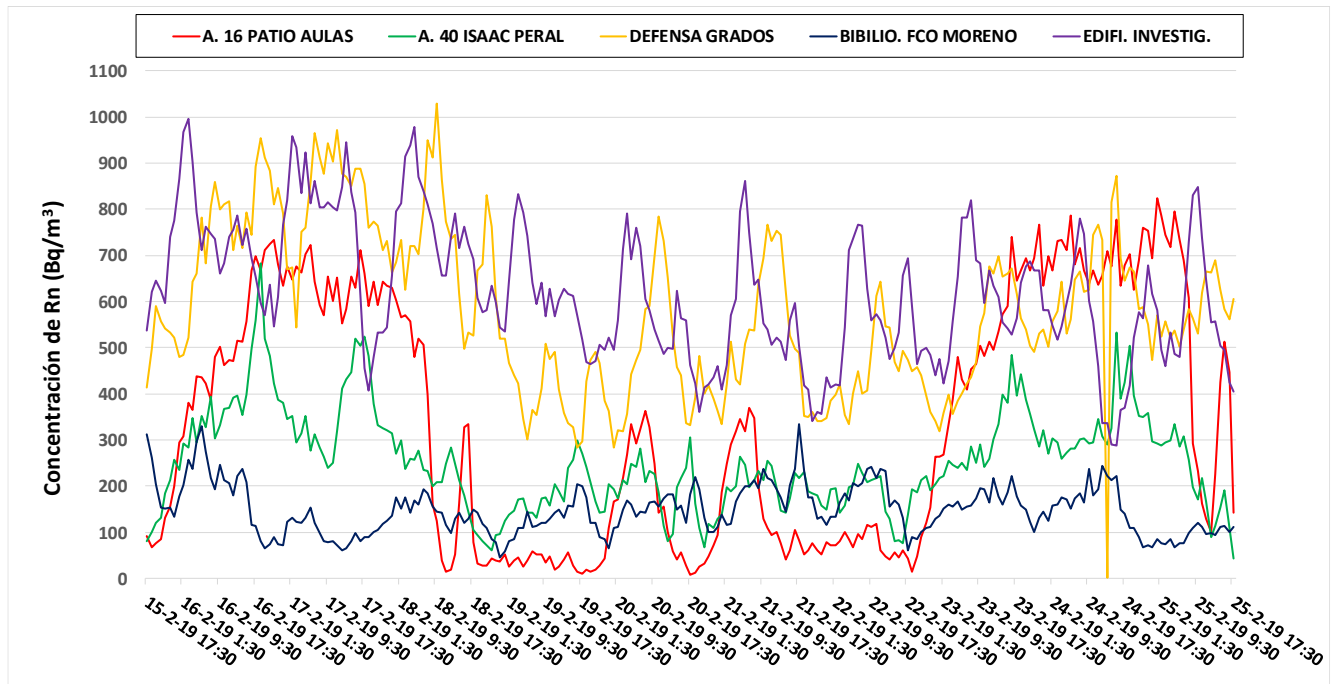


Figura 4-17 Concentración de radón en diferentes edificios - Elaboración propia

De forma general se observa que la concentración de radón disminuye entre los días 18 y 24, es decir, durante los días laborables cuando las zonas tienen actividad humana, como es el acceso y salida de las zonas y aperturas de las puertas. Sin embargo, durante los fines de semana los niveles de radón son sensiblemente superiores.

Por otro lado, en la Figura 4-18 se separan las curvas de los edificios que se encuentran en el muelle de la dársena (Isaac Peral y Edificio de Investigación) y en el muelle de Cruceros (Almirante Francisco Moreno), ya que son zonas asentadas en terreno ganado al mar y por ello se estima que puedan tener un comportamiento diferente. Aunque no existan estudios sobre este tema, ni demostraciones de ello, durante las mediciones se ha detectado que los edificios asentados en terreno ganado al mar tienen menor concentración de radón, exceptuando el caso del Edificio de Investigación que es el que mayores registros posee. Se desconocen las causas de ello, por lo que sería necesario un estudio más en profundidad sobre las variables que pueden afectar, como la composición geológica (que no se dispone), así como de los materiales de construcción que se han utilizado en los edificios.

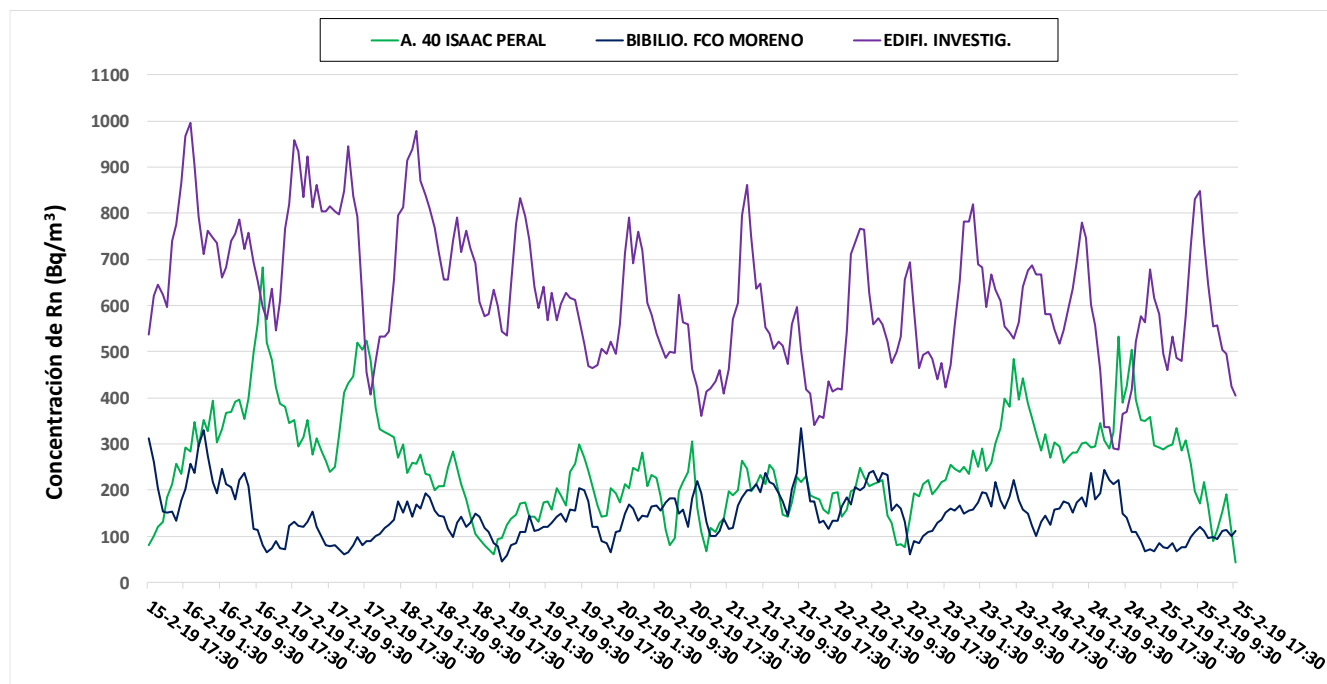


Figura 4-18 Concentración de radón en edificios situados en terreno ganado al mar - Elaboración propia

Por otro lado, se encuentra la curva del Edificio de Investigación que registra valores notablemente mayores que las otras dos curvas, a pesar de reciente construcción y no haberse incluido medidas de protección de radón. Esta sufre una fluctuación diaria, con una tendencia similar los siete días de la semana, apreciándose unos mayores registros el fin de semana. Sin embargo, la diferencia entre el fin de semana y los días laborables no es tan notable como ocurre con los edificios Isaac Peral y Almirante Francisco Moreno. Este hecho puede estar ligado a que, a diferencia de estos dos últimos, el Edificio de Investigación tuvo actividad humana durante el fin de semana, haciendo que las fluctuaciones sean similares a las de los días laborales.

Además, siguiendo la dinámica de antes, es decir, separando edificios por características que tienen en común, es de interés analizar las curvas de concentración de radón del aula 16 y de la Sala de Grados, ya que ambas se encuentran en la planta baja del Patio de Aulas y son edificios de construcción similar.

Tal y como se puede observar en la Figura 4-19, la tendencia de ambas curvas es muy similar entre sí. El aula 16 tiene valores menores que la Sala de Grados, que puede estar asociado a que esta última no tiene apenas actividad si se compara con el aula 16 donde todos los días los alumnos acuden a ella para ir clase.

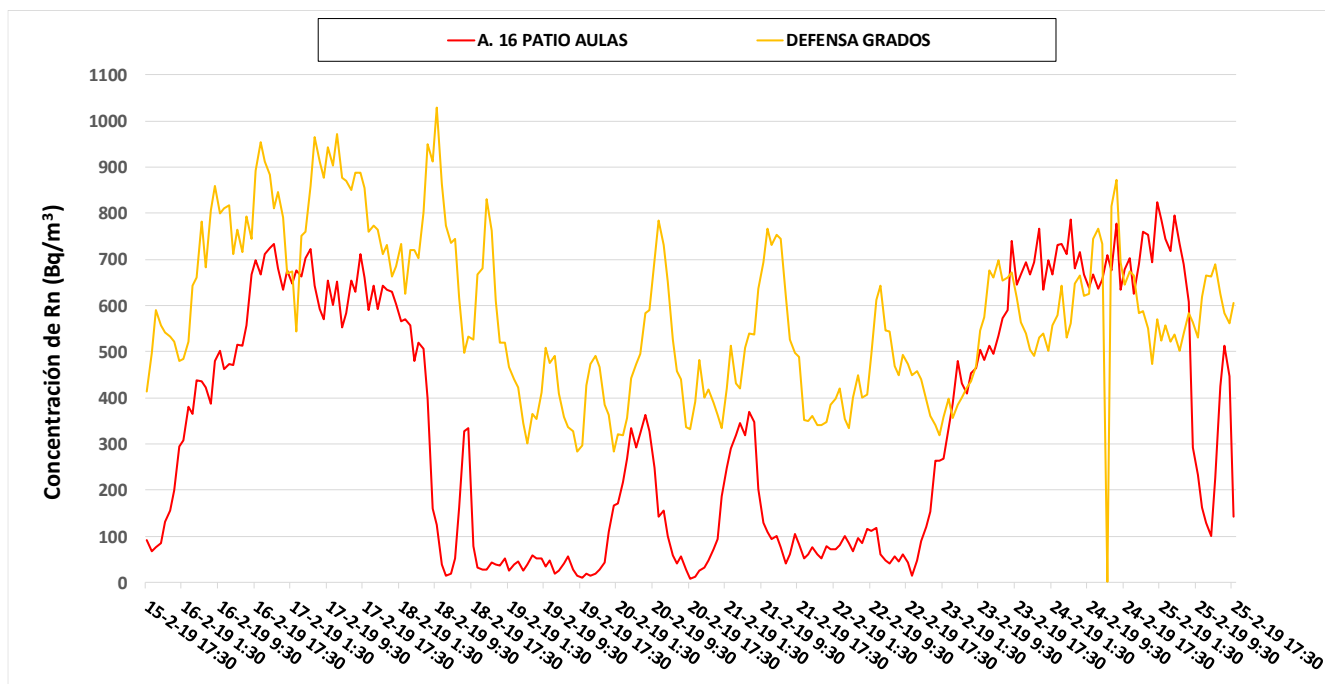


Figura 4-19 Concentración de radón en edificios en el Patio de Aulas - Elaboración propia

De nuevo, los días laborables tienen un comportamiento diferente en comparación con los fines de semana, registrándose mayores niveles de radón de viernes 15 a domingo 17. Además, tienen lugar dos picos durante los días 20 y 21 los cuales se desconocen sus causas, ya que ningún agente meteorológico de relevancia tuvo lugar esos días.

5 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

Tras el estudio y análisis de datos de las mediciones que tuvieron lugar en la Escuela Naval Militar, y en mayor detalle, en el cuartel Marqués de la Victoria a lo largo de 28 días en sus diferentes plantas y en puntos de interés, se considera que el edificio se encuentra afectado por la presencia de gas radón, especialmente la planta baja, donde la estimación del promedio de concentración de radón supera los límites que establece la normativa española.

Por otro lado, las plantas primera y segunda, también se encuentran bajo la influencia de este gas superando en numerosas ocasiones el límite establecido. Sin embargo, la estimación del promedio de concentración de radón no supera dicho límite en ninguna de estas plantas.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, junto con el hecho de que este edificio sirve de residencia para más de 150 personas a diario durante 10 meses al año, y en vista a las futuras obras pendientes de “REMODELACIÓN INTERIOR DEL CUARTEL DE ALUMNOS MARQUÉS DE LA VICTORIA” en las plantas primera y segunda [31], es de gran interés la instalación de medidas de protección de radón. En esta reforma está planeado remodelar significativamente las plantas con el fin de aumentar la capacidad.

Es importante remarcar que la principal aplicación de barreras de protección de radón para obtener su máximo rendimiento se lleva a cabo en las plantas bajas de los edificios con el fin de mitigar lo máximo posible el radón. Sin embargo, esta propuesta se plantea en la planta primera puesto que los alumnos pasan un gran número de horas del día en ella y que considera que es una óptima oportunidad para implementar dichas medidas, puesto que la planta baja no tiene obras programadas.

Además, tras la aprobación de la reciente ley que regula los límites de presencia de radón, sería necesaria su instalación debido a que se trata de una intervención en un edificio existente en el que tendrá lugar una reforma donde se realizan modificaciones considerables que permiten aumentar la protección frente al radón con respecto a la anterior existente.

Por todo ello, se considera que es una ocasión idónea para la instalación de dichas medidas. En este caso, entre las medidas expuestas en el Estado del arte, la mejor opción es la barrera de protección debido a su sencillez de instalación y la mínima intervención tanto física como temporal que necesita. Además, se estima que pueda llegar a reducir hasta el 93% de la concentración actual que posee el edificio [28], llegando a conseguir una atmósfera prácticamente libre de radón en los locales habitables de las plantas primera y segunda.

El área a cubrir es de 1653 m² en la primera planta, con la siguiente forma y distribución:

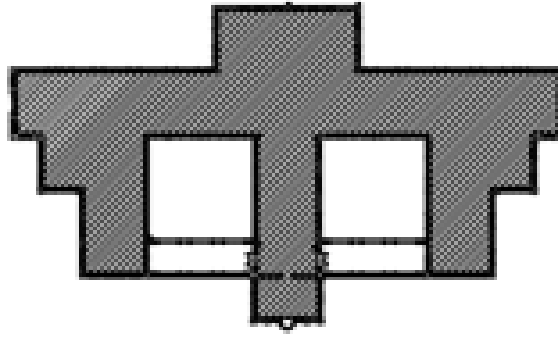


Figura 5-1 Superficie de las plantas a remodelar - ENM

Por lo tanto, considerando la superficie de la planta primera, y que el material que se recomienda emplear es el “*TEXSELF GS 1,5*” en base a sus idóneas características de aislamiento, con un precio de 8,87 euros por metro cuadrado, el presupuesto estimado es de 14.662,11 euros.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Tras este trabajo de investigación, que incluye la toma y análisis de datos de concentración de radón en la Escuela Naval Militar, se han obtenido numerosas conclusiones que son de interés sintetizar en este capítulo por separado. Las principales son las siguientes:

1. La concentración de radón está limitada en España en 300 Bq/m^3 en base a la normativa europea con el fin de disminuir el riesgo para la salud humana. No obstante, el límite es considerablemente superior si se compara con el de otros países miembros de la Unión Europea. Además, países avanzados en este campo como Estados Unidos establecen su límite en tan solo 148 Bq/m^3 .
2. La concentración de radón está influenciada principalmente por los siguientes factores:
 - Características y composición del terreno, que afectará tanto a la emanación de radón como a su salida al exterior.
 - Factores constructivos: generalmente, la concentración de radón disminuirá en las plantas más alejadas del suelo. Además, los materiales de construcción, por los componentes que poseen pueden suponer un incremento de la concentración en el interior del edificio. Por otro lado, sus capacidades de aislamiento son relevantes, puesto que el radón se introduce principalmente a través de grietas, fisuras y juntas que presenten los materiales de construcción.
 - Factores meteorológicos: la concentración de radón aumenta con bajas presiones atmosféricas, presencia de lluvias, viento y diferencia de temperatura entre el interior y exterior de los edificios, siendo la presión la más determinante.
 - Factores humanos: los comportamientos y hábitos de las personas serán factores que influirán en gran medida, puesto que, dependiendo de ellos, los edificios estarán más ventilados. Esto supone que el aire interior esté más renovado y por tanto presente menor concentración de radón.

3. Existen numerosas técnicas para mitigar y contrarrestar la entrada de este gas hacia el interior del edificio. Dichas técnicas se aplican en función de si el edificio es de nueva construcción o ya existente, siendo de mayor sencillez de instalación y efectividad aquellas en las que el edificio sea de nueva construcción.
4. En el periodo de tiempo estudiado, el cuartel Marqués de la Victoria registra una concentración media de radón de 415 Bq/m^3 en su planta baja, superando el límite de la normativa, mientras que las plantas primera y segunda registran 228 Bq/m^3 y 164 Bq/m^3 respectivamente.
5. Existen diferencias acusadas de concentración de radón en función de la orientación del edificio, siendo la parte Oeste del Marqués de la Victoria la más afectada. Además, se corrobora que la ventilación es fundamental para mantener una concentración por debajo del límite establecido, teniendo en cuenta que esto puede llegar a suponer un gasto energético excesivo en términos de climatización.
6. En vista a las futuras obras del Marqués de la Victoria en la planta primera, se recomienda la instalación de barreras de protección como método de mitigación de radón a lo largo de toda la planta.
7. Respecto al resto de edificios, se constata que aquellos situados en el Patio de Aulas, junto con el nuevo Edificio de Investigación, poseen una concentración de radón superior al límite. No todos ellos exceden la normativa española, no obstante, todos superan la normativa norteamericana, siendo esta la más exigente.

Las conclusiones expuestas se ven limitadas por el tiempo de medidas, así como por el tipo de equipo empleado. Para confirmar estos resultados, son necesarios periodos de medidas más largos y el uso de equipos y personal certificados según la normativa vigente.

Por lo tanto, este Trabajo de Fin de Grado sirve para introducir la problemática del gas radón en edificios, con el objetivo de generar conciencia y estimular su conocimiento en la sociedad. Asimismo, sirve para tener una estimación aproximada de la concentración de radón en edificios de la Escuela Naval Militar, y más detalladamente en el cuartel de alumnos Marqués de la Victoria.

6.2 Líneas futuras

Este Trabajo de Fin de Grado da pie y sirve de motivación para las siguientes líneas de futuro:

1. Toma de medidas durante periodo de tiempo más extensos.
2. Contribuir a la toma de medidas en otros edificios de la Escuela Naval Militar, especialmente en edificios que sirven de residencia como el cuartel de Alumnos Almirante Francisco Moreno.
3. Propuesta de instalación de medidas de protección contra radón en casos necesarios.
4. Contribuir a una difusión de información sobre el radón a modo de concienciación social.
5. Incorporación de conocimientos básicos en asignaturas del Grado, como por ejemplo en “Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales”.

6. Construcción de un módulo experimental para el estudio de la concentración de radón en terreno ganado al mar.
7. Estudio sobre la concentración de radón a bordo de buques, especialmente cuando se encuentran atracados.

7 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figurarán todas las referencias que se han empleado como documentación de apoyo para el TFG:

- [1] Organización Mundial de la Salud, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [2] «Environmental Protection Agency,» 2017. [En línea]. Disponible: <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-del-radon>.
- [3] NoticiasCuatro, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.cuatro.com/noticias/sociedad/exposiciones-provocan-muertes-Espana-afectado_0_2508450742.html.
- [4] «<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/357-proyecto-modificacion-cte-julio-2018.html>,» Ministerio de Fomento, 2018. [En línea].
- [5] Universidad de Salamanca, [En línea]. Disponible: <https://diarium.usal.es/jcv/2018/11/28/tabla-periodica/>.
- [6] B. F. Vázquez, Tesis doctoral. Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones., Madrid: UPM, 2009.
- [7] CSN, Dosis de Radiación, Madrid, 1992.
- [8] «NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud,» Ministerio de Trabajo, 1999. [En línea]. Disponible: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_533.pdf.
- [9] CSN, Radón. Justificación de su interés hoy., Madrid: https://www.csn.es/centro-de-documentacion?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview&_20_folderId=1007905, 1997.
- [10] L. Q. Poncela, Ponencia: El Radón en puestos de trabajo, Universidad de Cantabria.
- [11] B. Robles, Ponencia: Fuentes de radón en el medio ambiente, Madrid.

- [12] «El Faro del Guadarrama,» 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.elfarodelguadarrama.com/noticia/51011/moralzarzal/moralzarzal-medira-el-gas-radon-en-viviendas-del-municipio-a-traves-de-una-campana-gratuita.html%C3%A7>.
- [13] CSN, Protección frente a la inmisión de gas radón en los edificios, Madrid: https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/informes_tecnicos/inmisinradnok.pdf, 2010.
- [14] CSN, «<https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>,» CSN, 2017. [En línea].
- [15] A. Ruano-Ravina, Radón y cáncer de pulmón, Santiago de Compostela, 2007.
- [16] B. IV, Health Effects of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters, 1988.
- [17] U. Europea, DIRECTIVA 90/641/Euratom, 1990.
- [18] «The Health Effects of Exposure to Indoor Radon,» European Nuclear Society, 1999. [En línea].
- [19] OMS, Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública., Ginebra: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf?sequence=1, 2015.
- [20] U. Europea, DIRECTIVA 2013/59/EURATOM, Bruselas: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:013:FULL&from=EN>, 2013.
- [21] M. S. Domínguez, TFM Mapa del riesgo de la exposición al gas radón en las viviendas de la Comunidad de Madrid, Madrid: UCM, 2016.
- [22] M. d. Fomento, «www.codigotecnico.org,» 17 Marzo 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/357-proyecto-modificacion-cte-julio-2018.html>.
- [23] «Código Técnico de Edificación (CTE),» Ministerio de Fomento, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/Proyecto_RD_ANEJO_II-DB_HS_6.pdf.
- [24] A. R. Raviña, Políticas de prevención y reducción de radón, Santiago de Compostela: <http://www.usc.es/radongal/wp-content/uploads/2017/03/ARuano.pdf>, 2010.
- [25] G. G. Bermúdez, El radón y la industria, Torrelodones: <http://www.elradon.com/web/wp-content/uploads/2014/05/El-radon-y-la-industria1.pdf>, Día del radón, 2014.
- [26] J. A. C. Carrasco, El gas radón, un silencioso y peligroso invitado en los hogares, Universidad Politécnica de Valencia: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/32/33/a33.pdf>, 2007.
- [27] «NTP 440: radón en ambientes interiores,» Ministerio de Trabajo, [En línea]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf.
- [28] B. F. Vázquez, Medidas constructivas reductivas de radón, USC, 2010.
- [29] Soprema. [En línea]. Disponible: <https://www.soprema.es/es/product/impermeabilizacion/impermeabilizacion-bituminosa/sbs/laminas-de-betun-modificado-autoadhesivo-no-protégidas/texself-gs-1-5>.

- [30] «Ficha técnica y Manual de usuario,» RadonEye, [En línea]. Disponible:
[http://radonftlab.com/wp-content/uploads/2015/data_sheet/RadonEye_Quickguide_\(web\).pdf](http://radonftlab.com/wp-content/uploads/2015/data_sheet/RadonEye_Quickguide_(web).pdf).
- [31] ENM, Remodelación interior del Cuartel de ALumnos Marqués de la Victoria.
- [32] F. Musaat, Documentos de orientación técnica en edificación.
- [33] CUN, Clínica Universidad de Navarra, [En línea]. Disponible:
<https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/becquerelio>.

ANEXO I: CONCENTRACIÓN DE URANIO EN LAS ROCAS MÁS HABITUALES

ROCA	CONCENTRACIÓN DE URANIO (ppm)
ROCAS ÍGNEAS	
Intrusitas efusivas ácidas	4,5
Intrusitas efusivas intermedias	2
Intrusitas efusivas básicas	0,6
Ultrabásicas	0,02
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Lutitas (Arcillas y Pizarras)	3,5
Calizas, Dolomías, Sideritas	1,5
Arenias y raditas	1,5
Evaporizas (Yesos y Anhidritas)	0,1
Evaporizas (Halita y Silvina)	0,1
ROCAS METAMÓRFICAS	
Neises	3
Filitas y Pizarras	2,5
Esquistos de rocas ígneas	2
Esquistos sedimentarios	2
Mármoles y dolomitas	0,5
Sepentinitas	0,02

Tabla Anexo I - 1 Concentración de uranio en rocas [6]

ANEXO II: REFERENCIA CATASTRAL

Se adjunta a continuación el archivo de la referencia catastral del Edificio Marqués de la Victoria.

**CONSULTA DESCRIPTIVA Y GRÁFICA
DE DATOS CATASTRALES DE BIEN INMUEBLE**

REFERENCIA CATASTRAL DEL INMUEBLE
4239030NG2943N0001IZ

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

LOCALIZACIÓN
TR ESCUELA NAVAL 9999
36900 MARIN [PONTEVEDRA]

USO PRINCIPAL
Edif. Singular

COEFICIENTE DE PARTICIPACIÓN
100,000000

AÑO CONSTRUCCIÓN
1946

SUPERFICIE CONSTRUIDA [m²]
6.982

PARCELA CATASTRAL

SITUACIÓN
TR ESCUELA NAVAL 9999
MARIN [PONTEVEDRA]

SUPERFICIE CONSTRUIDA [m²]
6.982

SUPERFICIE GRÁFICA PARCELA [m²] TIPO DE FINCA
2.628 Parcela construida sin división horizontal

CONSTRUCCIÓN

Destino	Escala	Planta	Puerta	Superficie m²
PUBLICO	E	00	01	2.084
PUBLICO	E	01	01	2.084
PUBLICO	E	02	01	2.084
PUBLICO	E	+1	01	730

INFORMACIÓN GRÁFICA

E: 1/1000

Este documento no es una certificación catastral, pero sus datos pueden ser verificados a través del 'Acceso a datos catastrales no protegidos' de la SEC.

Miércoles, 16 de Enero de 2019

Coordenadas U.T.M. Huso 29 ETRS89

Límite de Manzana
 Límite de Parcela
 Límite de Construcciones
 Mobiliario y aceras
 Límite zona verde
 Hidrografía

Figura 0-2 Referencia catastral del Marqués de la Victoria – Ministerio de Hacienda

ANEXO III: CLASIFICACIÓN DE MUNICIPIOS

Provincia	Zona I	Zona II
Pontevedra	O Rosal	A Guarda
	Salvaterra de Miño	A Illa de Arousa
		Agolada
		Arbo
		As Neves
		Baiona
		Barro
		Bueu
		Caldas de Reis
		Cambados
		Campo Lameiro
		Cangas
		Catoira
		Cerdedo
		Cotobade
		Covelo
		Crecente
		Cuntis
		Dozón
		Forcarei
		Fornelos de Montes
		Gondomar
		Lalín
		Marín
		Meaño
		Meis
		Moaña
		Mondariz
		Mondariz-Balneario
		Moraña
		Mos
		Nigrán

O Grove
O Porriño
Oia
Pazos de Borbén
Poio
Ponte Caldelas
Ponteareas
Pontecesures
Pontevedra
Portas
Redondela
Ribadumia
Rodeiro
Salceda de Caselas
Sanxenxo
Silleda
Soutomaior
Tomiño
Tui
Valga
Vigo
Vila de Cruces
Vilaboa
Vilagarcía de
Arousa
Vilanova de Arousa

Tabla Anexo III - 1 Clasificación de municipios en función del potencial de radón [23]