



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*Medición de la concentración de radón en  
el Centro Universitario de la Defensa y  
propuesta de medidas de mitigación*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Álvaro García Denia

**DIRECTORES:** Lara Febrero Garrido  
Lorena González Gil

**CURSO ACADÉMICO:** 2019-2020

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Medición de la concentración de radón en  
el Centro Universitario de la Defensa y  
propuesta de medidas de mitigación*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

La repercusión social y científica que está provocando el gas noble radón crece de manera exponencial debido a su toxicidad y su confirmada relación con cánceres como el de pulmón, siendo la primera causa en personas no fumadoras y la segunda causa en sí fumadoras.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se estudian los niveles de concentración de radón en el edificio del Centro Universitario de la Defensa, en la Escuela Naval Militar de Marín. Con estas mediciones, divididas en varias fases, se ha determinado que las concentraciones de radón a las que está expuesto el personal docente en su interior son, en algunos casos, superiores a las estipuladas en la normativa europea ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ). Además, se ha investigado la relación de las concentraciones de radón con diferentes parámetros influyentes, como los meteorológicos, siendo el más determinante el viento y su intensidad.

Para finalizar, se concluye con la obvia necesidad de llevar a cabo acciones correctoras para disminuir la concentración de radón en el interior del edificio, por lo que se realiza una propuesta de medidas de mitigación de acuerdo con los resultados obtenidos durante el proyecto. Concretamente, se ha realizado un protocolo de ventilación en varios despachos para determinar los tiempos de apertura de ventanas necesarios para reducir la concentración de radón hasta niveles aceptados por dicha normativa.

## **PALABRAS CLAVE**

Concentración de radón, estudios científicos, medida de mitigación, parámetros meteorológicos, ventilación



# AGRADECIMIENTOS

Durante estos cinco años de formación en la Escuela Naval Militar, son muchos los que me han apoyado, y por ello me gustaría dedicarles una breve mención en este particular apartado.

A mis padres, por servirme de ejemplo en la constancia y humildad de cada momento de mi vida, y por su apoyo y confianza inquebrantables en mí desde el momento que decidí dedicarme a servir a España.

A mi hermano, Roberto, por ser un pilar fundamental y estar siempre a mi lado, mostrando la confianza y orgullo necesarios para un hermano mayor.

Al resto de mi familia, por su apoyo incondicional para desarrollarme en este diferente estilo de vida.

A mis tutoras de Trabajo de Fin de Grado, Lara y Lorena, por su dedicación e interés mostrados durante estos meses de proyecto, y por la ayuda y el consejo recibidos, imprescindibles para el correcto desarrollo del trabajo.

A mis compañeros y amigos, por la incondicional ayuda y amistad durante estos años en la Escuela Naval Militar.

A la empresa INTERA, más particularmente a Elena González, por su colaboración e interés en este proyecto.

*“Si quieres ir rápido, ve solo. Si quieres ir lejos, ve acompañado”.*



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Justificación.....	7
1.1.1 El radón, tan imperceptible como dañino .....	7
1.1.2 Análisis previo y referencias.....	8
1.1.3 Preocupación social en los medios .....	9
1.2 Objetivos .....	10
1.3 Estructura de la memoria .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Normativa del radón .....	11
2.1.1 Antecedentes .....	11
2.1.2 Normativa vigente (y actual).....	12
2.1.3 Modificación al CTE: Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón.....	13
2.2 Estudios científicos.....	14
2.2.1 Influencia de parámetros meteorológicos .....	16
2.2.2 Otros parámetros determinantes.....	19
2.2.3 Vínculo con enfermedades.....	19
2.2.4 Radón en el agua .....	22
2.2.5 Predicción de terremotos mediante concentración de radón.....	25
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Descripción del edificio del Centro Universitario de la Defensa.....	29
3.2 Equipos de medición.....	32
3.2.1 Equipos .....	32
3.2.2 Sensores .....	32
3.3 Descripción de la toma de muestras .....	34
3.3.1 Fase 1 (05 de diciembre hasta 17 de diciembre) .....	35
3.3.2 Fase 2 (18 de diciembre hasta 09 de enero) .....	36
3.3.3 Fase 3 (10 de enero hasta 21 de enero).....	37
4 Resultados .....	39
4.1 Resultados del edificio del Centro Universitario de la Defensa.....	39

4.1.1 Fase 1 (05 de diciembre hasta 17 de diciembre) .....	39
4.1.2 Fase 2 (18 de diciembre hasta 09 de enero) .....	56
4.1.3 Fase 3 (10 de enero hasta 21 de enero).....	61
4.2 Valoración de resultados obtenidos .....	64
4.3 Protocolo de ventilación en despachos de la planta baja (27 de enero hasta 31 de enero).....	67
5 Propuesta de medida de mitigación .....	75
5.1 Técnicas de protección.....	75
5.2 Contacto con empresas .....	77
5.3 Propuesta final.....	79
6 Conclusiones y líneas futuras .....	85
6.1 Conclusiones .....	85
6.2 Líneas futuras .....	87
7 Bibliografía.....	89
Anexo I: Registro de protocolo de ventilación.....	93
Anexo II: Gráficas de las diferentes fases por lugar de estudio .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos .....	7
Figura 2-1 Número de estudios del radón por año realizados sobre el total - Fuente: Scopus.....	14
Figura 2-2 Número de estudios realizados del radón por área de estudio - Fuente: Scopus .....	15
Figura 2-3 Número de estudios realizados del radón por país que lo realiza - Fuente: Scopus.....	15
Figura 2-4 Efecto Stack producido en edificaciones .....	17
Figura 2-5 Evolución de la concentración de radón frente al viento - Fuente: [22].....	18
Figura 2-6 Sistema AguaKIT para medición de radón.....	24
Figura 2-7 Falla de Alhama de Murcia.....	26
Figura 2-8 Estaciones españolas de compartición de información en tiempo real – Fuente: [37]...28	
Figura 3-1 Ubicación del edificio del CUD en la ENM – Fuente: Google Earth .....	29
Figura 3-2 Edificio del CUD visto desde la explanada de la ENM.....	30
Figura 3-3 Situación del CUD en el Patio de Aulas (Planta baja) .....	31
Figura 3-4 Situación del CUD en el Patio de Aulas (Planta alta) .....	31
Figura 3-5 Equipo de medición de radón y aplicación de teléfono móvil .....	32
Figura 3-6 Sensor de T <sup>a</sup> y humedad con correspondiente USB para transferencia de datos .....	32
Figura 3-7 Vista del programa OneWireViewer .....	33
Figura 3-8 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 1).....	35
Figura 3-9 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 1) .....	35
Figura 3-10 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 2).....	36
Figura 3-11 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 2) .....	37
Figura 3-12 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 3).....	37
Figura 3-13 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 3) .....	38
Figura 4-1 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 1).....	40
Figura 4-2 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 1).....	41
Figura 4-3 Gráfica de concentración de radón de los despachos 218 y 215.....	42
Figura 4-4 Concentración de radón frente al viento en despacho 118 (Fase 1).....	43
Figura 4-5 Concentración de radón frente al viento en despacho 114 (Fase 1).....	43
Figura 4-6 Concentración de radón frente al viento en despacho 115 (Fase 1).....	44
Figura 4-7 Concentración de radón frente al viento en despacho 218 (Fase 1).....	44
Figura 4-8 Concentración de radón frente al viento en despacho 215 (Fase 1).....	45
Figura 4-9 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 118 (Fase 1) .....	45
Figura 4-10 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 114 (Fase 1) .....	46
Figura 4-11 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 115 (Fase 1) .....	46

Figura 4-12 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 218 (Fase 1) .....	47
Figura 4-13 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 215 (Fase 1) .....	47
Figura 4-14 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> exterior en despacho 118 (Fase 1) .....	48
Figura 4-15 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> exterior en despacho 114 (Fase 1) .....	48
Figura 4-16 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> exterior en despacho 115 (Fase 1) .....	49
Figura 4-17 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> exterior en despacho 218 (Fase 1) .....	49
Figura 4-18 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> exterior en despacho 215 (Fase 1) .....	50
Figura 4-19 Concentración de radón frente a presión en despacho 118 (Fase 1) .....	50
Figura 4-20 Concentración de radón frente a presión en despacho 114 (Fase 1) .....	51
Figura 4-21 Concentración de radón frente a presión en despacho 115 (Fase 1) .....	51
Figura 4-22 Concentración de radón frente a presión en despacho 218 (Fase 1) .....	52
Figura 4-23 Concentración de radón frente a presión en despacho 215 (Fase 1) .....	52
Figura 4-24 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> interior en despacho 115 (Fase 1).....	53
Figura 4-25 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> interior en despacho 218 (Fase 1).....	53
Figura 4-26 Concentración de radón frente a T <sup>a</sup> interior en despacho 215 (Fase 1).....	54
Figura 4-27 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 115 (Fase 1) .....	54
Figura 4-28 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 218 (Fase 1) .....	55
Figura 4-29 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 215 (Fase 1) .....	55
Figura 4-30 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 2).....	56
Figura 4-31 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 2).....	57
Figura 4-32 Gráfica de concentración de radón del despacho 114, seminario 1 y sala de grados...58	
Figura 4-33 Concentración de radón frente al viento en el despacho 118 (Fase 2) .....	59
Figura 4-34 Concentración de radón frente al viento en el seminario 1 (Fase 2) .....	59
Figura 4-35 Concentración de radón frente a la T <sup>a</sup> interior en el seminario 1 (Fase 2) .....	60
Figura 4-36 Concentración de radón frente al viento en la sala de grados (Fase 2) .....	60
Figura 4-37 Concentración de radón frente al viento en el despacho 217 (Fase 2) .....	61
Figura 4-38 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 3).....	62
Figura 4-39 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 3).....	63
Figura 4-40 Concentración de radón frente al viento en la cámara de oficiales (Fase 3).....	64
Figura 4-41 Valoración de la planta baja.....	66
Figura 4-42 Valoración del entreplantas.....	66
Figura 4-43 Valoración de la planta alta.....	66
Figura 4-44 Evolución del radón en día 1 de protocolo de ventilación. Despacho 118. ....	68
Figura 4-45 Evolución del radón en día 2 de protocolo de ventilación. Despacho 114. ....	69
Figura 4-46 Evolución del radón en día 2 de protocolo de ventilación. Despacho 118. ....	69
Figura 4-47 Evolución del radón en día 3 de protocolo de ventilación. Despacho 114. ....	70

Figura 4-48 Evolución del radón en día 3 de protocolo de ventilación. Despacho 118. ....	70
Figura 4-49 Evolución del radón en día 4 de protocolo de ventilación. Despacho 114. ....	71
Figura 4-50 Evolución del radón en día 4 de protocolo de ventilación. Despacho 118. ....	72
Figura 4-51 Evolución del radón en día 5 de protocolo de ventilación. Despacho 114. ....	73
Figura 4-52 Evolución del radón en día 5 de protocolo de ventilación. Despacho 112. ....	74
Figura 5-1 Despresurización activa del suelo (DAS) - Fuente: [40] .....	76
Figura 5-2 Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes. Xunta de Galicia.....	80
Figura 5-3 Rejilla en puerta de habitación .....	81
Figura 5-4 Sistema de VMC - Fuente: [43] .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Media de resultados obtenidos en Universidad de Nigeria.....	24
Tabla 3-1 Reparto de equipos y características de la Fase 1.....	35
Tabla 3-2 Reparto de equipos y características de la Fase 2.....	36
Tabla 3-3 Reparto de equipos y características de la Fase 3.....	37
Tabla 4-1 Concentración media de radón en la Fase 1.....	39
Tabla 4-2 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 1).....	42
Tabla 4-3 Concentración media de radón en la Fase 2.....	56
Tabla 4-4 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 2).....	58
Tabla 4-5 Concentración media de radón en la Fase 3.....	61
Tabla 4-6 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 3).....	63
Tabla 4-7 Medias globales de concentración de radón en las 3 fases.....	65
Tabla 5-1 Casos de éxito de la empresa INTERA.....	78

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

*"Es muy difícil no caer en el alarmismo cuando hablamos del radón."*

## 1.1 Justificación

### 1.1.1 El radón, tan imperceptible como dañino

El elemento químico radón (Rn-222) es uno de los gases nobles de la tabla periódica (Ver Figura 1-1). Proviene de la compleja cadena de desintegración del Uranio-238, y se presenta tanto en la superficie como en el interior de la tierra. Pese a que no es un elemento de los más estudiados, se está convirtiendo en uno de los más famosos en estos últimos años.

Tanto es así que hasta se le ha dedicado un día al año: *"Hoy 7 de noviembre, se celebra el Día Europeo del Gas Radón."* [1]

H																								He
Li	Be											B	C	N	O	F								Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl								Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br								Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I								Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At								Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts								Og
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu									
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr									

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos

Es radiactivo, volátil y lo peor de todo, imperceptible. Este gas se mide en unidades de radiactividad por unidad de volumen: Bequerelios por metro cúbico ( $\text{Bq/m}^3$ ).

Aunque su media en la superficie es de entorno a 5-15 Bq/m<sup>3</sup> [2], en otros lugares como cuevas, aguas subterráneas, minas, o incluso casas y colegios, puede llegar a tener altos niveles de concentración que provocan problemas severos de salud. De hecho, se le atribuyen más de 1500 muertes al año relacionadas con el cáncer de pulmón [3].

Pero este gas no reside únicamente en el suelo, sino también en el agua, especialmente en las subterráneas, por lo que supone otro motivo de estímulo para estudiar su mitigación en pozos subterráneos cerca de zonas residenciales que se abastecen continuamente de dicha agua.

Además, se sabe que muchos materiales de construcción contienen niveles de radón que, a posteriori, son perjudiciales para la salud de las personas que viven en dichos edificios. Por tanto, es un gas cuyo comportamiento es difícil de estudiar para definir estándares, pues depende de muchos factores y condicionantes dado que se acumula y mitiga según cada caso específico.

Por otro lado, existe la posibilidad que este gas no solamente afecte al cuerpo humano provocando en algunos casos cáncer de pulmón, sino que también afecte a otros órganos conectados a las vías aéreas, como informa María Torres Durán [4]. Sin embargo, es un campo muy desconocido y del que poco se ha estudiado en profundidad.

### *1.1.2 Análisis previo y referencias*

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) pretende continuar el estudio que realizó el pasado año el actual Alférez de Navío Guillermo Muñoz Yébenes [5], en la Escuela Naval Militar de Marín (ENM), único centro de formación de Oficiales de la Armada Española.

El anterior estudio consistía en analizar la presencia de radón en diferentes edificios de la ENM. Durante su TFG realizó mediciones en las siguientes localizaciones:

- Comedor
- Biblioteca de Alumnos
- Cuartel de Alumnos Marqués de la Victoria (en sus respectivos pisos y a diferentes alturas)
- Aula 40 del Edificio Isaac Peral
- Aula 16 en el Patio de Aulas
- Edificio de Investigación
- Sala de Grados del CUD

En todas ellas se pudo observar, de manera clara, la mayor o menor concentración de radón presente durante los períodos de estudio, en función de una serie de parámetros que conllevaba cada localización y conductas que llevaba a cabo el personal que frecuentaba dicho lugar.

Tras la realización del TFG el pasado curso, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El radón aumenta según los elementos de construcción y las condiciones del terreno sobre el que se edifica, siendo los más perjudiciales los suelos graníticos.
- La estrecha dependencia entre la concentración de radón y algunos fenómenos atmosféricos y meteorológicos.
- La falta de buenos hábitos como la ventilación constante favorece la elevada concentración de este gas.
- Existen algunos edificios en la ENM más afectados según su localización. Por ello, se recomendó tomar medidas de protección a la mayor brevedad posible dado que mucha gente pasa un tiempo considerablemente alto en su interior.

### 1.1.3 Preocupación social en los medios

Además, dada la gran influencia que tiene el radón en la salud de los seres humanos, la realización de este estudio cubre una necesidad social de gran actualidad, como se puede ver en las siguientes noticias:

- *“El cáncer por el radón es mayor que por la exposición ambiental al tabaco.”* [6]  
La Voz de Galicia. 26 de junio de 2019. Alberto Ruano-Raviña, profesor titular de Medicina Preventiva y Salud Pública en la Universidad de Santiago.
- *“Una de cada cinco viviendas de Ourense y Pontevedra supera los límites.”* [7]  
El Faro de Vigo. 26 de junio de 2019.
- *“La Comunidad de Madrid mide el radón de los juzgados de Colmenar Viejo tras concentrarse 11 casos de cáncer.”* [8]  
El Mundo. 19 de julio de 2019.
- *“La UE expedienta a España por no aprobar la normativa sobre el gas radón.”* [9]  
El País. 28 de noviembre de 2019.
- *“Extremadura hará frente al gas radón en viviendas y empresas.”* [10]  
Hoy. 28 de noviembre de 2019.
- *“El gas radón es el enemigo invisible que habita en muchos hogares y ocupa el segundo puesto en el ranking de fallecimientos por cáncer de pulmón después del tabaco.”* [11]  
La Voz de Galicia. 12 de febrero de 2020.
- *“Dedicamos mucho esfuerzo al tabaco y al radón no se le presta atención.”* [12]  
La Voz de Galicia. 13 de febrero de 2020. María Torres Durán, doctora en medicina y miembro del grupo Neumovigo I+i.

Estas son algunas citas que se han podido leer en los medios de comunicación españoles durante 2019 y 2020, y que alertan de la repercusión que tiene a nivel nacional el radón, preocupando cada vez más en los territorios más afectados y dándose a conocer en los que menos por su alta peligrosidad.

La sociedad española (y mundial) está concienciándose acerca de las consecuencias que puede conllevar estar expuesto de manera continua a este peligroso gas.

Por tanto, como consecuencia de las conclusiones expuestas en el TFG del AN Guillermo Muñoz Yébenes, y apoyándose en la elevada importancia que está adquiriendo el radón a nivel social, se confirma la obvia necesidad de estudiar la concentración de radón en el edificio del Centro Universitario de la Defensa mediante la realización de este TFG, propuesto para el curso 2019/2020.

## 1.2 Objetivos

Como ya se ha expuesto anteriormente, la necesidad de monitorizar y controlar la concentración de radón justifica la realización de este Trabajo de Final de Grado, que tiene como objetivos los siguientes:

- Continuar con el trabajo realizado en el curso 2018/2019 en edificios de la ENM.
- Realizar mediciones en diferentes localizaciones del edificio del CUD y comparar sus niveles de radiación.
- Comprobar los límites impuestos por la normativa actual y compararlos con los existentes en el edificio del CUD.
- Llevar a cabo una revisión bibliográfica del radón en estudios científicos de diferente índole.
- Corroborar la vinculación de concentración de radón con algunos fenómenos atmosféricos y meteorológicos.
- Proponer medidas de mitigación en las localizaciones más afectadas por el radón.
- Concienciar a los lectores sobre la importancia de estudiar, conocer y combatir este gas noble.

## 1.3 Estructura de la memoria

Este punto pretende explicar, brevemente, la estructura que se ha seguido para llevar a cabo el Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, en el Capítulo 1, se ha expuesto el por qué se ha realizado este TFG, así como los objetivos y una breve reseña del radón.

A continuación, en el Capítulo 2, se explica de una manera un poco más detallada la parte de normativa a nivel nacional y europea, y diversos estudios científicos desarrollados acerca del radón.

El Capítulo 3 trata acerca del edificio que se va a estudiar, de las mediciones que se van a llevar a cabo durante el TFG y con qué equipos de medición, y las localizaciones escogidas en cada fase de estudio.

En el Capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos durante dichas fases, extrayendo tras su estudio conclusiones iniciales. Además, se realiza un protocolo de ventilación para ampliar el conocimiento del comportamiento del radón en este edificio y poder definir una medida de mitigación adecuada.

En el Capítulo 5 se presentan las diferentes medidas de mitigación actuales y la propuesta para mitigar la elevada concentración en el edificio del CUD.

En el Capítulo 6 se muestran las conclusiones extraídas tras la realización del TFG y las posibles líneas futuras.

Para finalizar, se encuentra la bibliografía de referencia en el Capítulo 7.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Normativa del radón

#### 2.1.1 Antecedentes

Resulta lógico pensar que existan normativas que estipulen el modo en que han de hacerse las cosas frente a un foco de mortalidad específico, o conductas de actuación que ayuden a conocer las necesidades y límites frente a dichos focos, véase las normas de tráfico para evitar accidentes o estilos de vida para prevenir problemas de salud o cáncer; pero ¿está el radón regulado?, ¿la normativa española se encuentra actualizada?

La respuesta era negativa hasta hace bien poco, al menos en relación con este poderoso gas noble que tan de lado se ha dejado en los últimos años por parte de las administraciones públicas, y que tantas muertes ha ocasionado, ya que según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el radón ocupa el número 2 en el podio en cáncer de pulmón, tras el tabaco.

A lo largo de los últimos veinte años, la Unión Europea ha publicado diversas recomendaciones acerca de la protección necesaria contra el radón.

La última que estipulaba el modo de combatir este gas es la Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre de 2013 [13].

Véase el objetivo básico de dicha Directiva en su Artículo 1:

*“La presente Directiva establece normas básicas de seguridad uniformes aplicables a la protección de la salud de las personas sometidas a exposición ocupacional, médica y poblacional frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes.”*

Más en concreto, el radón viene especificado en el Artículo 54, “Radón en los lugares de trabajo”, donde establece el límite máximo de radón:

*“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  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional.”*

La Unión Europea estableció en las disposiciones finales de dicha normativa el 6 de febrero de 2018 como fecha máxima para que todos los países la pusieran en vigor:

Artículo 106, Transposición:

*“1. 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.”*

España, sin embargo, no traspuso dicha normativa en el plazo establecido, por lo que ya ha sido expedientada por la Comisión Europea [14].

Y no solamente España ha sido el único país rezagado en la actualización de una normativa clave para la salud; países como Bélgica, Portugal o Grecia tampoco han cumplido los plazos establecidos por la Unión Europea [14]. Por el contrario, sí los hay que se lo han tomado más en serio (Reino Unido, Irlanda o EE. UU.), teniendo dicha normativa al día.

Por otro lado, otra instrucción sobre la que también cabe tomar niveles de referencia es la *“Instrucción IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural”* [15] del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), de 21 de diciembre de 2011.

Esta instrucción establece en su apartado cuarto que el nivel máximo de concentración anual del elemento Rn-222 será de 600 Bq/m<sup>3</sup> en la jornada laboral llevada a cabo. Sin embargo, destaca que si el lugar de trabajo es de alta permanencia se establece el nivel de intervención en 300 Bq/m<sup>3</sup>.

Además, la instrucción hace referencia al *“Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes”* [16] (RPSRI) del CSN, que en su artículo 63 menciona que habrá niveles a partir de los cuales se deberá corregir y controlar el nivel de radón presente en el edificio.

El CSN, en la IS-33, establece estos niveles como sigue:

“

- < 600 Bq/m<sup>3</sup>: no es necesario control.
- 600-1000 Bq/m<sup>3</sup>: se debe aplicar un nivel bajo de control.
- > 1000 Bq/m<sup>3</sup>: se debe aplicar un nivel alto de control.

”

A lo largo del TFG se tomarán, por tanto, estos niveles como referencia para realizar las correspondientes comparativas.

### 2.1.2 Normativa vigente (y actual)

La necesidad de combatir este elemento químico y las presiones europeas en este aspecto han conseguido que España tenga, al fin, una normativa al respecto. Sin embargo, todavía falta la transposición de la Directiva 2013/59/EURATOM, que se espera que sea inminente.

Tras años con la normativa desactualizada, España ha conseguido incluir la sección de DB HS6 en el documento de salubridad del Código Técnico de la Edificación (CTE), mediante el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre [17].

Por tanto, la normativa vigente en España la podemos encontrar en el *“ANEJO II, Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón.”* [18]

### 2.1.3 Modificación al CTE: Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón

La Sección HS 6 es, por tanto, la guía definitiva para combatir el radón. A continuación, se explicará brevemente los aspectos más importantes que incluye dicha normativa.

En el Punto 1 trata los ámbitos de aplicación, distinguiendo entre edificios de nueva construcción e intervenciones en edificios existentes. Además, especifica que no se aplicará en locales no habitables y tampoco en aquellos habitables cuya ventilación sea similar a la que se pueda encontrar en exteriores. No aborda, por tanto, los edificios de antigua construcción.

En el Punto 2 establece el nivel de referencia para el promedio anual de concentración de radón en el interior de los locales habitables en  $300 \text{ Bq/m}^3$ . En este sentido, España ha sido menos restrictiva, puesto que la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece dicho nivel de referencia medio anual en  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Asimismo, la OMS detalla que si no fuera posible alcanzar dicho nivel, se tratará de no superar los  $300 \text{ Bq/m}^3$ . [19]

En el Punto 3 explica las medidas de protección que se llevarán a cabo según la zona en la que se encuentre cada municipio (Zonas 1 conllevan riesgo medio y Zonas 2 riesgo elevado). En este punto cabe destacar que el municipio de Marín (provincia de Pontevedra) se encuentra en la Zona 2. Dichas medidas son: barrera de protección (características y dimensionamiento), espacio de contención ventilado y despresurización del terreno.

En el Punto 4 especifica las características que deben cumplir los productos de construcción y el control de recepción en obra correspondiente a cada uno (todo especificado en el pliego de condiciones del proyecto que vaya a llevarse a cabo).

En el Punto 5 detalla las diferentes medidas de protección en las nuevas construcciones, siendo estas:

- Barrera tipo lámina
- Cámara de aire horizontal ventilada
- Cámara de aire vertical ventilada
- Sistemas de despresurización

Además, en este punto estipula el control de obra terminada y el de ejecución, en el que se obedecerá a los directores de obra y de ejecución, respetará siempre el pliego de condiciones del proyecto y nunca se incumplirán las condiciones mínimas de la “*Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón*”.

Por último, en el Punto 6, establece un plan de mantenimiento que se llevará a cabo con rigurosidad al cabo del tiempo en función de las operaciones correspondientes, y velando siempre por la seguridad y fiabilidad de las instalaciones para la correcta protección del radón.

Por otro lado cuenta con tres apéndices. El A define la terminología empleada en el documento y el B clasifica todos los municipios de las provincias de España en los que el CSN cree que la concentración de radón supera el nivel de referencia.

Por lo que respecta al Apéndice C: muestra la secuencia de las operaciones que hay que llevar a cabo para determinar la media anual de concentración de radón en los locales habitables de un edificio. Estas operaciones son:

1. Muestreo
2. Medición
3. Estimación del promedio anual de concentración de radón.

En cada subapartado explica detalladamente todos los pasos, condiciones y requisitos que se deben cumplir en cada fase.

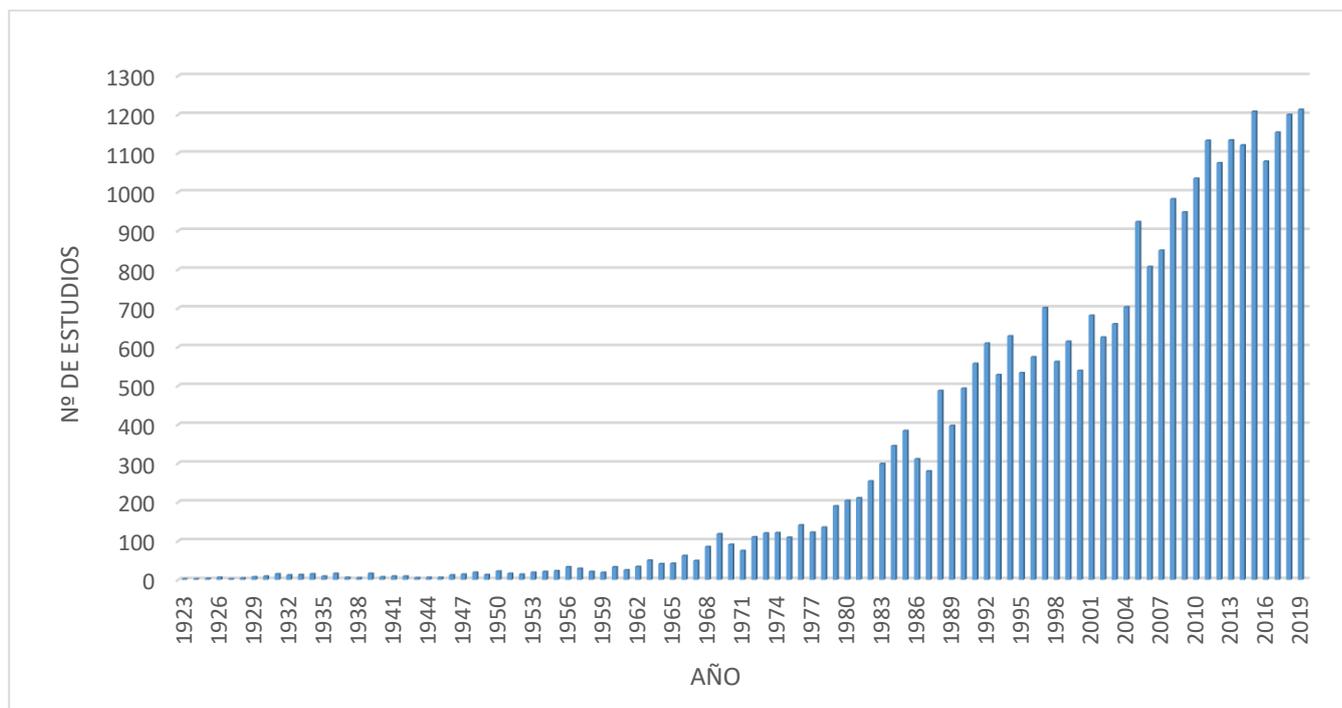
## 2.2 Estudios científicos

En este apartado se estudiarán diferentes fuentes de información y se contrastarán, en algunos casos, para poder llegar a unas conclusiones en el último apartado, en función de los resultados obtenidos durante las diferentes fases de medición.

En primer lugar, se mostrará una serie de gráficos acerca del radón, extraídos de la base de datos científica Scopus [20].

Una de las preguntas más importantes que se debe contestar es cuándo empezó a investigarse sobre el radón y cuándo hubo realmente un crecimiento en su estudio.

Históricamente se sabe que el personal destinado a trabajar en minas o yacimientos a mucha profundidad bajo tierra morían por pasar largos períodos de tiempo allí abajo encerrados. Fue siglos después, concretamente en el siglo XIX, cuando se relacionaron dichas muertes con cáncer de pulmón, y ya bien entrado el siglo XX se relacionó también el radón con dicho cáncer (pese a que el radón se descubrió en el año 1900). Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XX cuando comenzó el auge de los estudios sobre este gas. A continuación, se muestra un gráfico (Figura 2-1) en el que se puede ver el crecimiento de estudios del radón:



**Figura 2-1 Número de estudios del radón por año realizados sobre el total - Fuente: Scopus**

Como puede observarse en la Figura 2-1, el número de estudios relacionados con el radón se vio incrementado drásticamente a partir de la época de los 80. El año en el que más estudios se han realizado ha sido el 2019, lo que nos muestra la importancia de este gas en la comunidad científica y la responsabilidad que se está adquiriendo en este aspecto.

Por otro lado, también se quiere mostrar la cantidad de estudios que se ha realizado dependiendo del área de estudio. En la Figura 2-2, se observa que las ramas más estudiadas son en Medicina, Ciencia Medioambiental, Física y Astronomía, Ingeniería o Matemáticas.

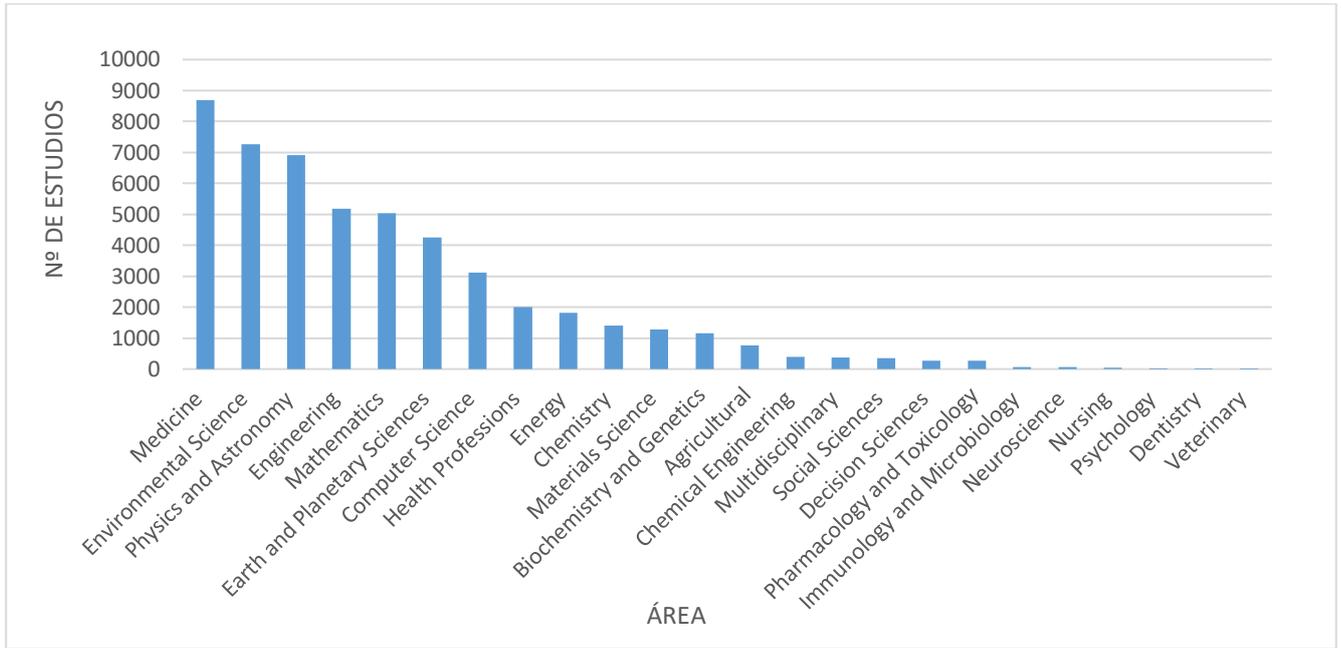


Figura 2-2 Número de estudios realizados del radón por área de estudio - Fuente: Scopus

Por último, filtrando los estudios por país, se ve la clara diferencia en involucración y medios disponibles para realizar los estudios correspondientes. En la Figura 2-3, se muestran dichos datos:

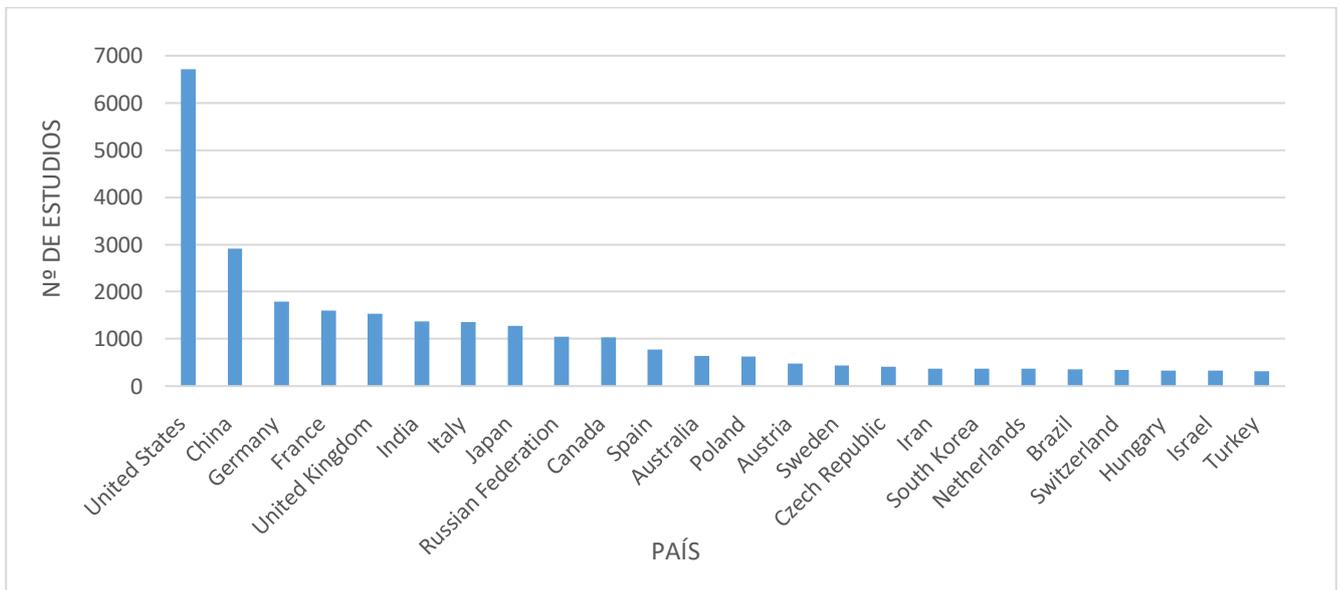


Figura 2-3 Número de estudios realizados del radón por país que lo realiza - Fuente: Scopus

### 2.2.1 Influencia de parámetros meteorológicos

El radón, como ya se ha mencionado, proviene de la cadena de desintegración del uranio. Por eso es normal pensar que, cuando hablamos de concentración de radón, una fuente de uranio es la que proporciona la tasa de radón, y hasta que dicha fuente no se agote, el radón va a seguir presente. Sin embargo, si ese aporte de radón es constante, ¿por qué las concentraciones tienen tantas fluctuaciones a lo largo del tiempo?

Pues bien, son precisamente los factores meteorológicos los que mayor influencia tienen. Si por el contrario no estuvieran presentes, la concentración se mantendría casi totalmente estable a lo largo del tiempo.

Por lo tanto, en este subapartado, se explicará la influencia de los parámetros meteorológicos según el CSN y algunas fuentes que han realizado estudios científicos (como una tesis), y se procederá con una breve comparativa de los resultados.

En primer lugar, hablaremos sobre las afirmaciones del CSN, en su documento “*Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios.*” [21]

Cuando el CSN habla de la presión atmosférica, establece una relación inversamente proporcional, es decir, a medida que aumenta la presión, disminuirá la concentración de radón, y viceversa. Este hecho se debe a la permeabilidad del terreno. Debido a la composición estructural de las viviendas, se tomará la presión atmosférica como la que se tiene en el interior de una vivienda.

Por tanto, durante un período de borrasca, la presión atmosférica desciende y la permeabilidad del terreno hace que las presiones no se igualen a la misma velocidad, por lo que el radón tenderá a moverse hacia zonas de presiones más bajas, es decir, el exterior de las viviendas.

Por lo que respecta al viento, el CSN especifica dos posibles comportamientos de la concentración de radón en función de este.

En primer lugar establece una relación de dependencia ‘favorable’, es decir, a medida que aumenta la intensidad del viento, disminuye la concentración de radón. Esto se debe a la sencilla ventilación que se produce en el interior de la vivienda, a la correcta renovación de atmósfera que reduce los niveles presentes en el habitáculo.

En segundo lugar, los efectos de succión provocados por el viento consiguen que la diferencia de presión entre el interior y el exterior sean notables (cabe destacar que esta diferencia es considerablemente menor que en el primer caso). Esto provoca el efecto contrario que en el primer caso, es decir, un aumento de concentración de radón debido a la entrada de radón por baja presión interior.

En cuanto a las temperaturas, el CSN explica que las variaciones de temperatura en el exterior también pueden provocar una diferencia de presión entre el interior y el exterior (Ver Figura 2-4). Esta variación de presión generada favorece la entrada de radón hacia el interior, es decir, a mayor temperatura interior, mayor diferencia de presión y mayor concentración de radón. En verano, por tanto, la temperatura exterior suele ser mayor que la interior, por lo que la entrada de radón será menor. En invierno, al tener una temperatura interior mayor, el radón entra con mayor facilidad. Sin embargo, el CSN justifica que la temperatura no es valor determinante en las variaciones de concentración de radón.

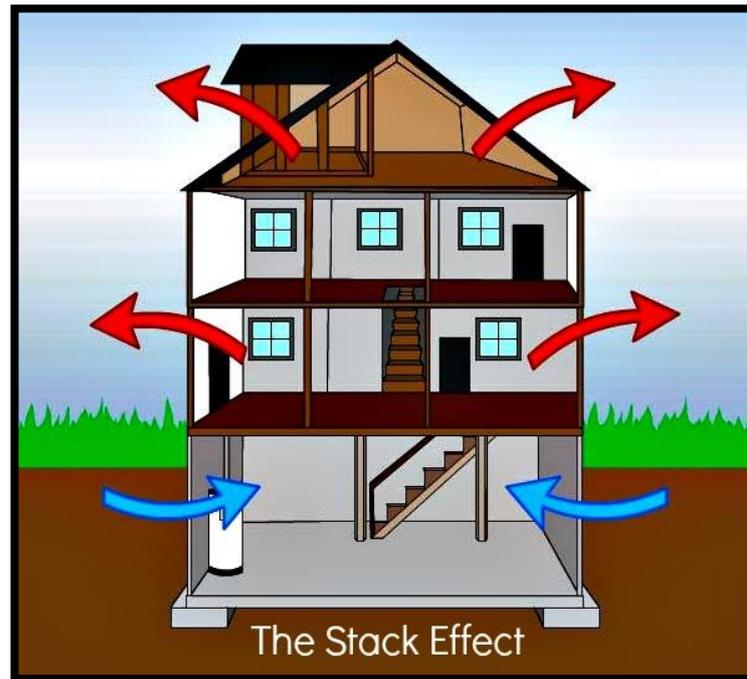


Figura 2-4 Efecto Stack producido en edificaciones

Por último, el CSN detalla la influencia de las precipitaciones explicando que las lluvias podrían reducir la permeabilidad del suelo y con ello facilitar al radón su entrada al interior de las viviendas. Pese a ello, resta influencia al no ser tan determinante en el aumento de la concentración de radón.

Como conclusión, el CSN afirma en su documento *“Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios”* que la presión atmosférica es el parámetro más influyente de todos, consiguiendo 100 veces más de diferencia de presión que la generada por el viento y 1000 veces más que la diferencia de presión generada por las temperaturas.

Comparemos ahora los resultados obtenidos en la tesis doctoral del arquitecto Borja Frutos Vázquez: *“Estudio experimental sobre efectividad y viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones.”* [22]

El autor explica la presión atmosférica como el más influyente en el aumento de concentración de radón. Establece, como el CSN, la presión interior en una vivienda como igual a la atmosférica y muestra en las gráficas obtenidas en su toma de datos la clara dependencia entre el radón y la presión, aumentando la concentración de radón conforme disminuye la presión.

En cuanto al viento, muestra la gráfica correspondiente a dos plantas (Figura 2-5) y sugiere que el efecto de succión provocado en la fachada es el responsable de las altas concentraciones registradas, coincidiendo esas diferencias de presiones máximas con los días en los que más viento registró. El autor concluye que no existe una clara dependencia entre el viento y la concentración de radón, pero sí puede generar unas pequeñas diferencias de presión que afecten a la concentración de radón sumándose a la presión.

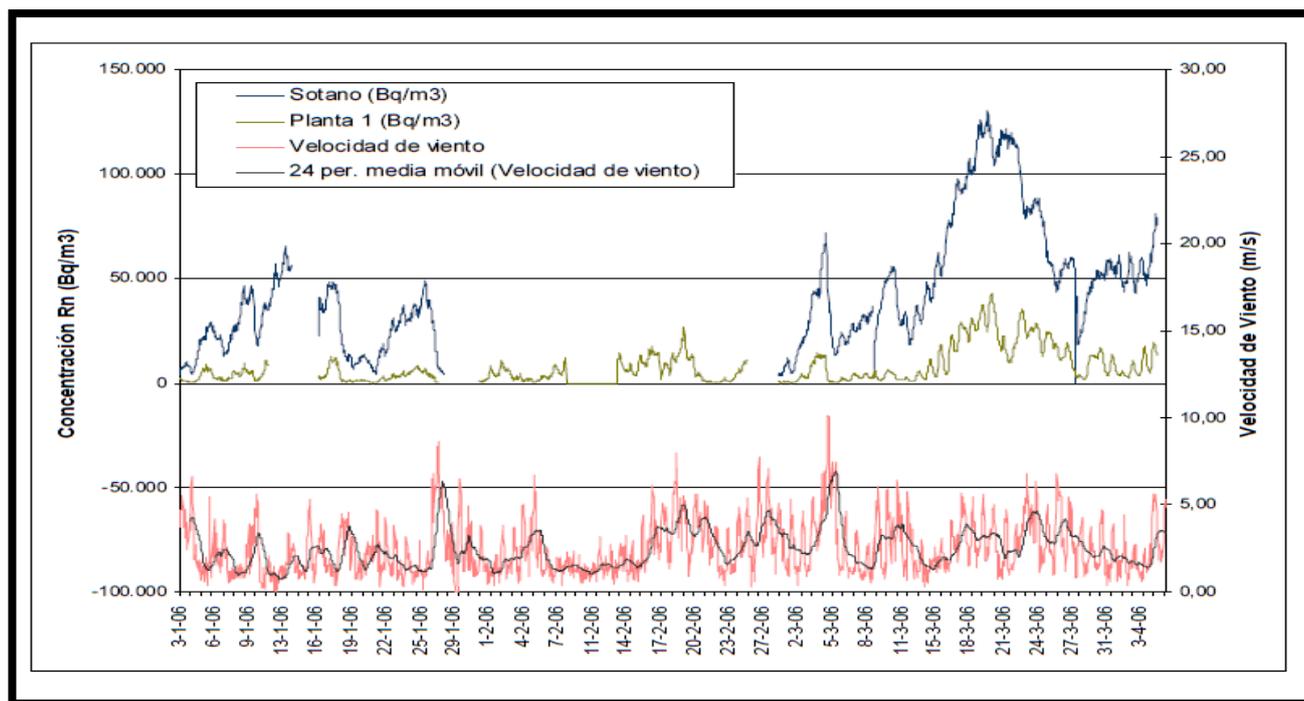


Figura 2-5 Evolución de la concentración de radón frente al viento - Fuente: [22]

Con relación a las temperaturas, el autor mide durante su estudio las concentraciones de radón en función de estas en dos pisos a diferentes alturas, mostrando algunas gráficas de los resultados obtenidos. Como conclusión a este parámetro, el autor es muy claro y determina que no existe una gran influencia en la concentración de radón.

Por último, se trata en la tesis el factor lluvia, mostrando gráficas en las que se demuestra que las lluvias conllevan una reducción de la permeabilidad de los suelos, favoreciendo así la transferencia de radón desde los terrenos hasta el interior de una vivienda de una manera más rápida y notable que cuando no hay precipitaciones.

Además, explica que las mayores concentraciones de radón se han registrado en períodos de precipitaciones que venían acompañados con bajas presiones, lo que ha supuesto dichos picos de radón hacia el interior.

Como conclusión, el doctor Frutos afirma que de los parámetros estudiados, la presión atmosférica y las precipitaciones son los más influyentes en su proceso de estudio.

La conclusión de este apartado es clara con respecto a lo que el CSN y el doctor Frutos establecen, la presión es el parámetro más influyente, mientras que el CSN establece después el viento y la diferencia de presión que genera, y el doctor Frutos establece las precipitaciones.

Más adelante, en el apartado de resultados, se mostrarán los resultados obtenidos en la realización del presente TFG, comparando estos con lo que establece el CSN (comportamiento habitual del radón con respecto a dichos parámetros) y la tesis del doctor Frutos.

### 2.2.2 Otros parámetros determinantes

Como ya se ha comentado, el radón es un gas muy impredecible, por lo que su estudio requiere de técnicas muy especializadas y concretas según el caso, no siendo posible un protocolo exacto y definido que consiga estandarizar el 100% de las situaciones en las que se tenga acumulación de radón.

En primer lugar, se expone brevemente algunas de las conductas que suponen riesgo para la salud y que pueden incrementar las posibilidades de desarrollar cáncer de pulmón debido a la concentración de radón:

- Fumar de manera continua.
- Altos períodos de exposición con exceso de radón.
- Exposición al radón en lugares muy frecuentados como la propia vivienda o lugar de trabajo.

En este sentido, fumar de manera continua y someterse a continuas exposiciones al radón, aumentan de manera exponencial el riesgo de padecer cáncer de pulmón.

A continuación, se enumeran algunos parámetros que conllevan un claro aumento del radón:

- Altura: cuanto menor altura, mayor concentración de radón, ya que el radón se diluye en la atmósfera a medida que se aleja del suelo.
- Porosidad del terreno.
- Ventilación en el habitáculo: a mayor refresco de la atmósfera, menor concentración de radón.
- Materiales de construcción derivados del radio (ladrillos, hormigón, arena, cemento, etc.).
- Permeabilidad del terreno.

### 2.2.3 Vínculo con enfermedades

Ya se ha expuesto que el radón provoca entorno a 1500 muertes al año por cáncer de pulmón debido a su exposición constante. Sin embargo, los más escépticos cuestionan que solamente produzca este cáncer y no otros de manera simultánea. Es por ello que a nivel internacional, muchos investigadores y científicos están destinando sus recursos a realizar estudios de este peligroso gas.

Es curioso que no solo haga falta estudiarlo en detalle para comprobar su elevada presencia en materiales de construcción o bajo las viviendas, sino que también se presente en muchos productos cotidianos y que no estamos concienciados de su porcentaje de radiación.

Durante el año 2018, explica el autor Jin-Kyu Kang [23], hubo en Corea algunos medios de comunicación que relacionaron productos como colchones o mascarillas de cara con materiales que contenían elementos que se descomponían en radón. Esas noticias aumentaron la preocupación de la sociedad, puesto que son productos del día a día y que nadie imaginaba que pudieran ser contaminantes.

Es por ello por lo que este autor realizó un estudio para proporcionar evidencias acerca de la relación entre el radón y otras enfermedades que no fueran cáncer de pulmón. En dicho estudio aclara que, por ejemplo, en cáncer hematológico, dicha relación es bastante débil.

Tras el análisis de los resultados, se evidencia que la relación leucemia-radón no está aceptada a nivel científico por falta de pruebas.

Por otro lado, especifica que otras enfermedades como el cáncer de tiroides o piel tampoco han sido correlacionados con la exposición a altos niveles de radón.

Otro problema de salud muy discutido ha sido el estudiado por el Profesor en Medicina Preventiva y Salud Pública Alberto Ruano-Raviña y otros investigadores, en el artículo “*Exposición al radón y tumores del sistema nervioso central*” [24].

Durante el artículo, el autor expone diferentes datos del radón, especificando que está catalogado como primera causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras y segunda causa en personas fumadoras. Además, explica que las dosis de radón que el cuerpo humano capta son menores en la médula ósea o en órganos como el riñón. Por parte del cerebro, el autor compara la cantidad de radiación recibida por este durante un año ante una exposición de 200 Bq/m<sup>3</sup>, con la recibida por los pulmones, siendo la de los pulmones entre 500 y 1000 veces mayor.

La metodología empleada por el autor para desarrollar el artículo fue estudiar diferentes fuentes científicas como PubMed [25]. Durante su explicación hace distinción entre los estudios que se han realizado sobre personas adultas y aquellos llevados a cabo sobre niños.

Para cada uno especifica los tamaños de las muestras, niveles de concentración de radón registrados durante los diferentes estudios recopilados y la posibilidad de correlación o no.

Uno de los casos estudiados es el desarrollado en los mineros. La gran mayoría de los estudios relacionados con la minería descartaba la correlación de exposición al radón con problemas del sistema nervioso central.

Por lo que respecta a los adultos y los niños, establece como posibilidad de falta de correlación la localización donde se llevaron a cabo los estudios, siendo dichas ubicaciones en zonas no propensas a tener altos niveles de radiación por exposición al radón.

Como conclusión, el autor afirma que son necesarios más estudios (preferiblemente en zonas afectadas por el radón) para determinar una clara correlación entre el radón y problemas del sistema nervioso central.

En España, la preocupación acerca de la influencia del radón se vuelve cada vez mayor, tanto ha sido así que el Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LaRUC) de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria se vio obligado a publicar un documento, “*El gas Radón en el ámbito Laboral*” [26], donde en uno de sus apartados explica las posibles relaciones que puede tener este gas con otro tipo de enfermedades.

En este apartado explica que, pese a la existencia de estudios y publicaciones acerca del radón y su influencia en enfermedades como cáncer de mama o leucemia infantil, no existe una base sólida que correlacione a este gas con dichos problemas de salud. Además, especifica que la relevancia de este gas está haciendo que aumenten los estudios en el sector de la salud, lo que pronto dará respuestas a los más escépticos.

Como puede verse, el radón se está abriendo paso poco a poco en todos los ámbitos, sin embargo, no todo son contraindicaciones con respecto al radón. Existen empresas que proporcionan baños especiales para combatir la artritis reumatoide y que supuestamente restan el dolor en los pacientes en los siguientes meses.

Otras empresas permiten la inhalación de radón bajo ciertas condiciones de temperatura, humedad y concentración de radón, y también conseguirían mejorar las funciones inmunitarias del cuerpo humano.

Por último, otro estudio realizado en diferentes balnearios de Alemania y Austria asegura que los baños en agua contaminada por radón son capaces de reducir los dolores constantes de espalda hasta en períodos de nueve meses.

Ante estos posibles beneficios del radón, la comunidad científica expresa que la información debe tratarse con cuidado para no infravalorar el verdadero peligro demostrado del radón: el cáncer de pulmón.

A continuación, se presenta el estudio "*Cáncer de pulmón y radón residencial en no fumadores: un estudio de agrupación en el noroeste de España*" [27], en el que participaron diversos científicos y autores ya mencionados en este TFG, como Don Alberto Ruano-Raviña.

En la realización de este estudio se contó con la colaboración de hospitales y universidades de toda la región noroeste del país: Orense, Santiago de Compostela, Vigo, La Coruña, Lugo y Madrid.

Los sujetos fueron personas no fumadoras, para comprobar la relación entre el cáncer de pulmón y la fuente que lo producía, en este caso radón y no tabaco.

El cáncer de pulmón supone entorno al 15-25% de los cánceres que padece la sociedad no fumadora, en términos generales. Sin embargo, el presente estudio pretendía hallar la relación entre el cáncer de pulmón y el radón residencial.

Para ello, se estudió a 1415 individuos (523 casos y 892 controles), de entre los años 2002 y 2017, cuya condición era no haber fumado nunca, haber fumado menos de 100 cigarrillos en toda su vida, o máximo un cigarrillo al día durante un máximo de 6 meses.

En el estudio se distingue entre caso y control. Caso es aquel que se ha confirmado con una biopsia, presentando cáncer primario de pulmón, mientras que control es aquel en el que se ha registrado en una unidad quirúrgica en operaciones no peligrosas para los pacientes. Los equipos empleados durante el proceso fueron los del Laboratorio de la Universidad de Santiago de Compostela.

Para llevar a cabo las mediciones fueron entregados equipos de medición de radón a los distintos sujetos, de manera que los pusieran en sus domicilios, principalmente en los dormitorios, y poder así monitorizar la cantidad de radón a la que estaban expuestos.

Tras comprobar los datos obtenidos, se observó que no todas las muestras fueron aptas para su estudio. Pese a ello, se determinó que la exposición al radón fue mayor en los casos que en los controles. Además, se relacionó considerablemente el cáncer de pulmón con la exposición al radón en concentraciones mayores de 200 Bq/m<sup>3</sup>.

Otro de los resultados obtenidos fue la relación entre el radón y el adenocarcinoma, que es el tipo de cáncer de pulmón más frecuente.

Como definen los autores, este estudio es uno de los pocos que se ha realizado en el sector, dado que se centra única y exclusivamente en las personas no fumadoras.

Los autores concluyen que se necesita transmitir más conocimiento y preocupación a las personas no fumadoras acerca de este gas tan dañino, centrándose en mayor medida en las zonas que son propensas a tener elevadas concentraciones de gas radón.

Como conclusión a este apartado de influencia del radón en diferentes tipos de enfermedades, se puede apreciar que la relación radón-cáncer de pulmón está totalmente demostrada, sin embargo, no ocurre lo mismo con otros tumores o enfermedades, en los que no se ha encontrado ninguna relación o no hay suficientes estudios al respecto.

#### 2.2.4 Radón en el agua

Como ya se ha explicado, el radón, proveniente del uranio, puede encontrarse tanto en los suelos y terrenos como en el agua. Su transmisión desde el agua hacia el ser humano puede llevarse a cabo por dos vías diferentes:

- Vía digestiva: el agua contaminada acaba en el estómago.
- Vía respiratoria: el agua contaminada desprende al aire el radón contenido y finalmente el cuerpo humano acaba inhalando dicho gas.

La segunda vía es mucho más dañina que la primera, pues el estómago es más robusto y menos sensible a este gas. Sin embargo, el radón también puede provocar, en algunos casos, cáncer de estómago. Esto se debe al consumo de agua contaminada de origen subterráneo, que asciende al 11% la cifra de cáncer de estómago por este motivo [28].

Ante ello, la sociedad se ve amenazada por este gas por otra vía que no es la propia de los suelos y su entrada en las viviendas, sino en la propia ingesta de agua o emanación del radón desde las aguas subterráneas.

Es por ello por lo que existen diferentes métodos de medición de radón en el agua. Algunos de estos métodos son:

- Contador líquido por centelleo
- Centelleo alfa “Lucas”
- Electret

Una vez se ha medido la concentración de radón en el agua, existen métodos para reducir dicha concentración. A continuación, se explican brevemente:

- Aireación forzada tras burbujeo: consiste en remover el agua y hacer que aparezcan burbujas. De esa manera, el radón asciende hasta la superficie y de ahí se desprende a la atmósfera.
- Mediante carbón activo: básicamente fija el radón con el carbón activo, evitando así su contaminación.
- Por presencia en depósito: el radón se desintegra de manera que el nuevo elemento/compuesto no desprenda radiación alfa.

En este aspecto, la normativa europea, la Directiva 2013/51/Euratom del Consejo de 22 de octubre de 2013, establece el límite de radón en el agua en los 100 Bq/m<sup>3</sup> [29]. Por su parte, España, en su normativa nacional, fijó este valor en 500 Bq/m<sup>3</sup> para consumo humano mediante el Real Decreto 314/2016 de 29 de julio de 2016 [30].

En este último Real Decreto se especifica que a partir de cierto límite se podrán realizar procedimientos de extracción de radón del agua:

*“Se consideran justificadas las medidas correctoras por motivos de protección radiológica, sin otra consideración, cuando las concentraciones de radón superen los 1.000 Bq/L.”*

Como se acaba de exponer, se llevarán a cabo medidas correctoras, sin embargo, las mediciones deberán haber sido fiables, comparadas con otras fuentes y además deben estar sujetas a comprobación.

A continuación, se exponen diversos estudios y artículos científicos llevados a cabo en el ámbito del radón en el agua.

En primer lugar, se expone un estudio que organizó la Environmental Protection Agency (EPA), de los Estados Unidos, sobre el radón en el agua en el que participaron hasta ocho laboratorios de diferentes países con el fin de poder comprobar el nivel de fiabilidad y similitud en los resultados [31]. Estos países fueron España, Portugal, Noruega, Finlandia, Irlanda y Estonia.

El procedimiento empleado fue el siguiente: se cogió una muestra específica proveniente de Irlanda con concentración de radón de entre 500 y 1000 Bq/m<sup>3</sup>. El objetivo era comprobar que los diferentes laboratorios eran capaces de llevar a cabo una medición exacta y cercana al límite de acciones correctoras (1000 Bq/m<sup>3</sup>).

Cada muestra asignada a los diferentes laboratorios fue dividida en dos para que pudieran llevar a cabo más de una técnica. Pese a ello, todos realizaron la ya antes mencionada, contador líquido por centelleo, que básicamente consiste en medir los destellos luminosos que produce la radiación.

Tras el período de mediciones, se comprobaron los resultados. De los dieciséis resultados, solo uno de ellos se salió de las incertidumbres establecidas, lo que indica que el método del contador líquido por centelleo es totalmente fiable y seguro a la hora de determinar la concentración de radón presente en el agua. La media de los resultados fue de 611 Bq/m<sup>3</sup>.

A continuación, se expone brevemente un estudio realizado en 2014 por personal de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: “*Radón en las aguas subterráneas del Acuífero del noreste de Gran Canaria.*” [32].

Es importante destacar que el límite de referencia de concentración de radón en el agua que establecen los investigadores es de 100 Bq/m<sup>3</sup> (puesto que fue en 2014), mientras que hoy en día el límite está en 500 Bq/m<sup>3</sup>.

La zona de estudio, localizada en terrenos volcánicos de la isla, destaca por ser una de las más importantes en aportación de agua al sector agrícola y doméstico. El objetivo de los investigadores era comprobar el nivel de radiación que contenían las aguas subterráneas más importantes de la isla. Además, trataron de conocer, mediante este estudio, el flujo que seguía el agua en la isla.

Para la realización del estudio se cogieron muestras de diferentes pozos de la isla mediante bombeo. Los equipos empleados para la medición de concentración de radón fueron los de medición continua AlphaGuard. Tras analizar los datos, la media de estos fue de 12,8 Bq/m<sup>3</sup>.

Como conclusiones, los investigadores destacan, en primer lugar, la posibilidad de emplear el radón como medio para conocer la composición del material subterráneo, puesto que las diferentes concentraciones registradas permiten su correlación. Además, en segundo lugar, concluye que la concentración de radón presente en el agua subterránea posteriormente empleada para la agricultura y consumo humano es inferior a la establecida por la normativa europea (12,8 frente a los 100 Bq/m<sup>3</sup> estipulados).

Pese a que esa media no supone riesgo para la salud humana, los investigadores recomiendan la realización de más estudios en el sector para poder asegurar la fiabilidad de dicha agua y su consumo por la sociedad.

La concienciación sobre el peligro del radón se está convirtiendo en el día a día de la comunidad científica a nivel mundial. De hecho, en África, países como Nigeria también han querido estudiar los niveles de este dañino gas, por lo que realizaron un estudio en la Universidad de Ibadan (Nigeria) [33], para comprobar los niveles de radiación que contenía las diferentes fuentes de agua en la zona.

Para la realización del estudio se tomaron 46 muestras de agujeros hechos con excavadoras, pozos, agua de la propia universidad y agua embotellada. El agua de las perforaciones es directamente extraída con bombas, y sin tratamiento alguno, se guarda en depósitos para su futuro consumo, empleo en baños o labores de cocina.

Como resulta lógico pensar, las muestras del agua utilitaria de la universidad y las de agua embotellada sufren pequeños tratamientos de impurezas y descontaminación.

Los equipos empleados en este estudio también fueron los de AlphaGuard.

Cabe destacar que tanto en este estudio como en el de Gran Canaria, se empleó un sistema AguaKIT, que consiste en degasificar el radón y hacer circular el aire en circuito cerrado mediante un pequeño bombeo del aire (Ver Figura 2-6). Los niveles de radón se midieron tanto en el agua como en el aire.

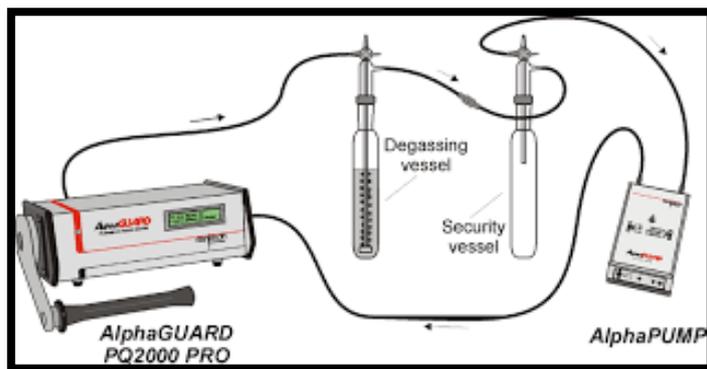


Figura 2-6 Sistema AguaKIT para medición de radón

Los resultados obtenidos tras las mediciones se muestran en la Tabla 2-1:

Fuente de agua	Media (Bq/m <sup>3</sup> )
Agua de perforación	14,63 ± 1,9
Agua de pozos	6,21 ± 0,68
Agua utilitaria de universidad	0,46 ± 0,12
Agua embotellada	0,91 ± 0,19

Tabla 2-1 Media de resultados obtenidos en Universidad de Nigeria

Debido a los resultados obtenidos, los investigadores determinan que la dosis anual efectiva de radón por inhalación es muy inferior a la obtenida por ingesta, por lo que deciden obviar las de inhalación. Por lo que respecta al agua, puede verse que las concentraciones de radón son muy bajas, lo que tampoco supone un riesgo para la salud.

Como conclusión a este apartado del radón en el agua, puede verse la clara implicación de la sociedad científica y su deseo de determinar si las provisiones de agua están contaminadas, si deben pasar por plantas de tratamiento de radiación debido al radón, o si por el contrario cumplen con la normativa y son seguras para su consumo.

Además, se considera que el número de estudios realizados sobre el radón en el agua es insuficiente, por lo que se debería seguir investigando en el mayor número de países posibles para controlar y erradicarlo a nivel mundial.

### 2.2.5 Predicción de terremotos mediante concentración de radón

Como es ampliamente conocido, la predicción de terremotos es un mero hecho probabilístico, pues existen diversos factores (y muchas combinaciones entre ellos) que provocan un terremoto. Algunas de estas técnicas de predicción son las siguientes:

- Comportamiento animal
- Anomalías electromagnéticas
- Patrones en eventos sísmicos
- Enturbiamiento de las aguas
- Presencia de radón

Con el fin de ejemplificar la relación radón-terremotos se hace referencia al siguiente suceso: Era la madrugada del 22 de mayo de 1997. Los habitantes de Triacastela (Lugo) y municipios de alrededores dormían cuando de repente la tierra comenzó a temblar, como nunca antes lo había hecho. La gente salía a las calles, asustada, preguntándose qué había pasado. Un terremoto de 5,1 grados en la escala de Richter había sacudido el área sin previo aviso, ¿o quizás sí avisó?

Días antes de este fatídico suceso (cabe destacar que hubo víctimas [34]), un equipo de investigadores españoles y japoneses ya predijo un posible seísmo debido a las variaciones de concentración de radón que contenía un manantial que se encontraba monitorizado con una estación geoquímica.

El estudio del radón como indicador de un posible terremoto comenzó tras la acertada predicción de algunos científicos (a nivel individual) de un seísmo en China, en 1975. Inicialmente se pensó que, efectivamente, la predicción era correcta y el radón podía considerarse como un indicador fiable. Sin embargo, en 2006, se demostró que dicha predicción fue errónea pese a que el terremoto realmente ocurrió.

Japón comenzó, tras la ‘acertada predicción’ en China, la creación de un protocolo que ayudara a prevenir dichas catástrofes. Científicos españoles continuaron estudios al respecto en Japón, es por ello por lo que cuando Lugo fue sacudido por el seísmo, esos científicos españoles se encontraban en estrecha colaboración con los japoneses.

Diversos sucesos similares al de China han ocurrido a lo largo de los últimos años en los que respecta a predicciones de seísmos en base a registros de concentración de radón. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

- Lima (Perú), 1981, cuya predicción resultó fallida.
- Prefectura de Hyogo (Japón), 1995, registrando variaciones de radón en aguas subterráneas hasta diez veces mayores que los valores iniciales. Un seísmo sacudiría Kobe nueve días después.
- Lugo (España), 1997, que como se ha visto, resultó acertada.
- L´Alquila (Italia), 2009, las autoridades desoyeron a un sismólogo italiano. Este, pese a que finalmente se equivocó en dos semanas con respecto a la realidad, estaba acertado en la llegada inminente de un terremoto. Finalmente, L´Alquila fue sacudida por un terremoto.

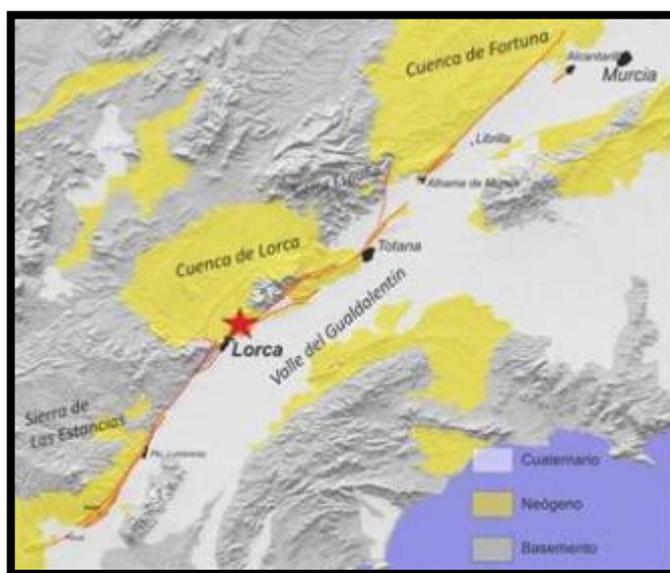
Parece obvio que el movimiento de las placas tectónicas conlleva una salida de gases hacia el exterior debido a los poros y fisuras que se crean.

La tendencia de los gases es salir de las cavidades donde quedan atrapados hacia el exterior, por lo que aprovechan cualquier oportunidad para escapar.

Cuando las placas friccionan en una falla, se ha podido medir el aumento de la concentración de gases como el radón como una de las posibles acciones que ocurren previamente a un terremoto tangible en la superficie.

A continuación, se muestran algunos estudios realizados en el campo de estudio.

En primer lugar, se explica el estudio llevado a cabo por la Universidad Autónoma de Barcelona: “*Estudio preliminar de los niveles de radón en el suelo en la zona de la falla de Alhama de Murcia*”. [35]



**Figura 2-7 Falla de Alhama de Murcia**

Este estudio está contextualizado en el proyecto SHAKE [36], desarrollado por el Instituto de Ciencias del Mar (ICM) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el año 2015, a bordo del barco oceanográfico *Sarmiento de Gamboa*.

El principal objetivo de este proyecto fue “*la caracterización in situ de diferentes sistemas de fallas localizados en el Mar de Alborán, mediante la obtención de sus parámetros sísmicos, detección de escarpes de falla en el fondo marino, y la identificación de rupturas o depósitos asociados a terremotos pasados (paleosismología marina), parámetros esenciales para la evaluación de los riesgos geológicos de la zona.*”

Durante la realización de este proyecto se llevó a cabo el estudio que se explica en este TFG sobre la falla de Alhama de Murcia, con dos objetivos fundamentales. El primero fue comprobar si los niveles de radón sufrían ‘variaciones espaciales’ en el suelo debido a la presencia de dicha falla (ello podía conllevar que el radón proviniera de una profundidad mayor). El segundo fue comprobar, mediante mediciones en lugares diferentes, si la actividad sísmica producía efectos en las variaciones de radón.

Durante la explicación del estudio, los autores mencionan los diferentes equipos de medición empleados en cada localización, siendo una de ellas más activa que la otra.

Tras analizar los resultados y mostrar en el estudio las gráficas obtenidas, los autores especifican que no encuentran una influencia clara entre la actividad sísmica y la concentración de radón.

Además, explican que dicha posible influencia podría haber sido enmascarada por otros factores. Con respecto a algunos parámetros atmosféricos, especifican que las temperaturas no han sido un factor influyente, mientras que sí se observa una relación de la concentración de radón con la presión atmosférica (cuando esta aumenta, la concentración de radón disminuye).

Como conclusión, determinan que no han registrado una clara dependencia entre la actividad sísmica y la concentración de radón, haciendo responsable de las variaciones de la concentración de radón a la presión atmosférica. Esta no dependencia, aclaran, ha podido deberse a que el período de estudio no ha sido en época de alta actividad sísmica, además de haberlo realizado con tan solo un equipo de medición en continuo.

Hay muchos científicos que han realizado diferentes estudios sobre la emanación del gas radón hacia el exterior debido al choque de placas que antes se mencionaba. Queda reflejado, tras la comparativa llevada a cabo, que el radón expulsado del subsuelo es uno de los posibles precursores que se pueden presenciar antes de una actividad sísmica potente.

Sin embargo, muchos estudios también afirman haber monitorizado dichos niveles de radón a lo largo del tiempo y haber comprobado que también se producen esos picos de presencia de radón en zonas de elevada actividad sísmica sin que un terremoto haya acaecido posteriormente.

Tras todo lo expuesto anteriormente podemos comprobar que el radón todavía no es considerado como un claro indicador de seísmos, aunque en ciertas ocasiones durante los últimos años se haya empleado como tal y sí haya resultado correcta la predicción llevada a cabo.

Los más escépticos defienden que este complejo campo aún debe estudiarse en profundidad para poder definir el radón como un indicador fiable de terremotos inminentes, mientras que los defensores del radón como dicho indicador ven una clara relación de su repentino aumento en la concentración con un seísmo.

Quizás en un futuro las nuevas tecnologías y avances científicos permitan resolver esta incógnita, pero mientras, ¿no se debería ser precavido y tomarlo como indicador para salvar cuantas más vidas mejor?

Tras este estudio comparativo de algunas fuentes, se ha considerado importante explicar la red sísmica de la que se dispone en España para la medición de terremotos.

Las avanzadas tecnologías de hoy en día permiten detectar, en la mayoría de los casos, un terremoto. Es algo que no se debe confundir con la predicción de un terremoto, pues estos sistemas son de alerta temprana, es decir, registran la actividad sísmica gracias a la recepción de sus ondas, lo que nos indica que el terremoto ya se ha producido.

En ese momento pasa a entrar en juego la distancia al epicentro, por lo que si la información se interpreta rápido se puede llegar a tener hasta varios minutos antes de la llegada de los primeros temblores. Una vez se obtiene esa información, hay que compartirla, y en España se dispone de un conjunto de estaciones repartidas por todo el territorio (ver Figura 2-8) que comparte dicha información en tiempo real [37].

La rápida transferencia de datos de una estación a otra permite a la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCE) disponer de la hora, localización, magnitud y profundidad del terremoto, por lo que ya se podría contactar con las autoridades para avisar a la población y las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado.

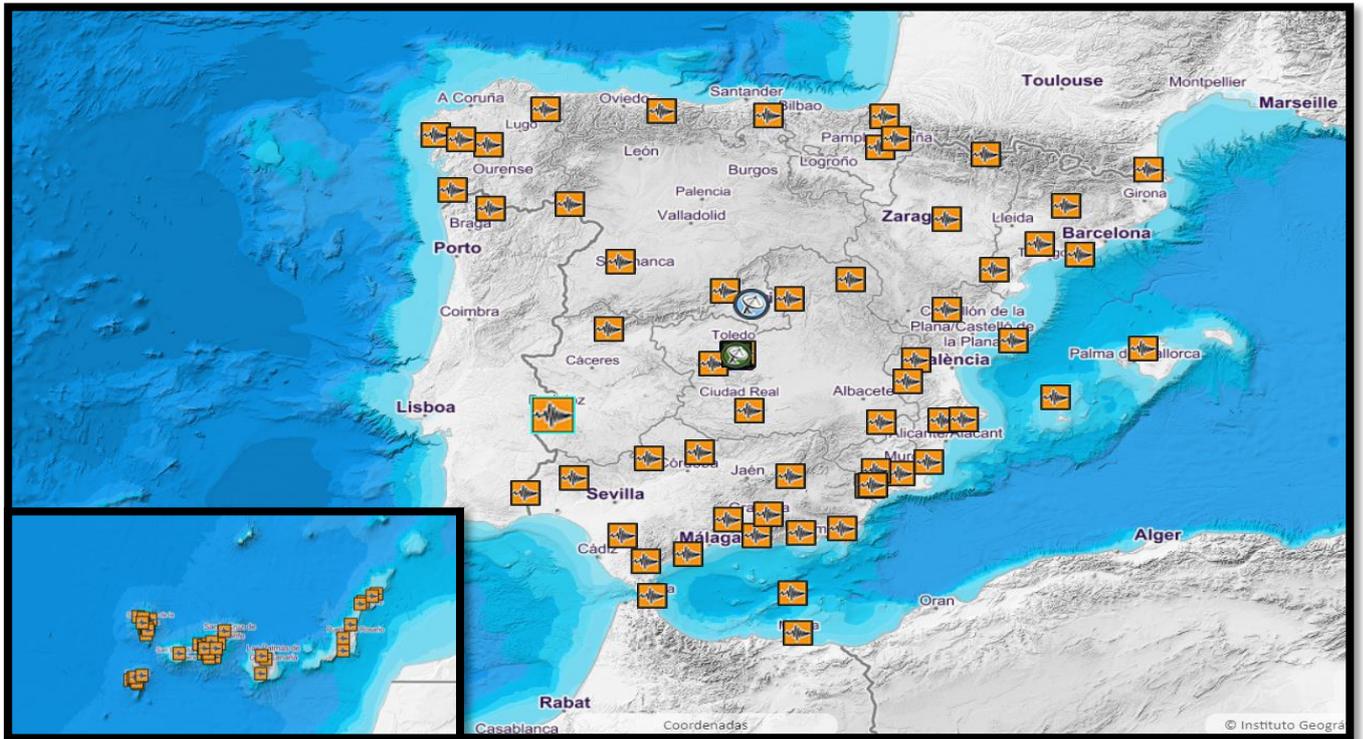


Figura 2-8 Estaciones españolas de compartición de información en tiempo real – Fuente: [37]

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Descripción del edificio del Centro Universitario de la Defensa

El edificio sujeto a estudio en el presente TFG es el del Centro Universitario de la Defensa (CUD), señalado en la Figura 3-1:



Figura 3-1 Ubicación del edificio del CUD en la ENM – Fuente: Google Earth

El edificio (Figura 3-1), situado al este de la ENM, fue edificado durante los años de construcción de la ENM, entre 1939 y 1943. En sus comienzos, el edificio estaba destinado a Aulas Generales, Artillería y Comunicaciones, sin embargo, tras unas obras realizadas entre abril de 2009 y marzo de 2010, se modernizó la estructura y se construyeron más aulas y despachos.



**Figura 3-2 Edificio del CUD visto desde la explanada de la ENM**

Hoy en día, este edificio (Figura 3-2), está destinado al CUD y tiene despachos que dan tanto a la cara norte (explanada) como a la cara sur (Patio de Aulas). Consta de dos plantas bien diferenciadas en altura: la planta baja y la primera planta.

Además, dispone de una habitación en una altura intermedia (entreplantas), que contiene un Office (pequeña sala de estar de descanso) para el profesorado, y que también será estudiada.

Por un lado, en la planta baja (Figura 3-3), se encuentran diferentes seminarios (en los que se imparten clases a los alumnos), despachos de profesores y la sala de grados.

Por otro lado, en la primera planta (Figura 3-4), se localizan la secretaría del CUD, la secretaría económica, una sala de reuniones, una sala de juntas y un gran número de despachos de profesores.

Como puede resultar obvio imaginar, ambas plantas son muy frecuentadas tanto por los profesores como por los alumnos, por lo que resulta necesario conocer la concentración de radón en este edificio para poder determinar si existe riesgo potencial de problemas de salud debido a la exposición a este gas noble.

Esta concentración de radón se medirá colocando cinco dispositivos y cinco sensores en localizaciones diferentes, tanto en orientación N-S y E-W, como en diferentes alturas.

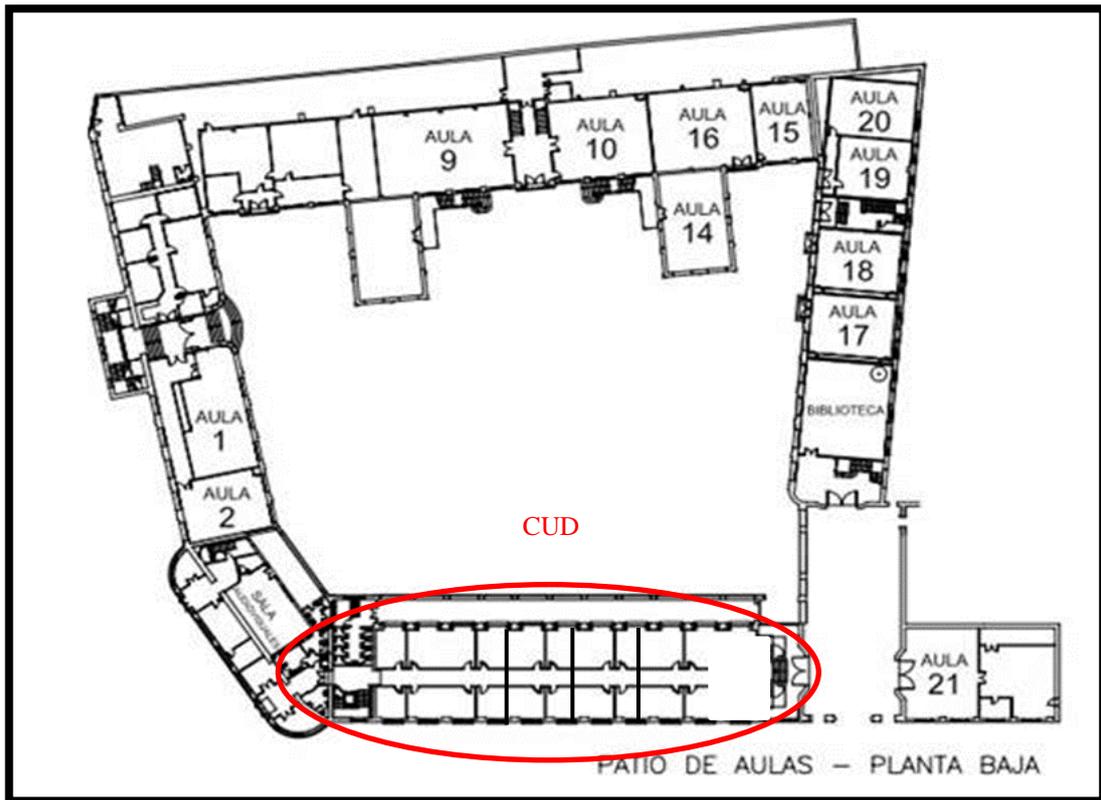


Figura 3-3 Situación del CUD en el Patio de Aulas (Planta baja)

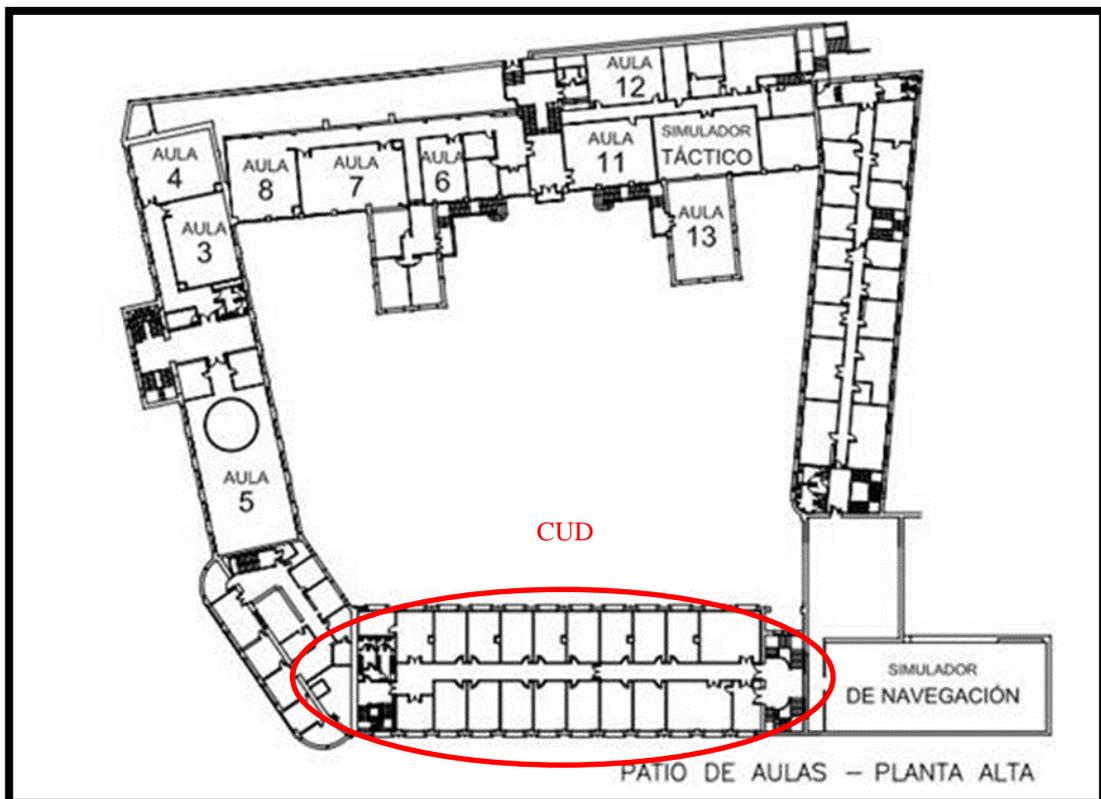


Figura 3-4 Situación del CUD en el Patio de Aulas (Planta alta)

## 3.2 Equipos de medición

### 3.2.1 Equipos

Los equipos empleados en este TFG son los mismos que se compraron el año pasado para la misma finalidad.

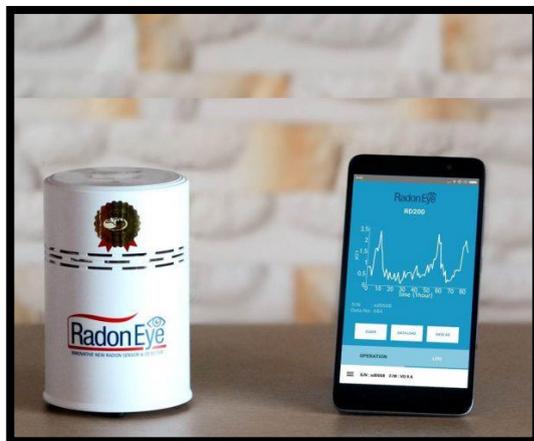


Figura 3-5 Equipo de medición de radón y aplicación de teléfono móvil

El equipo en concreto es el “RadonEye RD200” del fabricante RadonEye. Cabe destacar que el valor máximo que el equipo es capaz de detectar es de  $3696 \text{ Bq/m}^3$  y tiene una tasa de precisión del 10%. Se han usado cinco de estos dispositivos a lo largo de las diferentes fases, numerados con pegatinas: 37, 38, 39, 40 y 41.

El funcionamiento de estos equipos consiste en tomar medidas de concentración de radón cada diez minutos, proporcionando un valor medio cada hora. Cuando se desea obtener dichos valores, simplemente hay que conectarse a ellos con un teléfono móvil (smartphone) vía Bluetooth desde la aplicación RadonEye y descargarlos o compartirlos a un correo.

### 3.2.2 Sensores

Simultáneamente a los “RadonEye RD200”, se han empleado unos sensores de temperatura y humedad que han registrado los valores en intervalos de diez minutos (Ver ficha técnica [38]).



Figura 3-6 Sensor de Tª y humedad con correspondiente USB para transferencia de datos

Una vez se desea transferir esos datos registrados desde el sensor hasta el ordenador, se deberá emplear el programa One Wire Viewer, donde, tras crear las diferentes misiones de medición de datos, se puede descargar un archivo CSV con todos ellos.

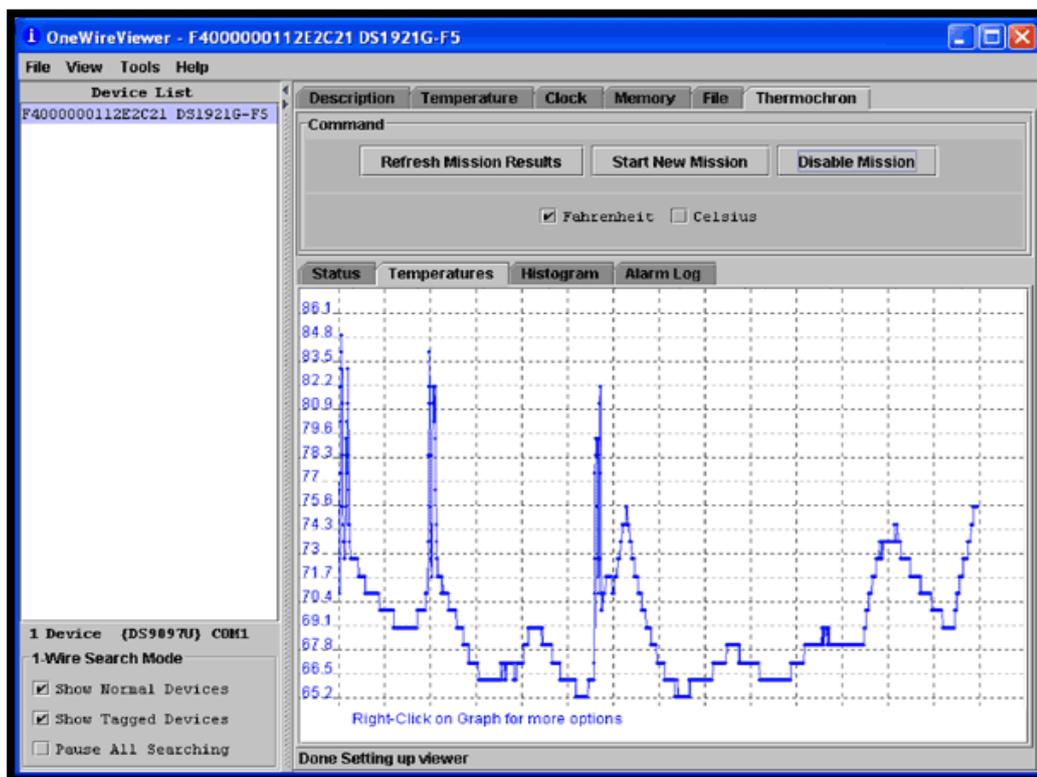


Figura 3-7 Vista del programa OneWireViewer

Estos sensores son los “Datalogger de Temperatura y Humedad Hygrochron”. Gracias a su funcionamiento se ha podido recabar más información para correlacionar la concentración de radón con estos parámetros y ver las posibles dependencias entre ellos.

Como se comenta en este apartado, se ha decidido llevar a cabo el estudio de concentración de radón con respecto a diferentes parámetros medidos con sensores (temperatura y humedad interiores).

Sin embargo, debido a la gran influencia de algunos agentes atmosféricos y meteorológicos, se ha descargado de la página web de MeteoGalicia [39] el registro correspondiente a los siguientes parámetros: temperatura, humedad y presión de la estación de Lourizán (la más cercana a Marín), así como precipitaciones, viento y su intensidad y dirección.

### 3.3 Descripción de la toma de muestras

En el Apéndice C del CTE se explican las tres fases que componen el procedimiento para determinar la media anual de concentración de radón: muestreo, medición y estimación del promedio anual de concentración de radón.

Previamente a la exposición de las diferentes fases de estudio realizadas, se explicarán las condiciones y medidas que establece el CTE en los puntos que afectan directamente a la fase de medición. En el punto 3.2 habla sobre la instalación y puesta en marcha de los equipos para comenzar las mediciones de concentración de radón, especificando los criterios necesarios para ello:

- Altura entre 50 y 180 cm del suelo, a más de 30 cm de paredes y 10 cm de otros objetos.
- Los equipos de medición no se dejarán en lugares pequeños cerrados, véase armarios o cajones.
- Los equipos tampoco se encontrarán en lugares con mucha corriente (cerca de ventanas o ventiladores) que impidan la eficiente toma de datos. Además, no se expondrán directamente al sol o cualquier fuente de calor.
- En los casos que haya una humedad superior al 70%, los equipos se cubrirán por una membrana que los proteja de esta.

De estas medidas, todas se han llevado a cabo de manera estricta excepto en alguna altura determinada que, por necesidades en las tomas de corriente, no se ha podido conseguir y se han dejado midiendo a 10 cm de altura.

En el punto 3.3 se especifica que los equipos deberán estar midiendo durante al menos dos meses en condiciones y hábitos de ocupación habitual. En caso de ser edificios no habitados, se mantendrán cerrados, y si poseyeran medidas de protección ya instaladas, estas deberán encontrarse en regular funcionamiento.

Por lo que respecta a estas medidas, únicamente se ha incumplido el período mínimo de medición debido a necesidades temporales del TFG para que el alumno pudiera ejecutar diversas fases de estudio. Los tiempos de medición han sido como sigue:

- 1ª fase: 12 días.
- 2ª fase: 22 días.
- 3ª fase: 11 días.

Por último, en el punto 3.4 del citado Apéndice C, se enumeran los datos que debe incluir el informe correspondiente al estudio, desde fechas del proceso y el estudio, circunstancias meterológicas y ambientales, hasta la firma de las personas responsables del informe realizado.

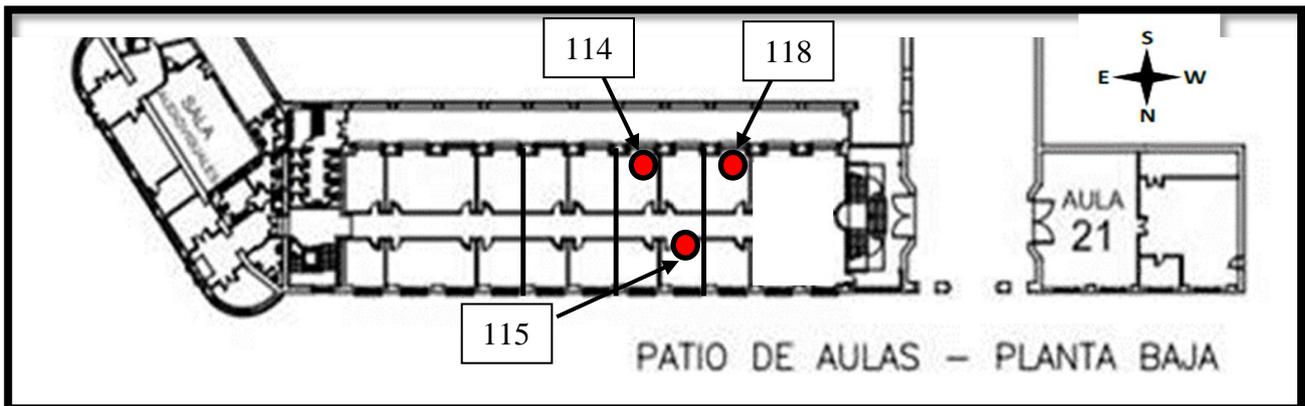
En lo referente a estas medidas, cabe destacar que algunas de ellas no se han realizado por condicionantes del estudio, al tratarse de un TFG y no de una medición normativizada.

### 3.3.1 Fase 1 (05 de diciembre hasta 17 de diciembre)

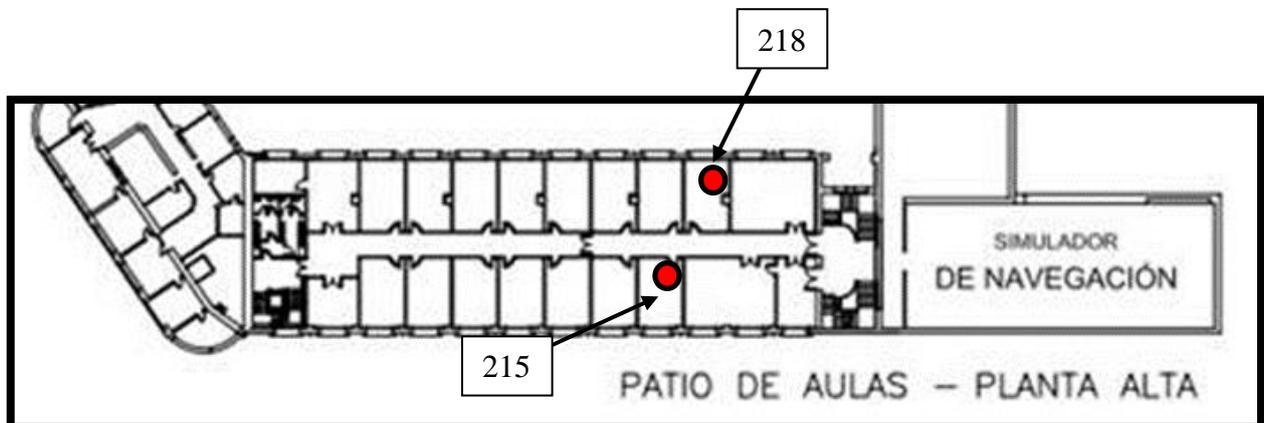
Esta primera fase comenzó el 5 de diciembre de 2019 y finalizó el 17 de diciembre de 2019. Tuvo lugar en ambas plantas del edificio (en la misma vertical) para comprobar la disminución de concentración de radón a medida que aumenta la altura, disponiendo los cinco medidores de radón junto a sus correspondientes sensores como se muestra en la Tabla 3-1.

Nº Equipo	Localización	Planta	Altura	Medición de Tª y Humedad interiores
37	Despacho 118	Baja (S)	1 m	No
38	Despacho 114	Baja (S)	1 m	No
39	Despacho 115	Baja (N)	1 m	Sí
40	Despacho 218	Primera (S)	1 m	Sí
41	Despacho 215	Primera (N)	10 cm	Sí

**Tabla 3-1 Reparto de equipos y características de la Fase 1**



**Figura 3-8 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 1)**



**Figura 3-9 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 1)**

De estos cinco despachos, únicamente el 118 se encuentra en desuso, y por tanto, nadie lo frecuenta como los otros. Pese a ello, y para el correcto estudio de la concentración de radón, sí que se han realizado dichas medidas durante períodos en los que se ha abierto la ventana expresamente para comprobar el comportamiento de dichos valores.

### 3.3.2 Fase 2 (18 de diciembre hasta 09 de enero)

La segunda fase de toma de muestras del TFG comenzó el 18 de diciembre de 2019, cambiando la localización de algunos medidores y sensores tras haber extraído los datos recopilados de la primera fase.

Con la intención de obtener unas muestras en una época del año fría y con humedad abundante, se dejaron los dispositivos midiendo durante el período vacacional, acabando la toma de datos de esta fase el día 9 de enero de 2020.

Cabe destacar que dos de los equipos de la planta baja se dejaron midiendo en los mismos despachos (para poder hacer un estudio más pormenorizado de los mismos y usarlos como referencia) y el tercero se cambió al Seminario 1. Además, uno de los equipos de la planta alta se bajó a la Sala de Grados para medir en una misma planta en diferentes puntos N-S y E-W. Las localizaciones de la segunda fase fueron las siguientes (Tabla 3-2):

Nº Equipo	Localización	Planta	Altura	Medición de Tª y Humedad interiores
37	Despacho 118	Baja (S)	1 m	No
38	Despacho 114	Baja (S)	1 m	Sí
39	Seminario 1	Baja (N)	1 m	Sólo T
40	Sala de grados	Baja (S)	1 m	Sólo T
41	Despacho 217	Primera (N)	50 cm	Sólo T

Tabla 3-2 Reparto de equipos y características de la Fase 2

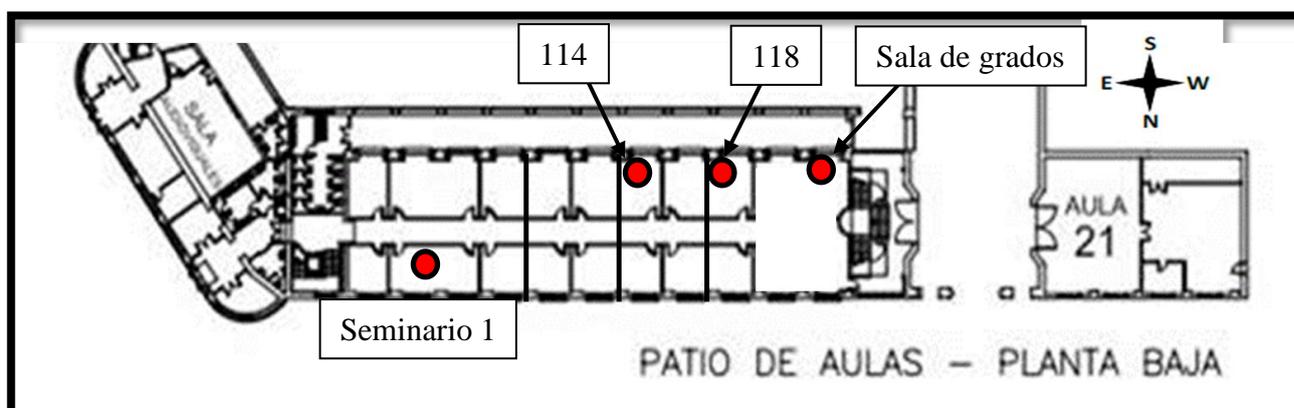
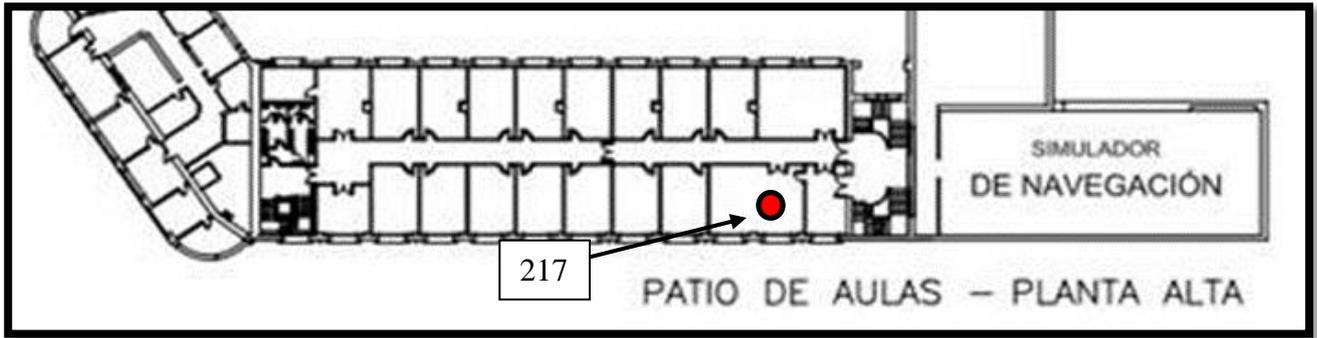


Figura 3-10 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 2)



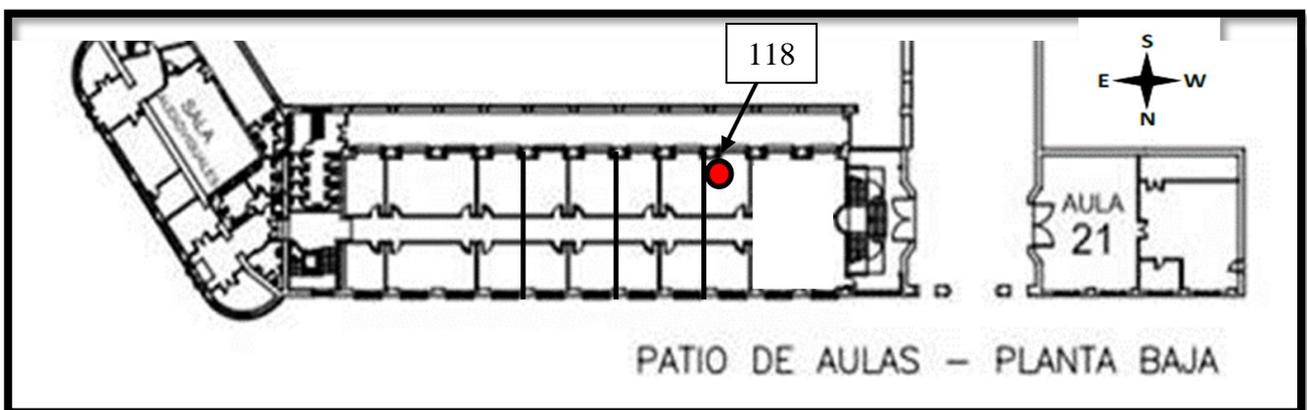
**Figura 3-11 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 2)**

### 3.3.3 Fase 3 (10 de enero hasta 21 de enero)

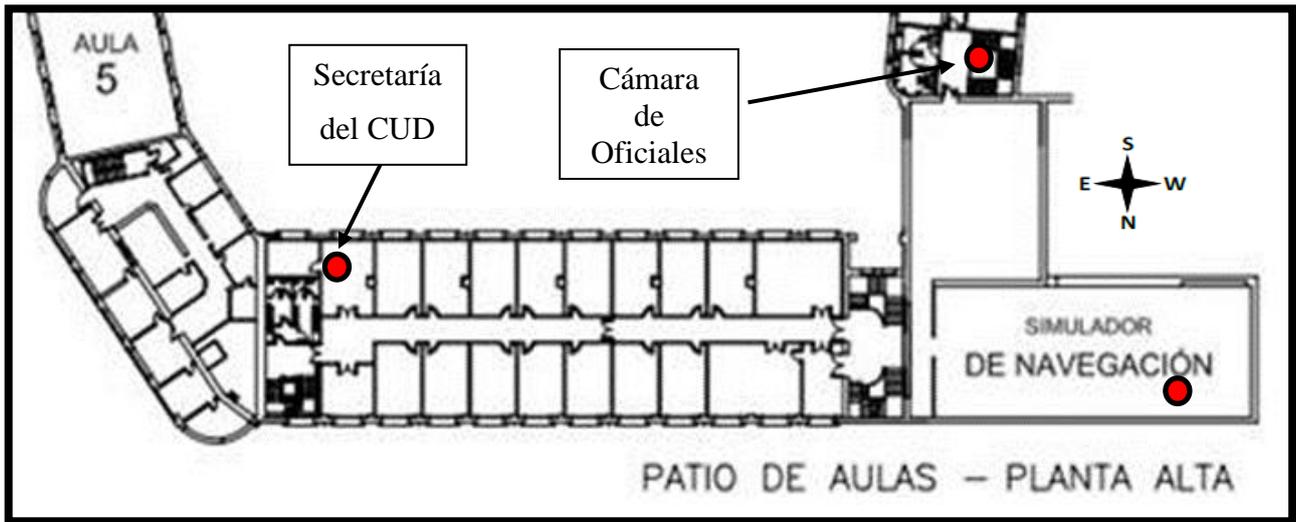
La tercera fase de estudio comenzó el 10 de enero de 2020 y finalizó el 21 de enero de 2020. En esta fase se decidió dejar únicamente en la planta baja el medidor del despacho 118 para continuar con su monitorización específica. Por otro lado, los otros cuatro medidores fueron cambiados, uno al entreplantas y los otros tres a la planta alta. Los medidores quedaron distribuidos de la siguiente manera (Tabla 3-3):

Nº Equipo	Localización	Planta	Altura	Medición de Tª y Humedad interiores
37	Despacho 118	Baja (S)	1 m	Sí
38	Office CUD	Entreplantas (S)	1,5 m	Sólo T
39	SIMNAV	Primera (N)	1 m	No
40	Cámara Oficiales	Primera (S)	20 cm	Sí
41	Secretaría CUD	Primera (S)	1 m	No

**Tabla 3-3 Reparto de equipos y características de la Fase 3**



**Figura 3-12 Localización de los equipos en la planta baja (Fase 3)**



**Figura 3-13 Localización de los equipos en la planta alta (Fase 3)**

Como puede observarse, hay dos medidores que no se encuentran exactamente en el CUD (Simulador de Navegación y Cámara de Oficiales), sin embargo, se valoró positivamente el ponerlos en dichas nuevas localizaciones debido a que son lugares muy frecuentados tanto por personal civil del CUD como militar de la ENM.

Además, se encuentran a escasos metros del pasillo del CUD, por lo que sus mediciones también pueden ayudar a entender mejor el comportamiento del radón en este edificio.

Por último, cabe destacar que la localización del Office del CUD no queda explícita debido a que no aparece en los planos conseguidos para mostrarlo en esta memoria de TFG.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados del edificio del Centro Universitario de la Defensa

A lo largo de este apartado se mostrarán todos los resultados correspondientes a las fases de estudio de concentración de radón.

Para la realización de esta tarea, se crearon tres documentos Excel, uno para cada fase. Cada documento cuenta con una hoja de datos generales de la fase, cinco hojas que corresponden a cada medidor, y diferentes hojas de empleos varios como combinación de gráficas resultantes de cada medidor.

A continuación, se muestran los subapartados de las diferentes fases de estudio. En cada uno se discutirán los diferentes resultados y se compararán por separado en función del agente meteorológico escogido por tener una mayor influencia. Cabe destacar que se estudiarán todos en la Fase 1, dejando en las Fases 2 y 3 solamente los que tengan una influencia notable. El resto de las gráficas de las Fases 2 y 3 pueden encontrarse en el Anexo II: Gráficas de las diferentes fases por lugar de estudio.

#### 4.1.1 Fase 1 (05 de diciembre hasta 17 de diciembre)

A continuación, se muestran las medias de concentración de radón obtenidas durante toda la fase en los diferentes despachos (Tabla 4-1):

Localización	Concentración media de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Despacho 118	1884
Despacho 114	362
Despacho 115	442
Despacho 218	101
Despacho 215	134

**Tabla 4-1 Concentración media de radón en la Fase 1**

Las concentraciones de radón obtenidas durante la primera fase despiertan gran preocupación en el despacho 118 solamente con ver su media, que supera lo estipulado por el CTE y la Directiva europea ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) en más de 6 veces.

Sin embargo, resulta aún más preocupante tras observar la evolución a lo largo del tiempo, llegando a picos máximos de  $3696 \text{ Bq/m}^3$  (límite superior del equipo, por lo que realmente puede ser mucho más) y a niveles de más de  $2000 \text{ Bq/m}^3$  sostenidos durante 96 horas seguidas (Figura 4-1).

Estos niveles tan elevados y constantes tienen lugar a lo largo del fin de semana del 6 al 8 de diciembre, en el que no hay actividad alguna ni tampoco ventilación que consiga disminuir esa preocupante concentración. Como se observa claramente en la Figura 4-1, el lunes por la mañana (horas 108-157) se abre la ventana y la concentración disminuye drásticamente. Lo mismo ocurre al abrir la ventana al cabo de 283 horas desde el inicio de la medida.

Para comprobar la evolución de la concentración de radón a lo largo de toda la fase, y poder tener una comparativa entre todos los despachos, se muestra la siguiente gráfica:

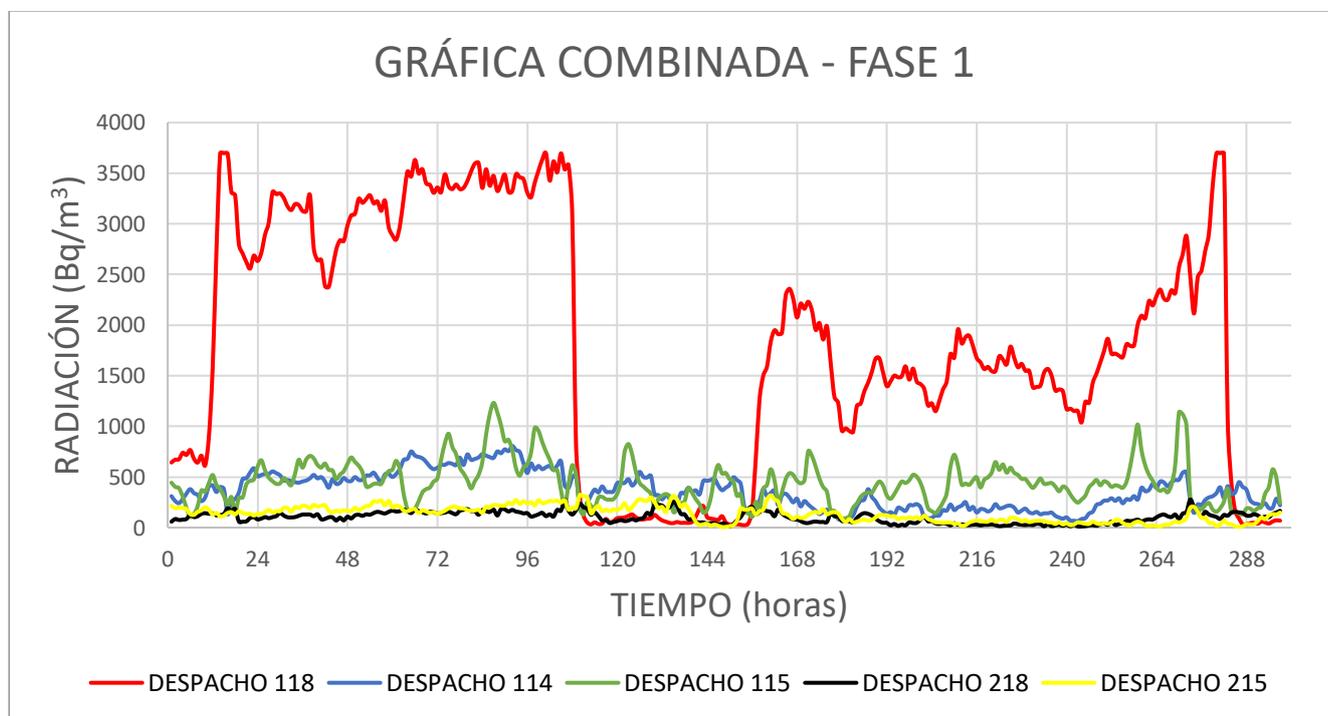


Figura 4-1 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 1)

Sin embargo, como ya se ha visto en la Tabla 4-1 de concentraciones medias, no solamente el despacho 118 supera el límite, tal y como se ve con mayor claridad en la Figura 4-2.

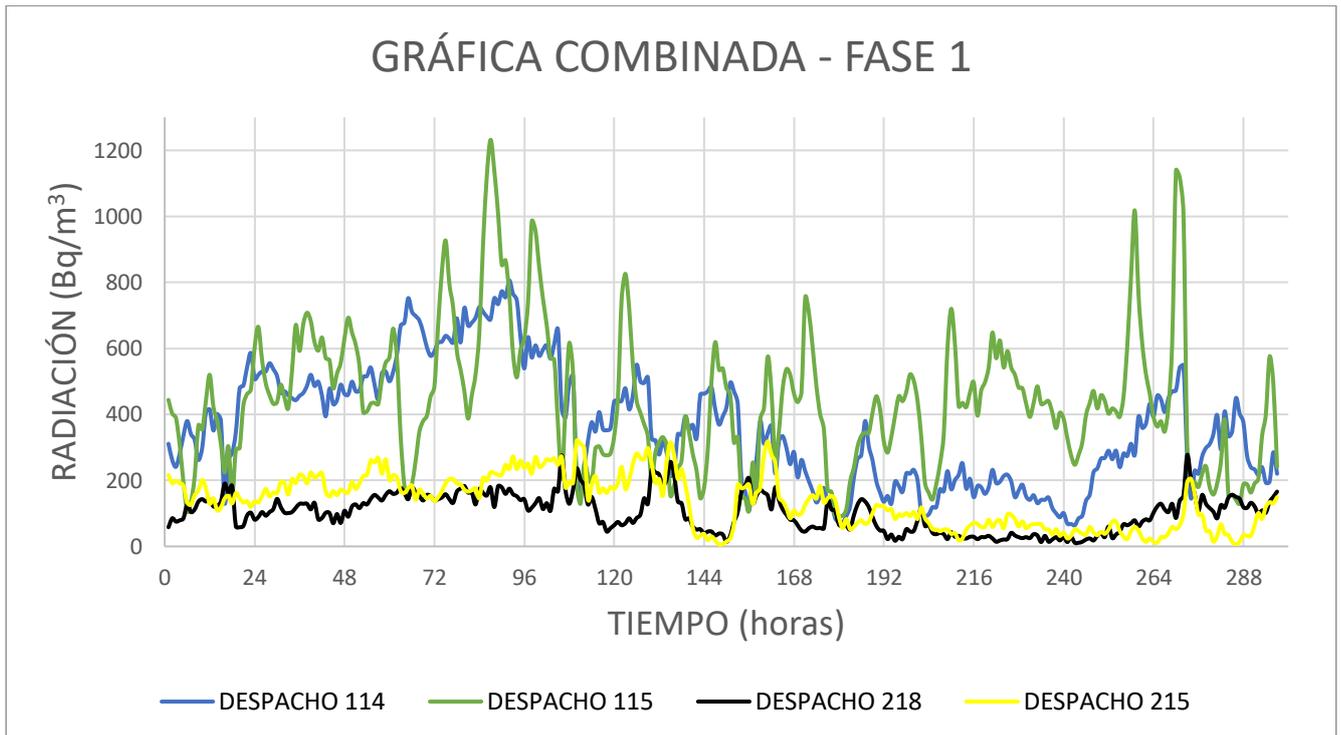


Figura 4-2 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 1)

Son los despachos de la planta baja (114 y 115) los que también tienen una media superior a la establecida por el CTE. Sin embargo, estos valores fluctúan con mayor frecuencia a medida que pasan las horas.

Estos dos despachos se encuentran a escasos diez metros del 118, por lo que puede sugerir que bajo la zona de ese despacho exista algún tipo de fuga o brecha en el subsuelo (falta de hermeticidad que facilita aún más el ascenso del radón).

Por otro lado, se puede ver que la evolución de la concentración de radón en los despachos de la planta alta es muy similar, mostrando un comportamiento prácticamente idéntico (Figura 4-3). Además, como era de esperar, las concentraciones en la planta baja son mayores que en la planta alta.



Figura 4-3 Gráfica de concentración de radón de los despachos 218 y 215

De manera paralela, se han estudiado los niveles medios de concentración de radón (Tabla 4-2) durante la jornada laboral estándar de los profesores del CUD (establecida de 08:30 a 18:30), para conocer en qué condiciones trabajan y comprobar si dicha media supera el límite establecido por el CTE durante su estancia en el despacho del CUD, o por la Instrucción IS-33 del CSN, que establecía para la jornada laboral los 600 Bq/m<sup>3</sup> antes mencionados.

Localización	Media de concentración de 08:30 a 18:30 (Bq/m <sup>3</sup> )
Despacho 118	1935
Despacho 114	342
Despacho 115	404
Despacho 218	121
Despacho 215	149

Tabla 4-2 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 1)

Se comprueba de esta manera que durante su jornada laboral, el personal que frecuenta los despachos 114 y 115 están sometidos a niveles de radiación superiores a lo estipulado por normativa, pero por debajo de lo que establece el CSN. Sin embargo, sí superan los 300 Bq/m<sup>3</sup> establecidos para realizar medidas correctoras.

Debe recordarse que actualmente el despacho 118 se encuentra vacío y sólo recibe visitas rápidas de las personas que realizan la ventilación para el correcto estudio, es decir, el alumno que realiza el TFG o sus tutoras.

Durante la fase de estudio se solicitó al profesorado que llevara, en la medida de lo posible, un registro de los períodos en los que las ventanas se encontraban abiertas o la calefacción encendida. Esta colaboración ha ayudado en el procesado de datos para su futura extracción de conclusiones.

❖ Influencia de los parámetros meteorológicos en concentración de radón

A continuación, se realizará un contraste de resultados en agentes meteorológicos para estudiar su influencia en la concentración de radón.

➤ Viento

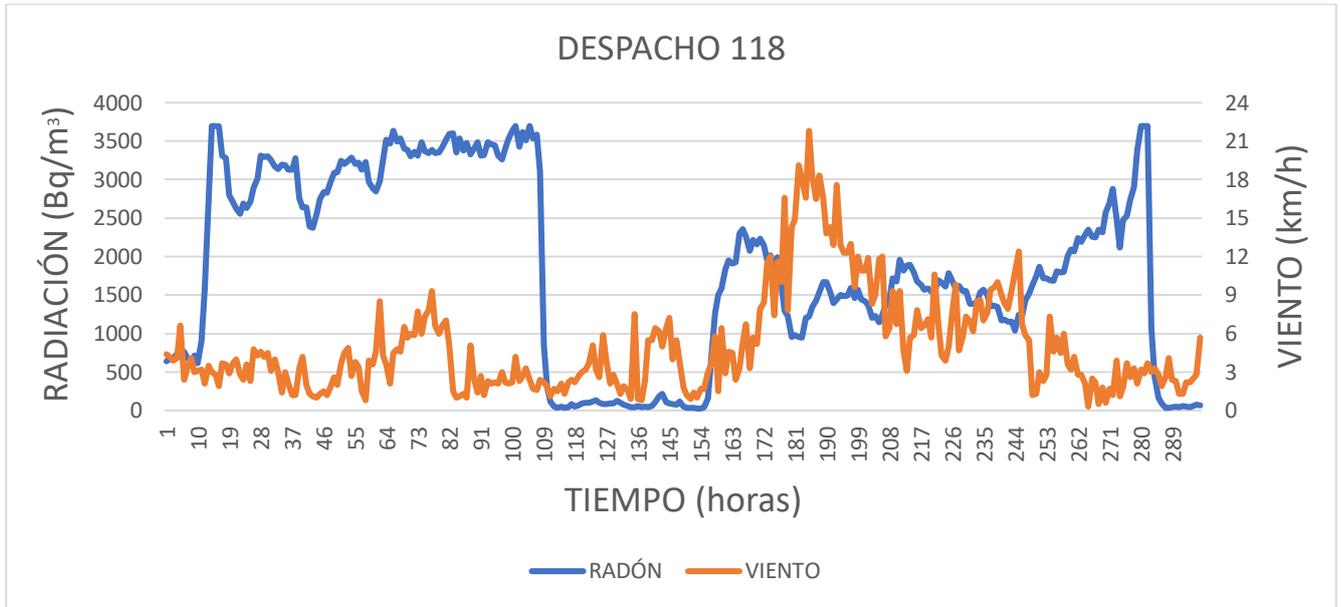


Figura 4-4 Concentración de radón frente al viento en despacho 118 (Fase 1)

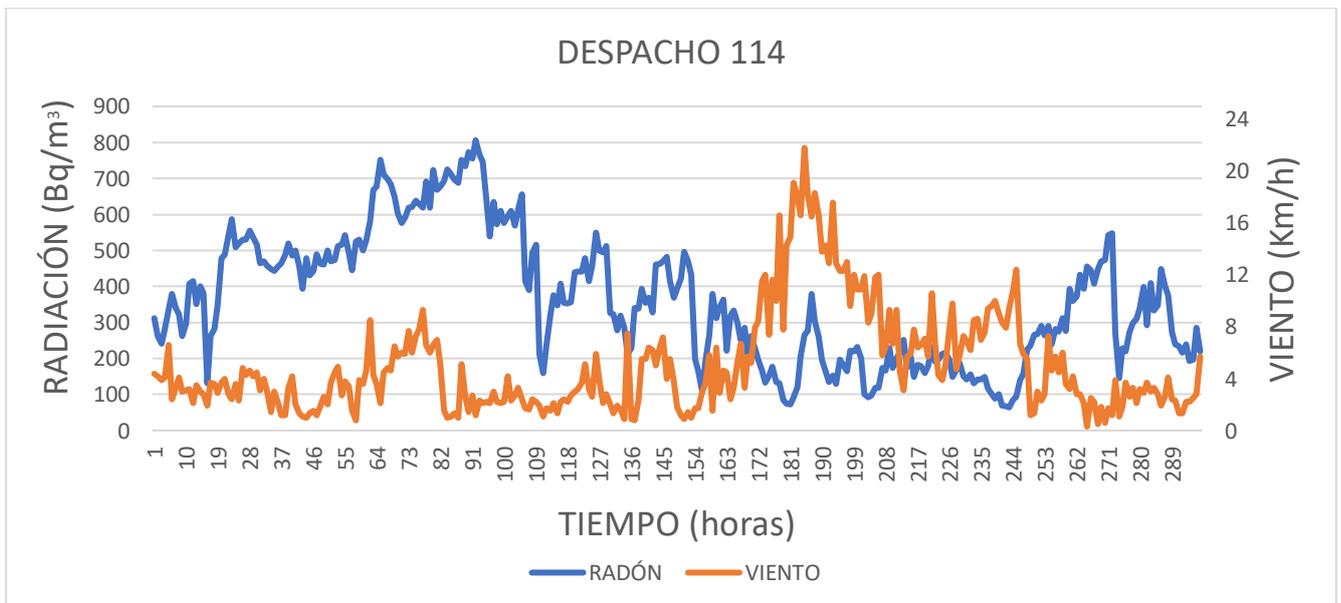


Figura 4-5 Concentración de radón frente al viento en despacho 114 (Fase 1)

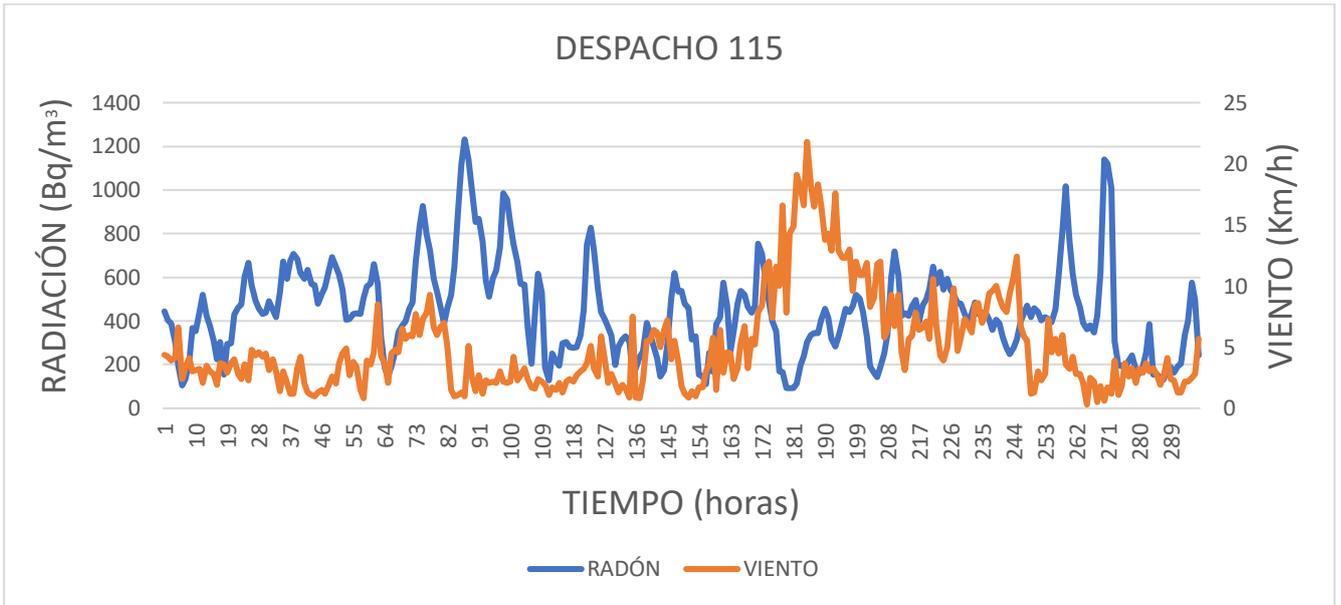


Figura 4-6 Concentración de radón frente al viento en despacho 115 (Fase 1)

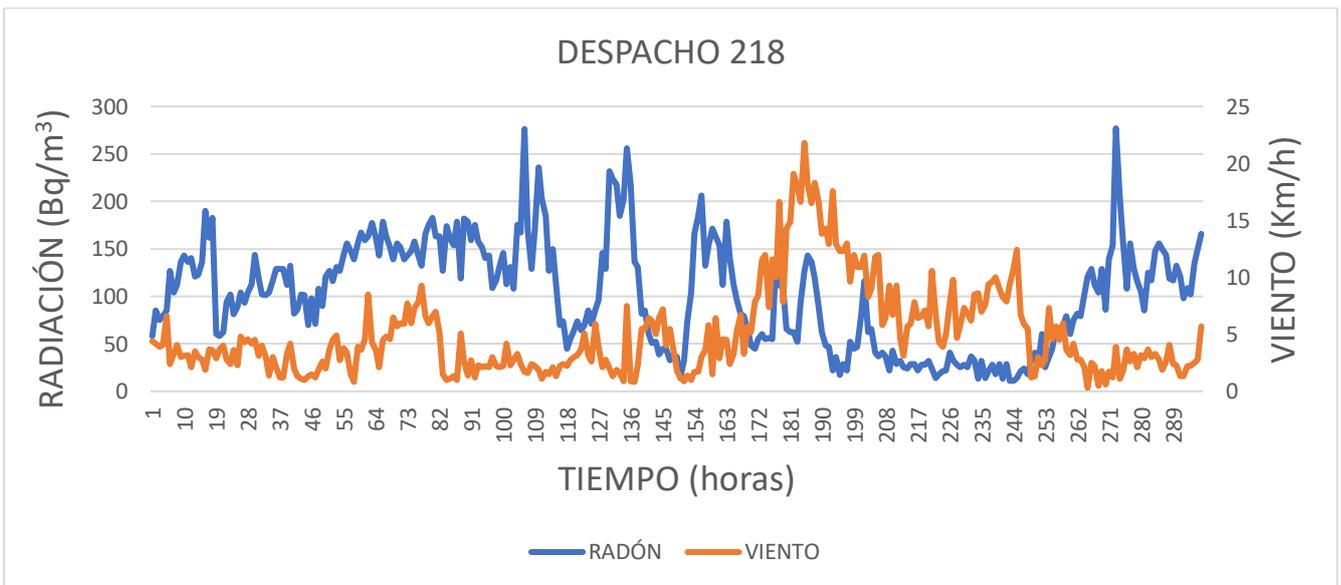


Figura 4-7 Concentración de radón frente al viento en despacho 218 (Fase 1)

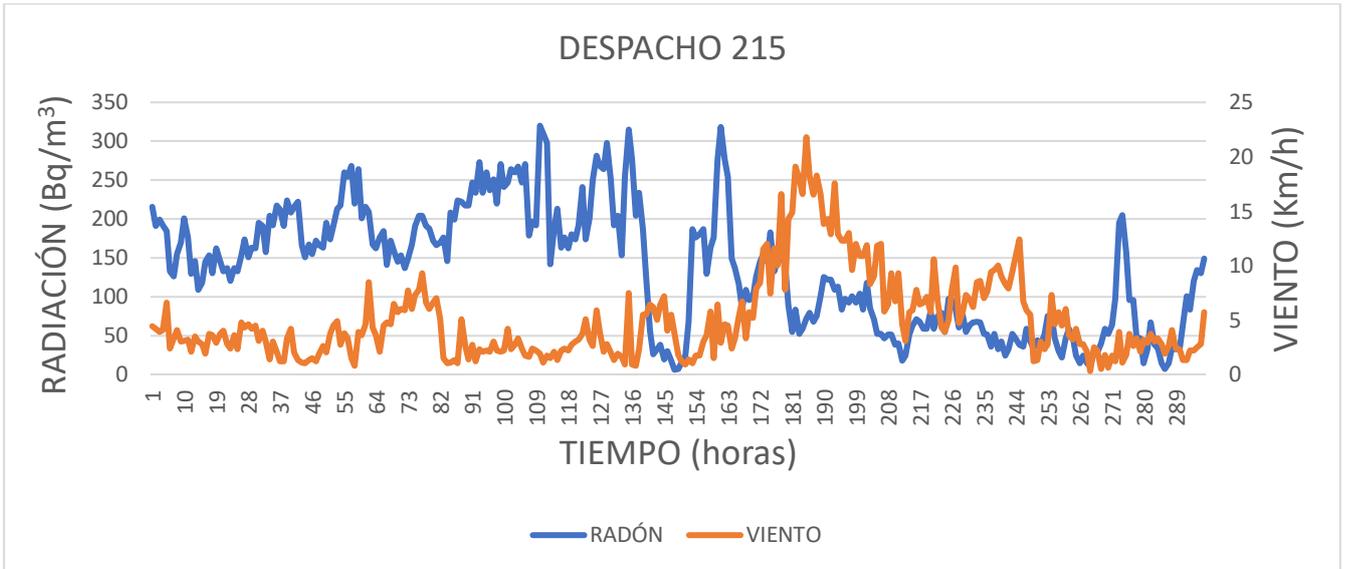


Figura 4-8 Concentración de radón frente al viento en despacho 215 (Fase 1)

Como es obvio a la vista de las gráficas, la concentración de radón disminuye a medida que aumenta la intensidad del viento. Conforme la masa de aire exterior remueve la atmósfera cercana a los despachos, el radón se diluye aún más y pierde concentración dentro de los despachos.

➤ Lluvia

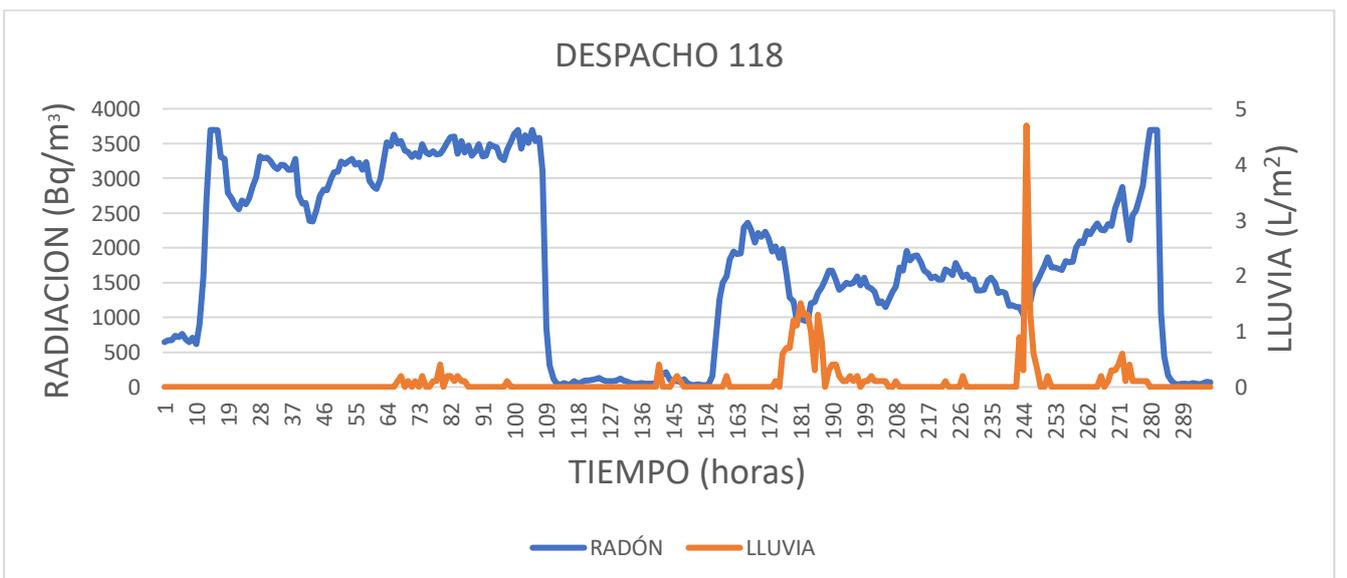


Figura 4-9 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 118 (Fase 1)



Figura 4-10 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 114 (Fase 1)

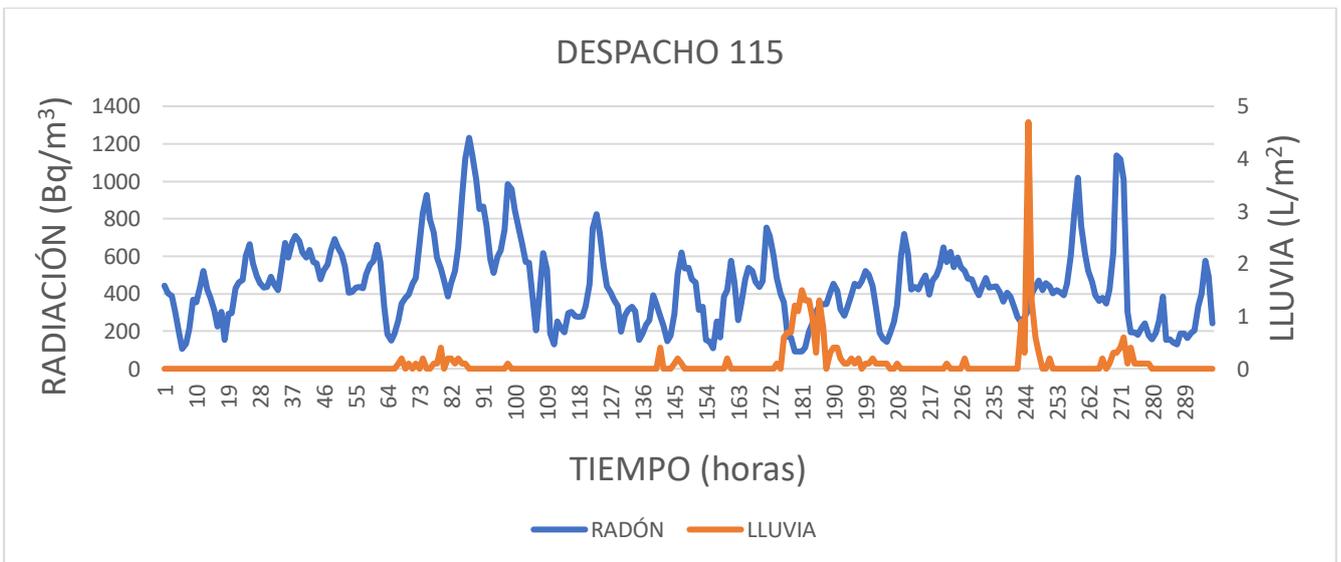


Figura 4-11 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 115 (Fase 1)

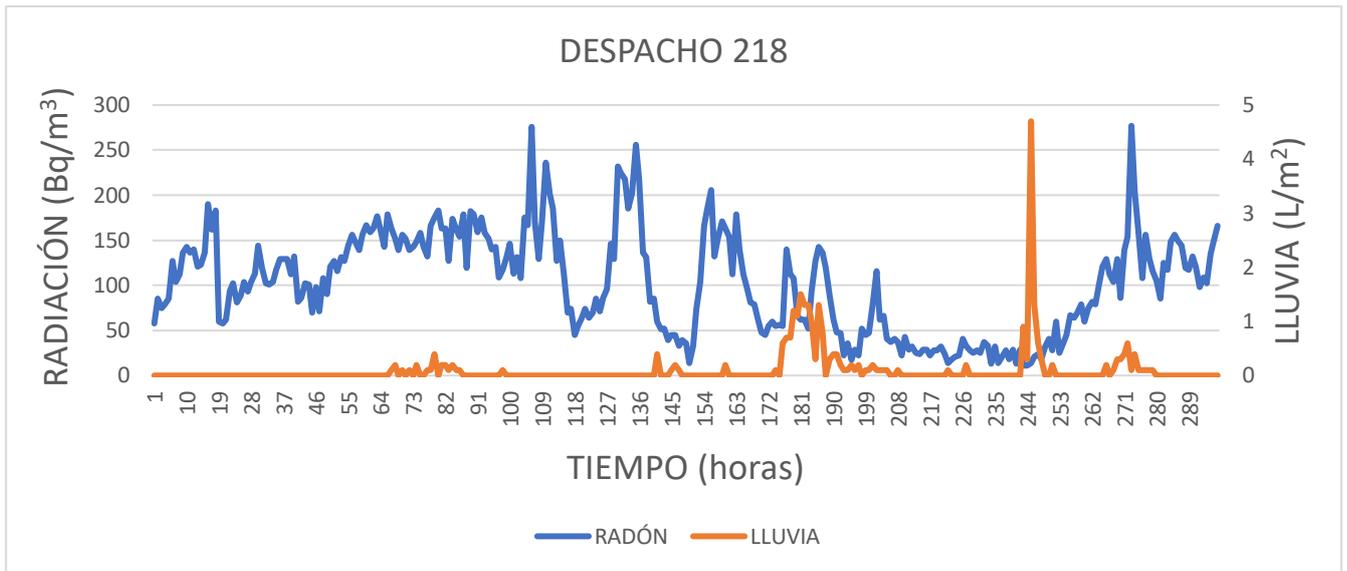


Figura 4-12 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 218 (Fase 1)

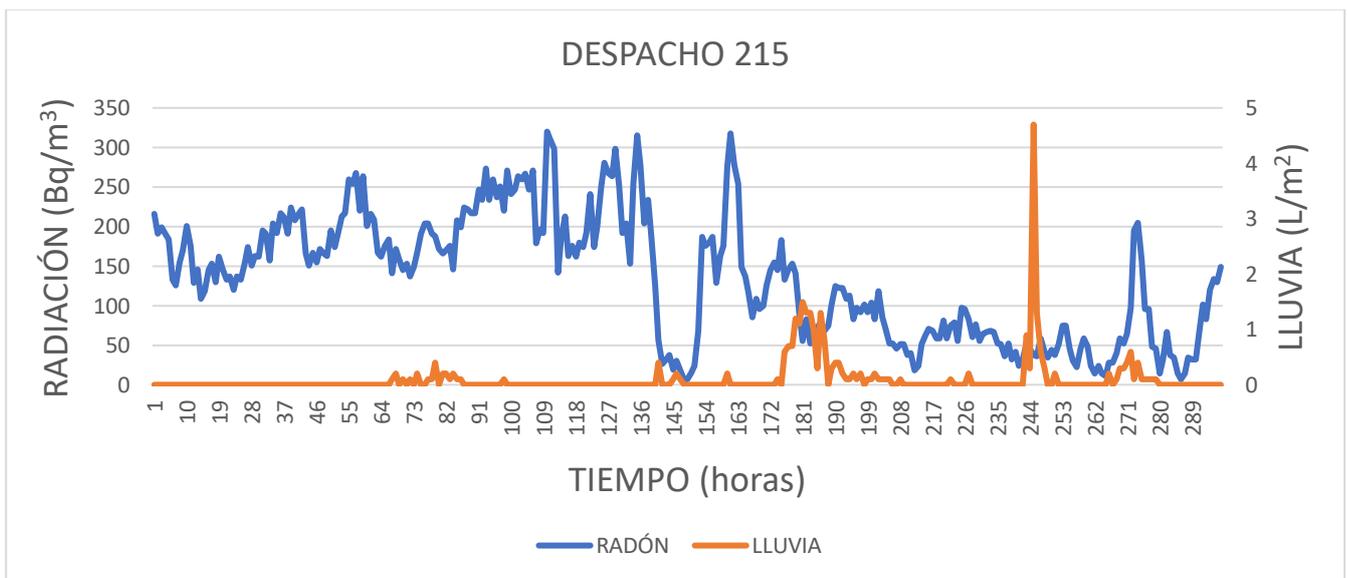


Figura 4-13 Concentración de radón frente a la lluvia en despacho 215 (Fase 1)

Como se puede apreciar, los días en los que más llovió, se observa un pequeño descenso en la concentración de radón. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, según el CSN [21], las precipitaciones favorecen el ascenso de concentración de radón, por lo que estos notables descensos se le atribuyen al viento, que presentó altas velocidades durante los picos de lluvia (172-190 horas y en torno a las 244 horas).

Es decir, no se aprecia especial relevancia en la lluvia frente a la acción del viento.

➤ Temperatura exterior

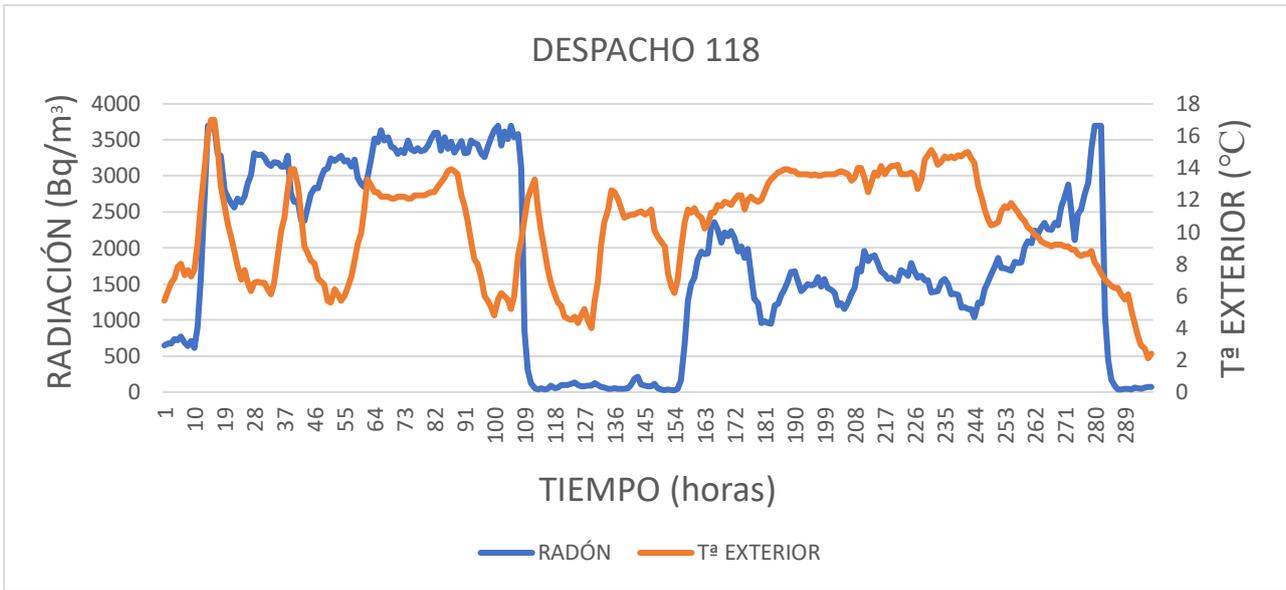


Figura 4-14 Concentración de radón frente a Tª exterior en despacho 118 (Fase 1)

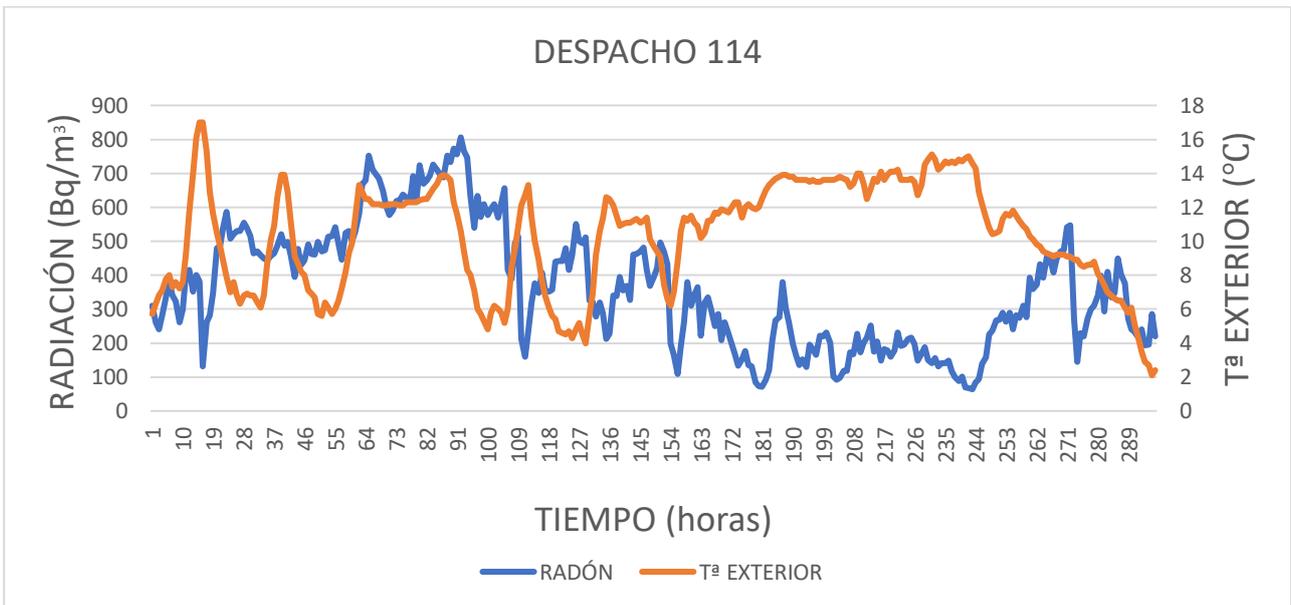


Figura 4-15 Concentración de radón frente a Tª exterior en despacho 114 (Fase 1)

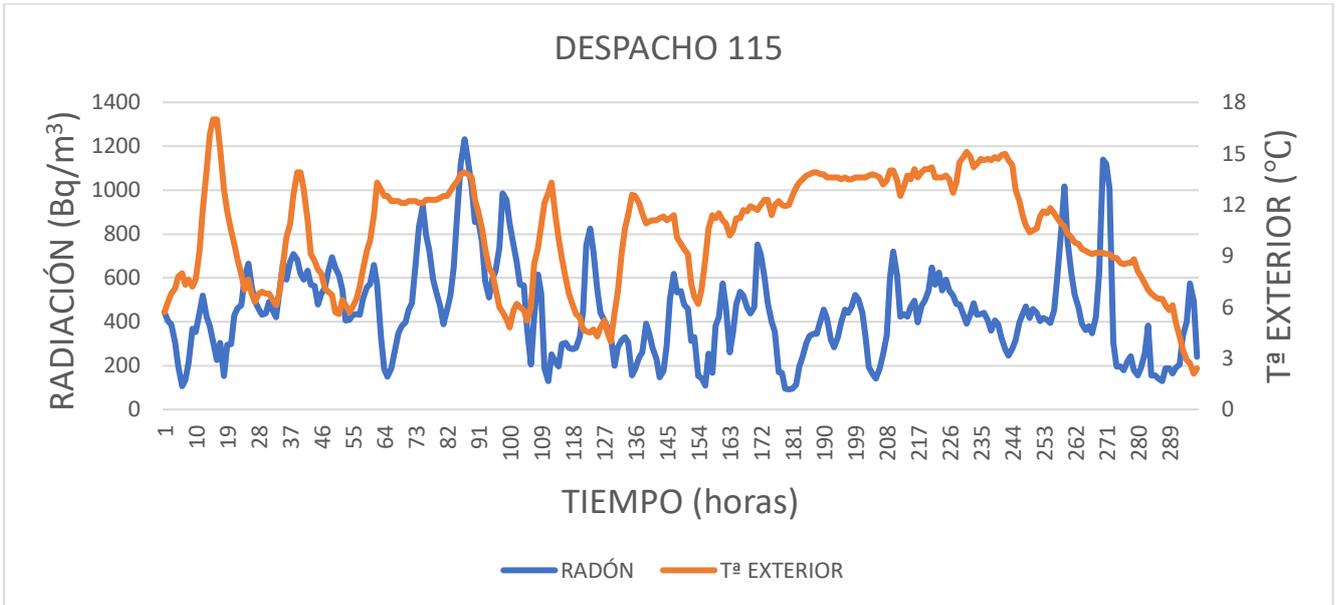


Figura 4-16 Concentración de radón frente a Tª exterior en despacho 115 (Fase 1)

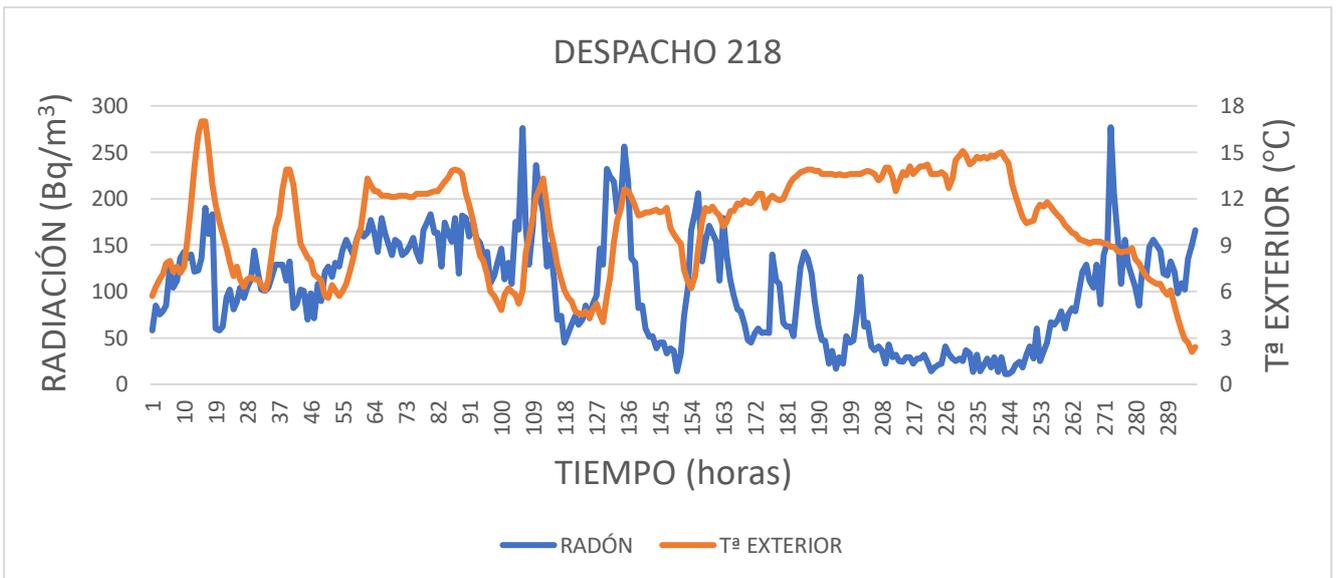
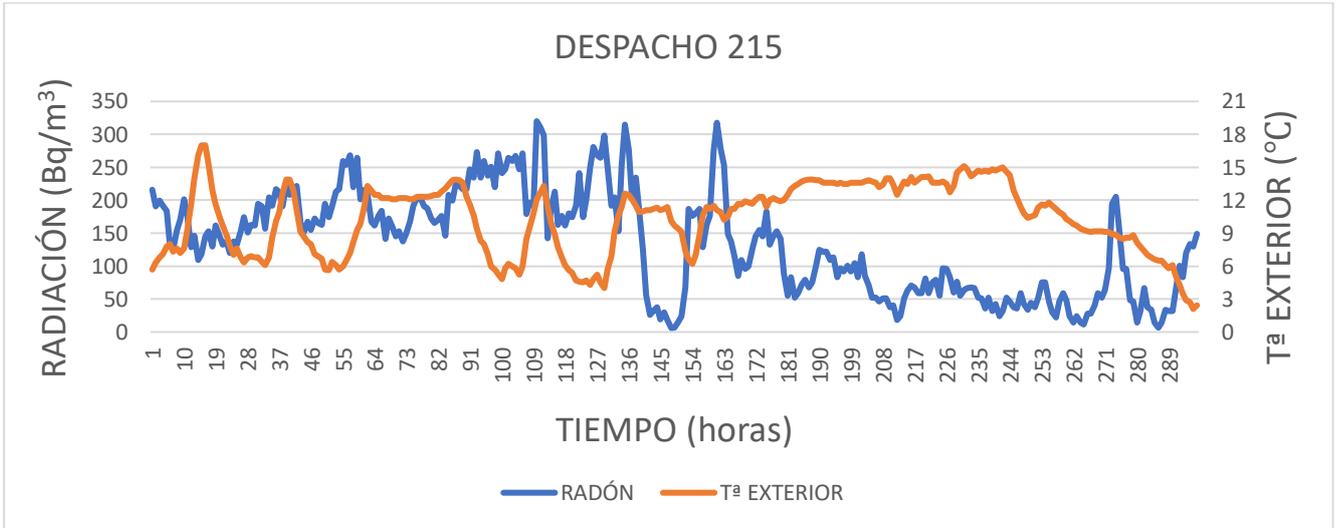


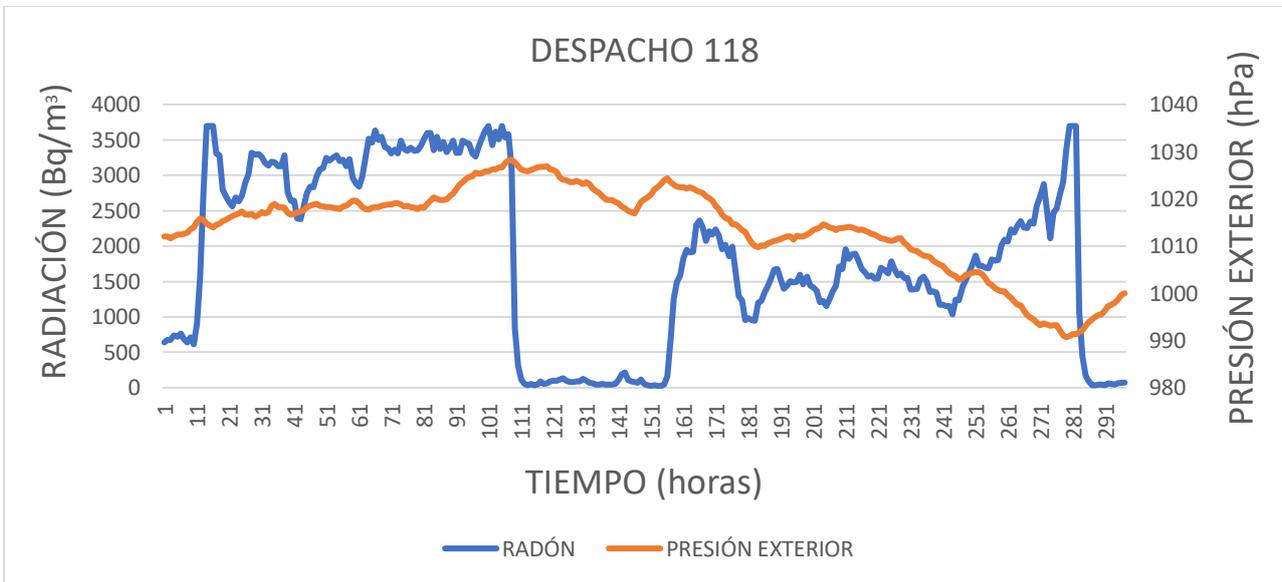
Figura 4-17 Concentración de radón frente a Tª exterior en despacho 218 (Fase 1)



**Figura 4-18** Concentración de radón frente a Tª exterior en despacho 215 (Fase 1)

De acuerdo con lo indicado por el CSN [21], tras estudiar las gráficas no se aprecia una especial relación entre la temperatura y la concentración de radón.

➤ Presión exterior



**Figura 4-19** Concentración de radón frente a presión en despacho 118 (Fase 1)

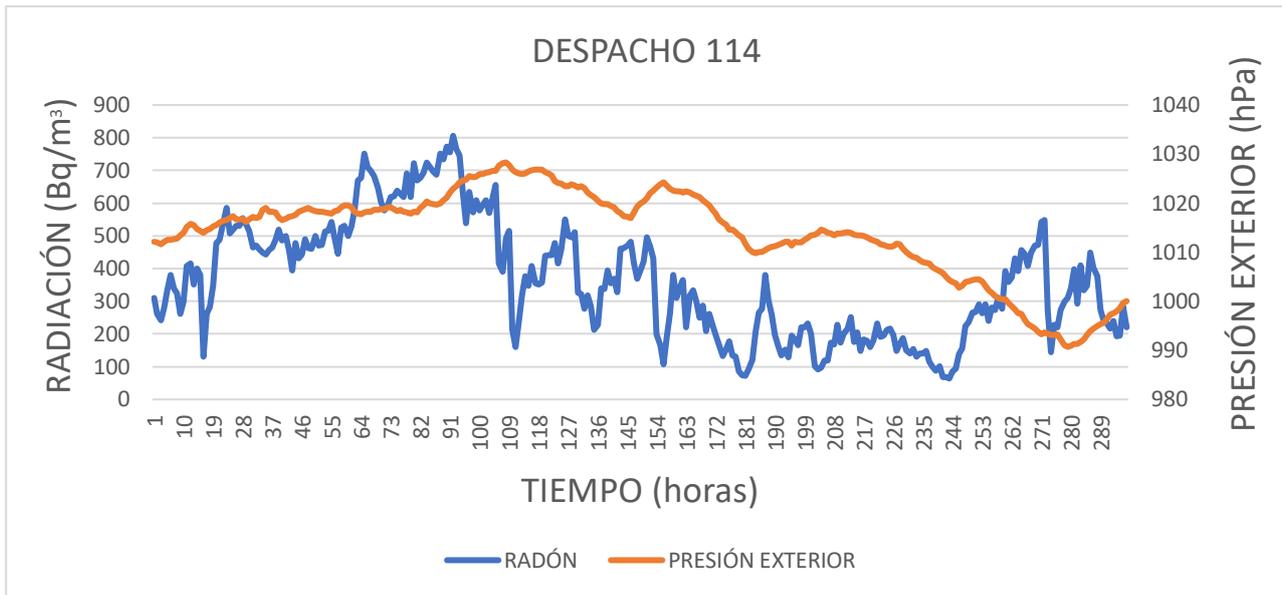


Figura 4-20 Concentración de radón frente a presión en despacho 114 (Fase 1)

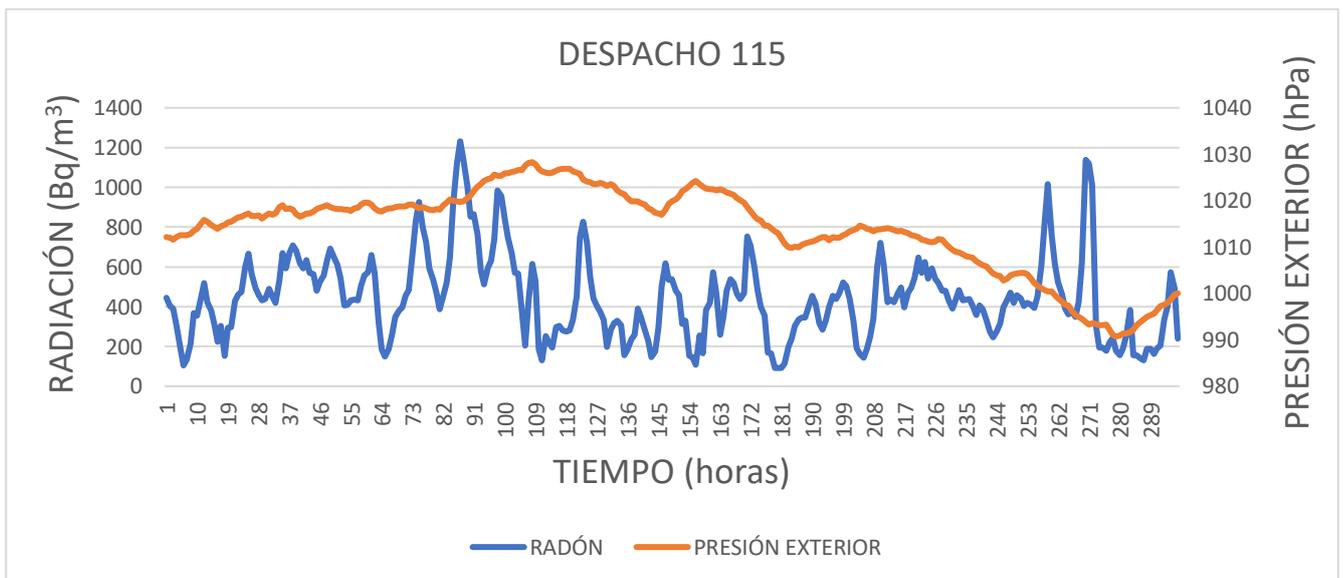
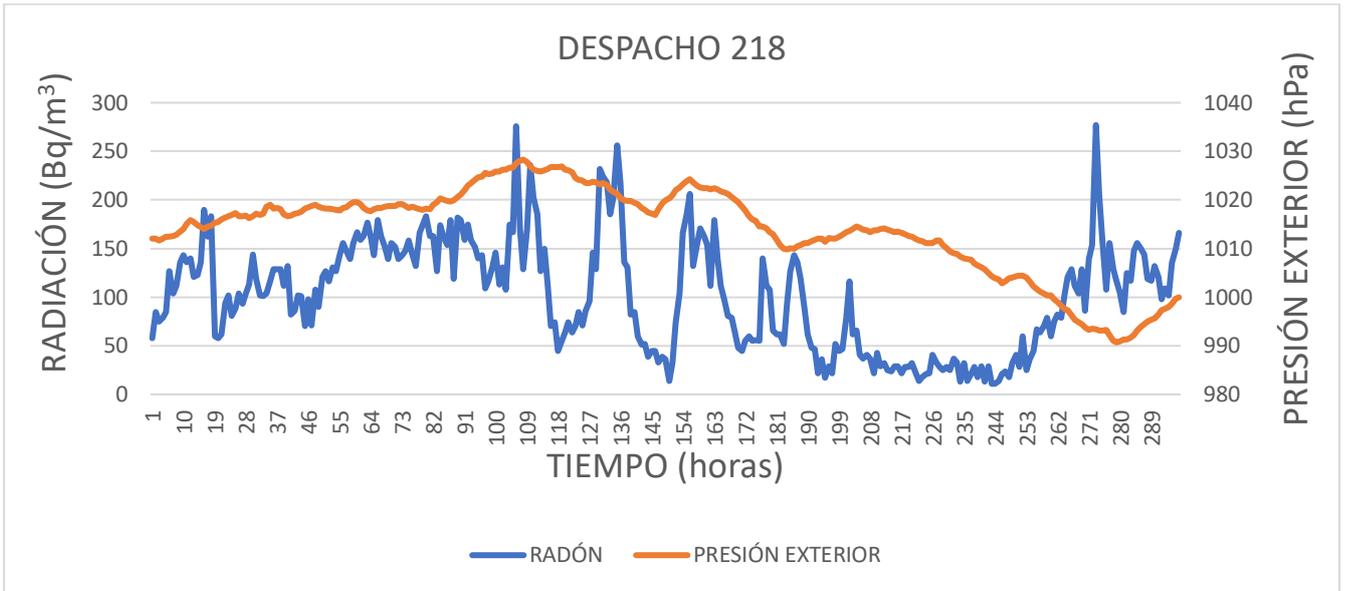
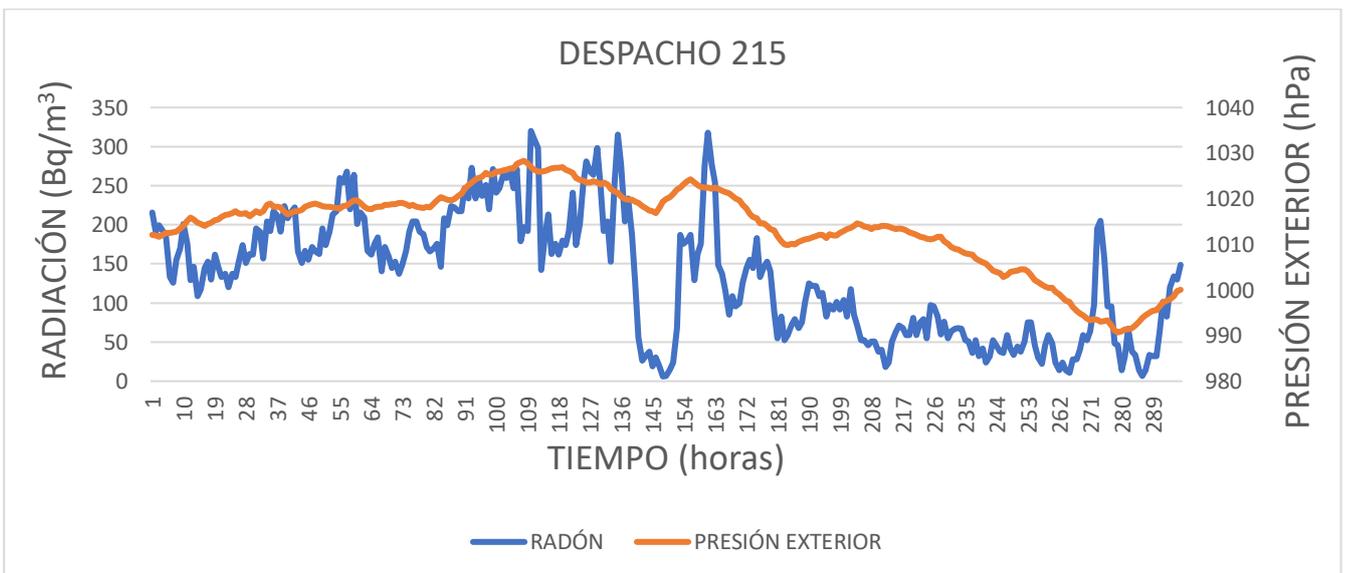


Figura 4-21 Concentración de radón frente a presión en despacho 115 (Fase 1)



**Figura 4-22 Concentración de radón frente a presión en despacho 218 (Fase 1)**



**Figura 4-23 Concentración de radón frente a presión en despacho 215 (Fase 1)**

Se puede apreciar a la vista de las gráficas que en el pico inferior de presión (990 hPa en las horas aproximadas 270-290) sí parece conllevar un aumento en la concentración de radón (en los despachos 118, 218, 215). Respecto al despacho 114, en este período, el descenso de concentración de radón se debe a una apertura de ventana, es por ello que no sigue el mismo comportamiento que los otros despachos.

Pese a ello, este fenómeno no parece explicar en su totalidad el comportamiento del radón.

❖ Influencia de la temperatura interior y la humedad interior

➤ Temperatura interior

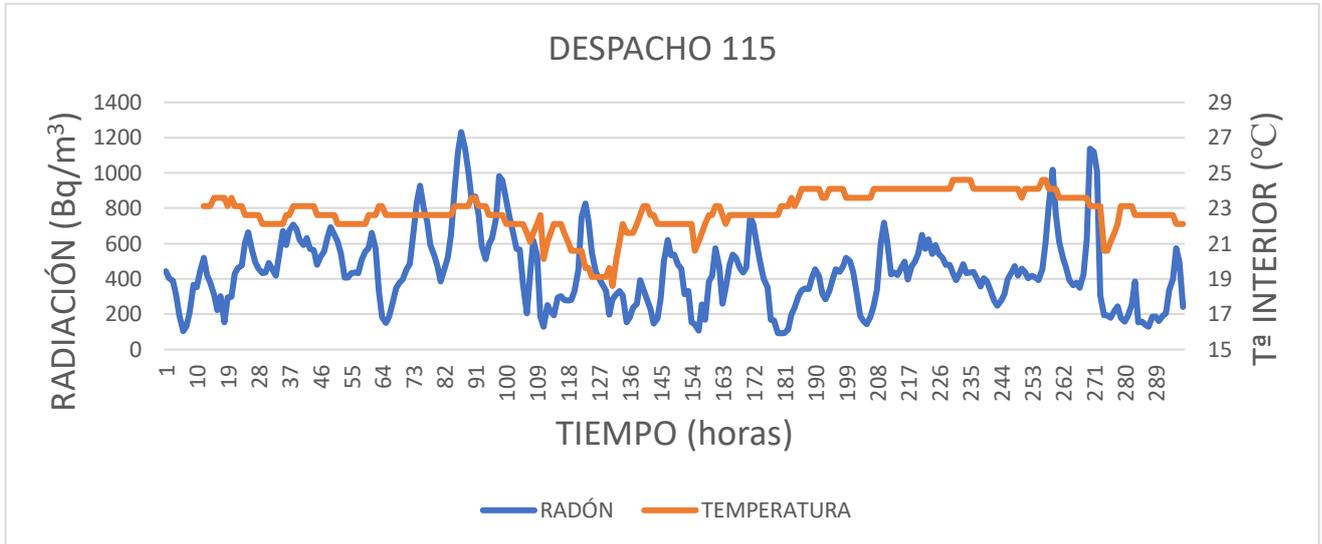


Figura 4-24 Concentración de radón frente a Tª interior en despacho 115 (Fase 1)

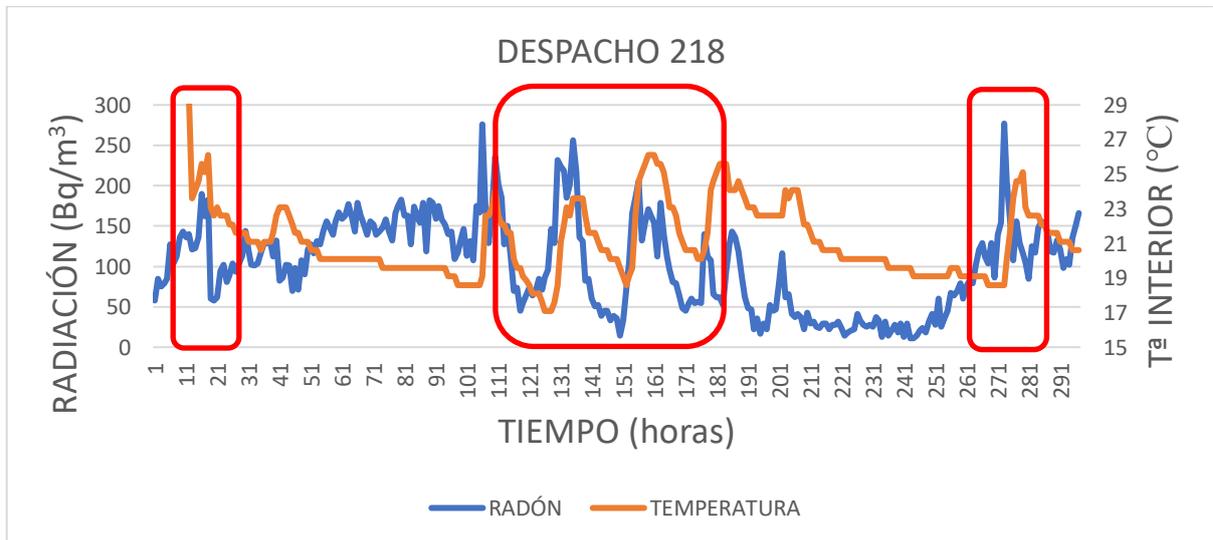


Figura 4-25 Concentración de radón frente a Tª interior en despacho 218 (Fase 1)

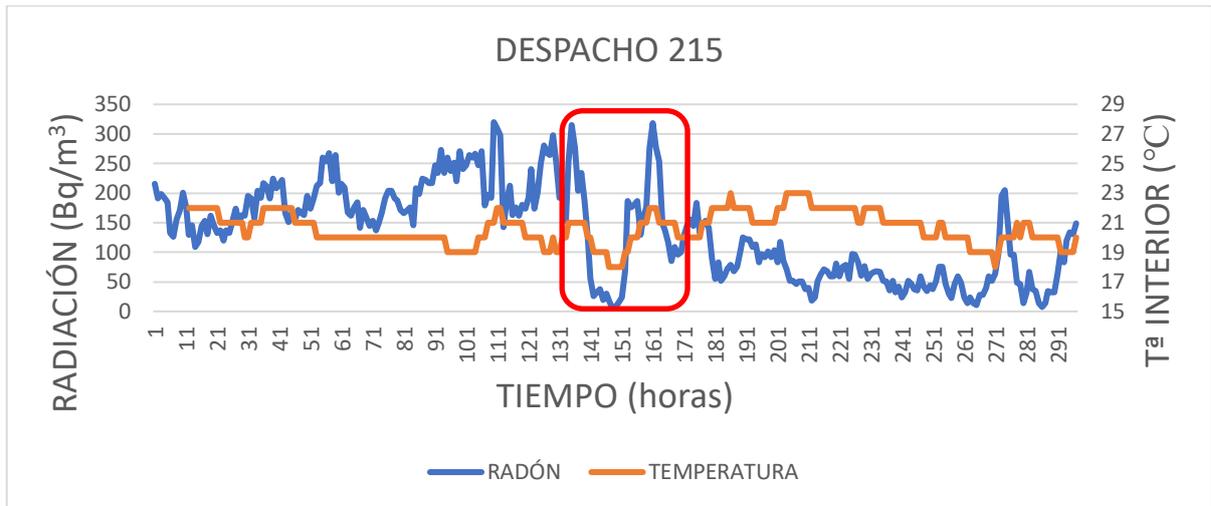


Figura 4-26 Concentración de radón frente a Tª interior en despacho 215 (Fase 1)

En relación a las temperaturas interiores, cabe recordar que no se obtuvieron datos de todos los despachos. En los que sí que se obtuvieron, puede observarse una pequeña dependencia proporcional entre la temperatura interior y la concentración de radón, es decir, cuando aumenta la temperatura, aumenta la concentración de radón, y viceversa. Esta relación coincide con la establecida por el CSN.

Este fenómeno puede verse en los despachos de la primera planta, especialmente en el 218, mientras que en el de la planta baja, en el despacho 115, no se aprecia un patrón establecido, quizás porque las variaciones de temperatura son menores que en el despacho 218.

➤ Humedad interior

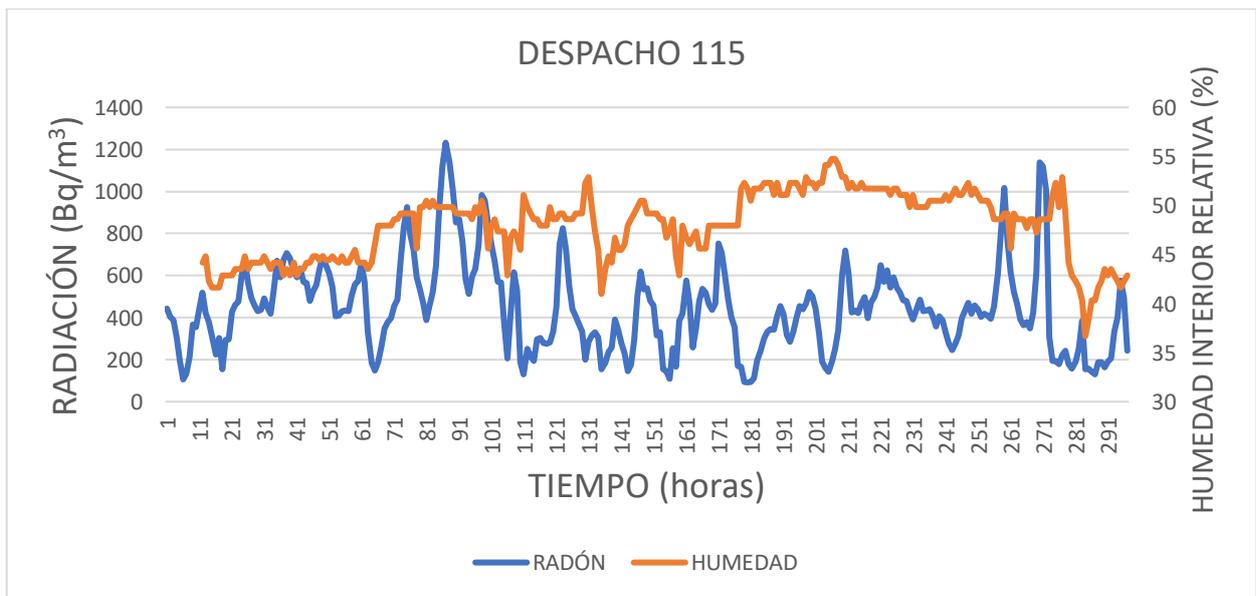


Figura 4-27 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 115 (Fase 1)

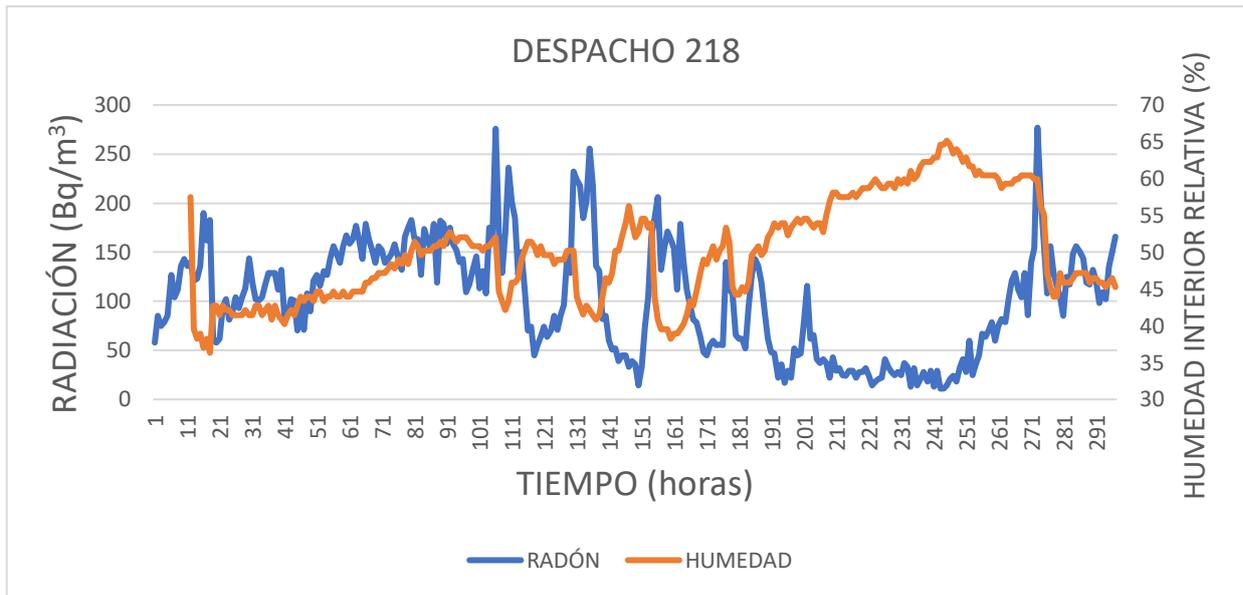


Figura 4-28 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 218 (Fase 1)

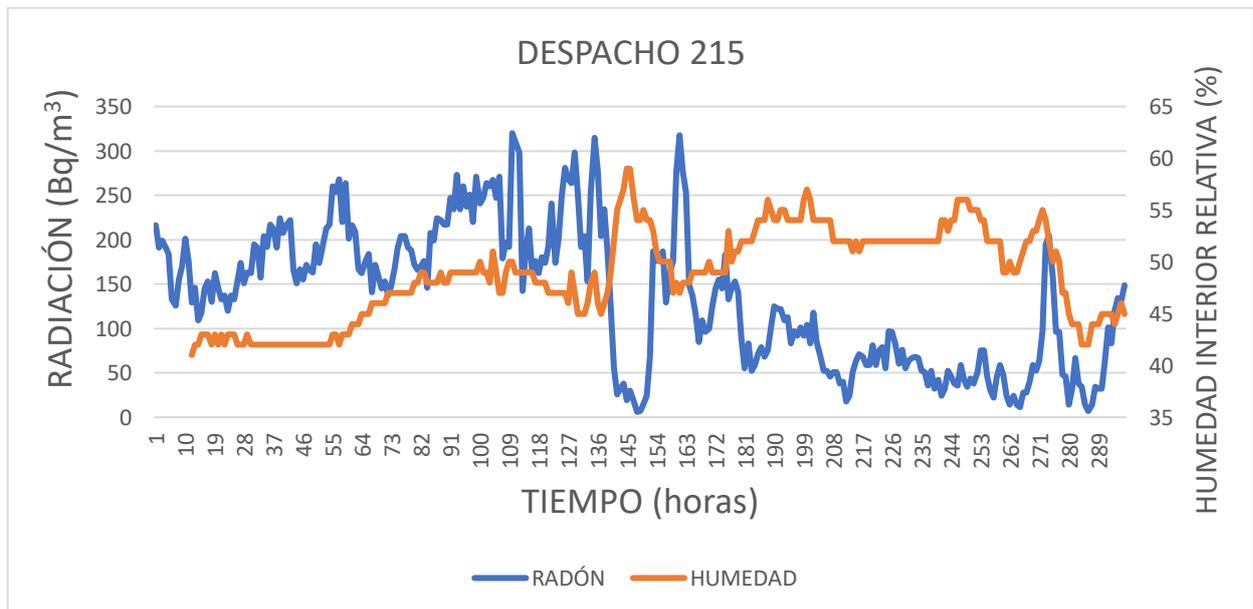


Figura 4-29 Concentración de radón frente a humedad interior en despacho 215 (Fase 1)

Puede pensarse que la humedad interior en los diferentes despachos ha influido sobre el comportamiento del radón. Sin embargo, no se aprecia un patrón claro, lo que demuestra que el radón tiene comportamientos difíciles de predecir y no siempre atribuibles a algún parámetro atmosférico.

Se concluye, por tanto, que la humedad interior no guarda una relación con la concentración de radón.

4.1.2 Fase 2 (18 de diciembre hasta 09 de enero)

A continuación, se muestran las medias obtenidas de concentración de radón en los diferentes despachos (Tabla 4-3):

Localización	Concentración media de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Despacho 118	1391
Despacho 114	440
Seminario 1	519
Sala de grados	522
Despacho 217	302

Tabla 4-3 Concentración media de radón en la Fase 2

Respecto a esta fase, se puede comprobar que los niveles medios diarios de los despachos 114 y 118 continúan estando por encima de la media pese a haber descendido respecto a la Fase 1.

En relación a los otros tres medidores: los que se encuentran en la planta baja (Seminario 1 y Sala de Grados) muestran un elevado nivel de concentración (más de 500 Bq/m<sup>3</sup>), mientras que el despacho 217 está ligeramente por encima del límite establecido por el CTE.

La Figura 4-30 muestra las medidas combinadas de radiación correspondientes a la segunda fase.

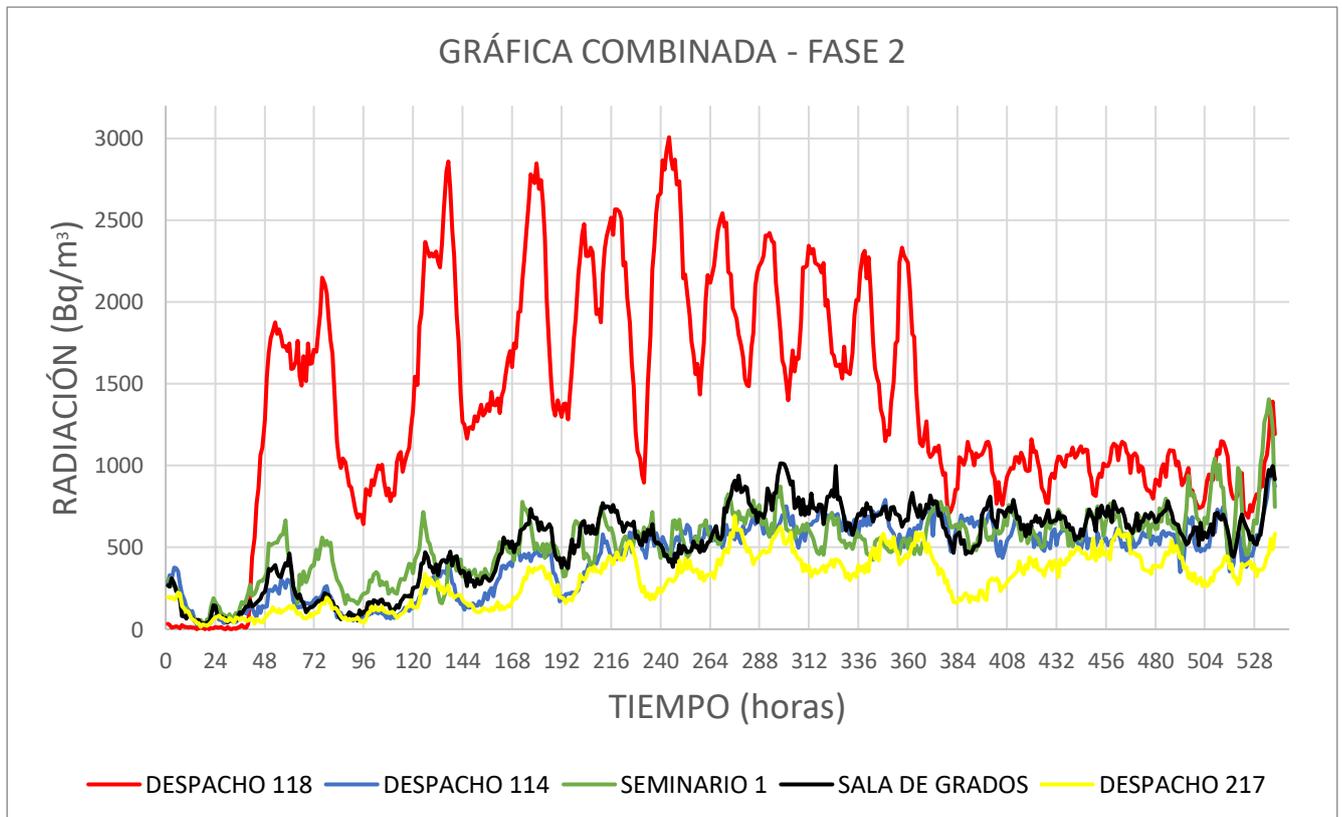


Figura 4-30 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 2)

A continuación (Figura 4-31), se visualiza de la misma manera que antes, la evolución del radón exceptuando el despacho 118:

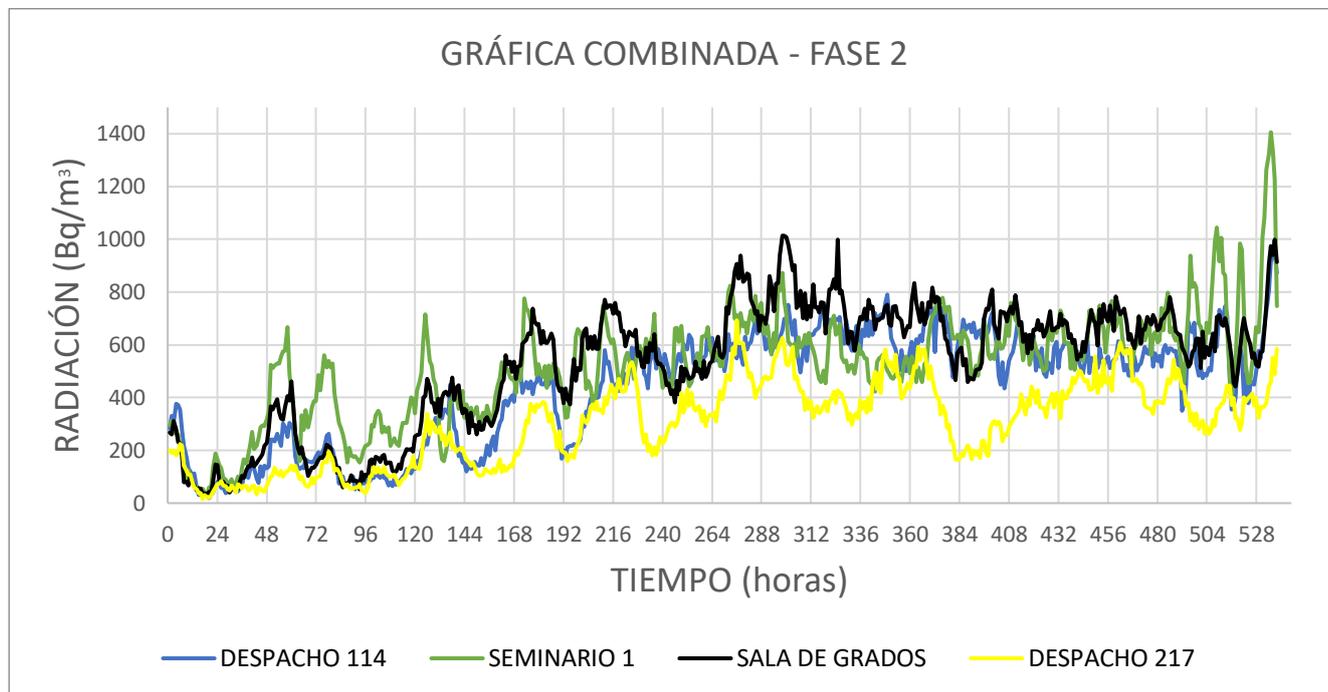
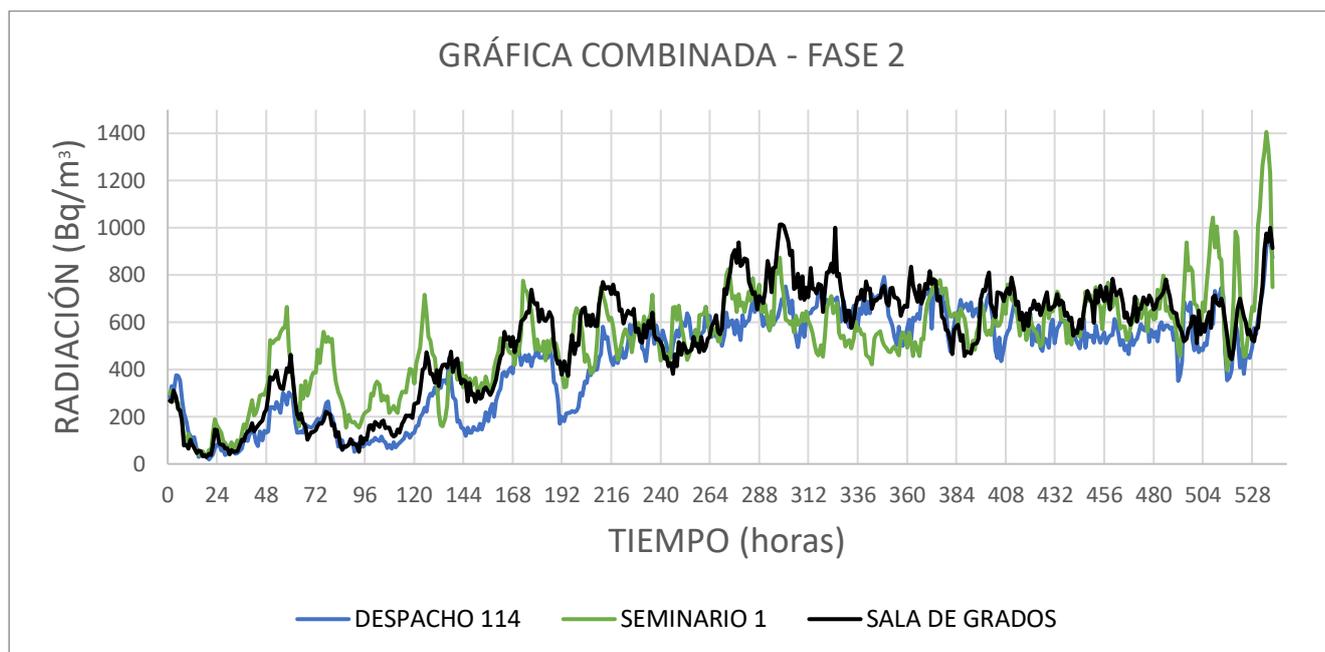


Figura 4-31 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 2)

Puede apreciarse una clara tendencia ascendente y un comportamiento similar en los medidores de la planta baja (Figura 4-32).

La respuesta está en que esta fase se ha llevado a cabo en período vacacional, por lo que la inexistencia de ventilación en las diferentes localizaciones ha provocado una acumulación constante de radón a lo largo de las Navidades, hecho que hace comprensible que los resultados sean un tanto más elevados a medida que avanza el tiempo de estudio y por tanto la media aumente.

Pese a esta posible causa, se aprecia que la concentración de radón del despacho 118 desciende drásticamente en la hora 360, suceso que se estudiará más adelante.



**Figura 4-32 Gráfica de concentración de radón del despacho 114, seminario 1 y sala de grados**

Respecto a la concentración media entre las 08:30 y las 18:30 de esta fase (Tabla 4-4), pese a haberse realizado en período vacacional de la ENM, se adjuntan de igual manera para ver la comparativa y poder extrapolar dichos datos a un período lectivo cualquiera.

Localización	Media de concentración de 08:30 a 18:30 (Bq/m <sup>3</sup> )
Despacho 118	1319
Despacho 114	439
Seminario 1	495
Sala de grados	524
Despacho 217	314

**Tabla 4-4 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 2)**

Puede comprobarse que, en este caso, todos los lugares que se han estudiado superan el límite establecido.

Por lo que respecta a los resultados en función de los agentes meteorológicos: debido a la similitud de los resultados con respecto a la Fase 1, solamente se mostrarán las gráficas correspondientes a hechos anómalos o cambiantes con respecto a la situación anterior. Por el resto, se mantienen los mismos comportamientos con respecto a la concentración de radón.

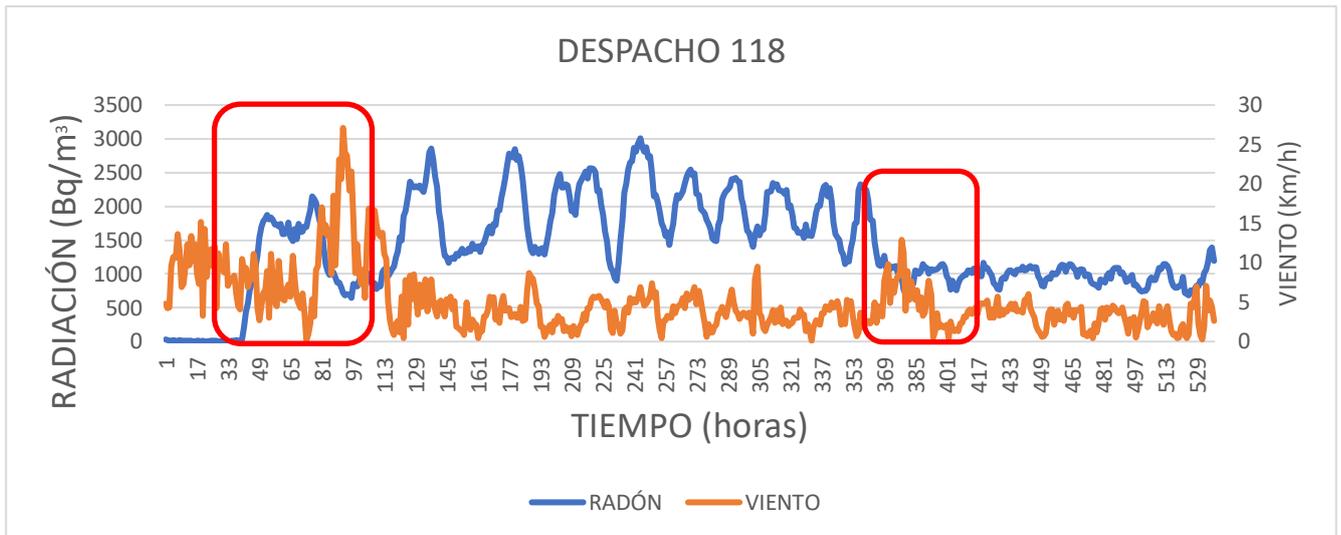


Figura 4-33 Concentración de radón frente al viento en el despacho 118 (Fase 2)

Ya se ha comentado anteriormente el extraño comportamiento del radón entorno a las horas 360, en la que desciende drásticamente. Evaluando las gráficas correspondientes a los diferentes parámetros meteorológicos en esa franja de horas, solo se aprecia una clara influencia por parte del viento, ya que al aumentar, hace que la concentración disminuya (también fácilmente visible en la franja horaria 71-113).

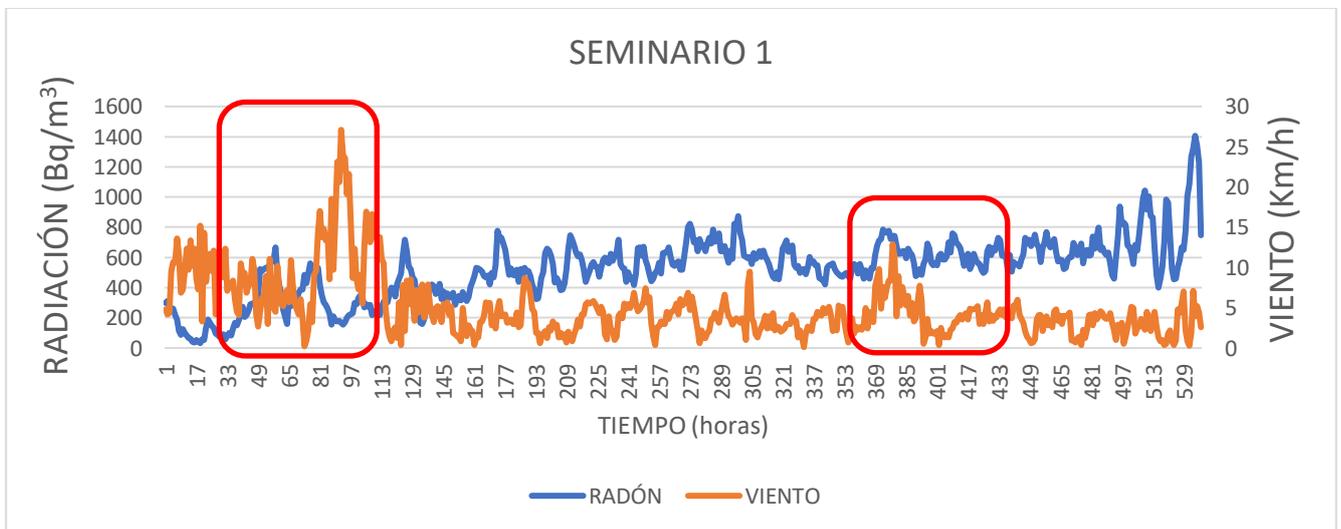


Figura 4-34 Concentración de radón frente al viento en el seminario 1 (Fase 2)

Como puede verse en la Figura 4-34 del Seminario 1, un aumento de la intensidad del viento (por encima de 10-15 km/h) en la franja horaria de 71-103 sí ha implicado un descenso en la concentración del radón, mientras que en la franja 365-393, con vientos de entorno a 10 km/h se produce un aumento en la concentración de radón.

Comprobando esas horas con otros factores meteorológicos, se observa que únicamente se podría relacionar con la temperatura interior (Figura 4-35).

Sin embargo, se aprecia que el aumento de concentración de radón tiene lugar a la vez que un descenso de temperatura interior, lo que no tiene sentido según lo estudiado en el apartado de Estado del Arte [21], ya que son los aumentos de temperatura interior los que conllevan un aumento de diferencias de presión, y por tanto, un aumento de concentración de radón, hecho que no se hace visible en este caso.

Es por ello por lo que se asocia ese pequeño ascenso de concentración de radón al efecto de succión provocado por el viento.

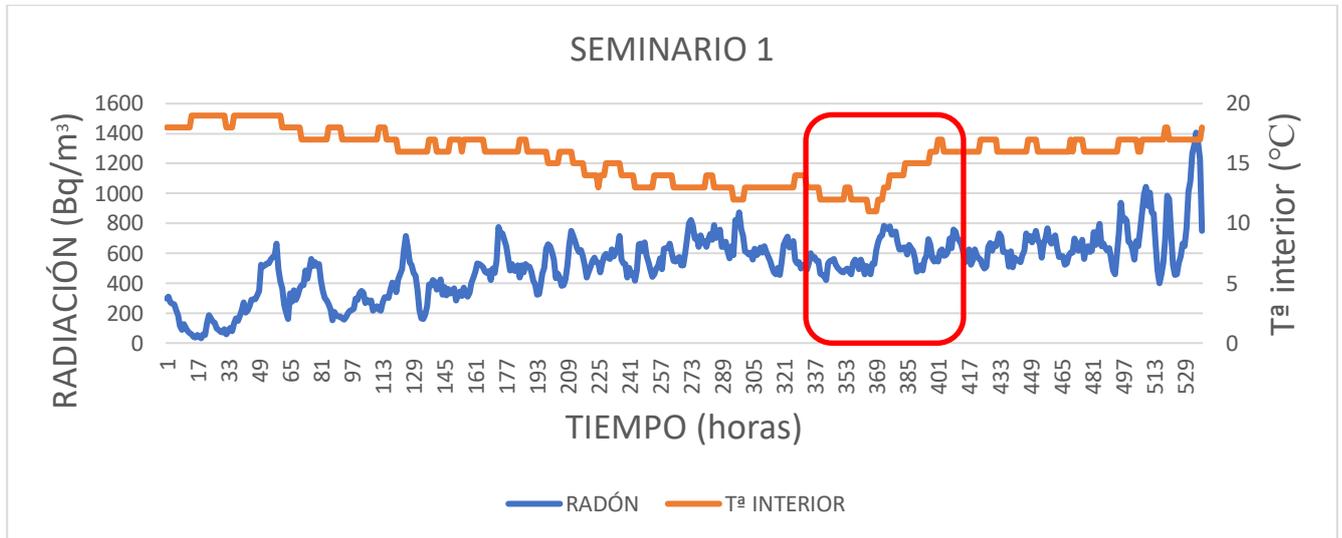


Figura 4-35 Concentración de radón frente a la Tª interior en el seminario 1 (Fase 2)

Exactamente la misma situación se observa en la Sala de Grados (Figura 4-36) y en el despacho 217 (Figura 4-37). Un aumento en la intensidad del viento ha conllevado una dependencia directamente proporcional hasta un valor de 10 km/h aproximadamente, y además en la misma franja horaria (113-211). Sin embargo, no se puede perder de vista que en la franja 71-113, conforme aumenta la intensidad de viento, disminuye la concentración de radón.

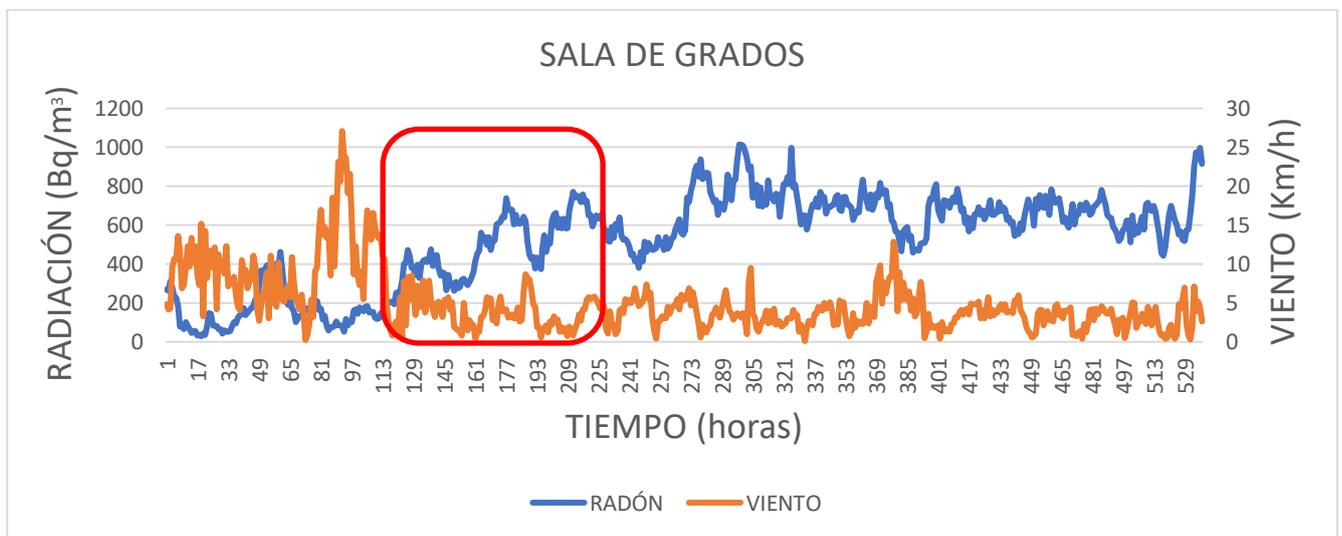
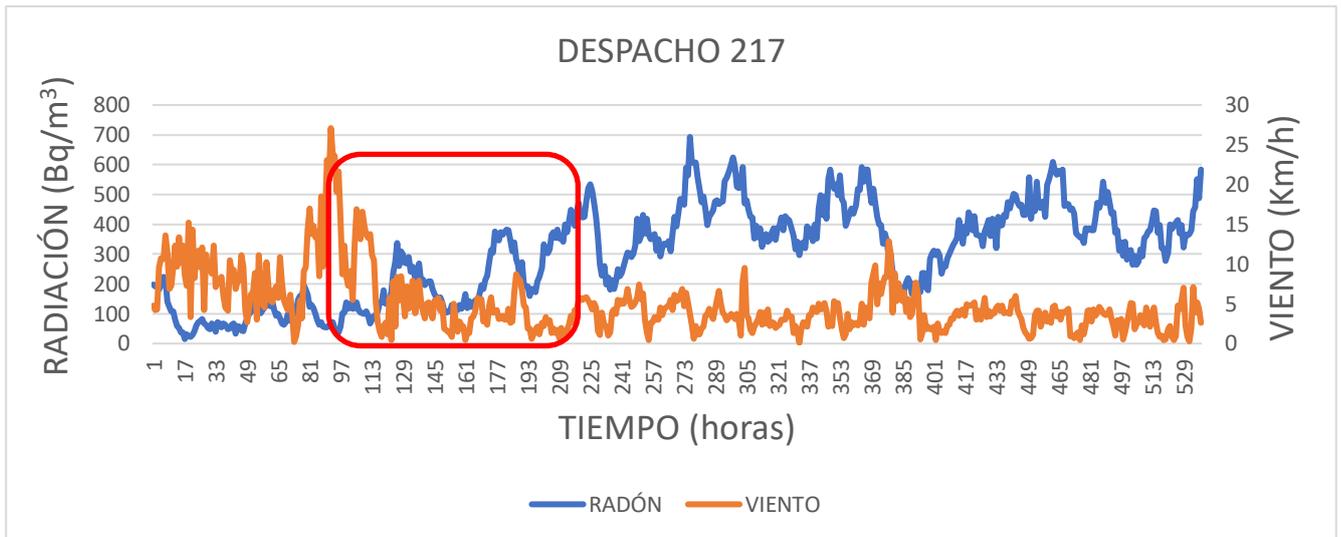


Figura 4-36 Concentración de radón frente al viento en la sala de grados (Fase 2)



**Figura 4-37 Concentración de radón frente al viento en el despacho 217 (Fase 2)**

Se concluye, por tanto, que el viento ha ejercido el efecto contrario al deseado: aumento de concentración de radón por efecto de succión, como ya se explicó anteriormente.

#### 4.1.3 Fase 3 (10 de enero hasta 21 de enero)

A continuación, se muestran las medias de concentración de radón obtenidas durante toda la fase en los diferentes despachos (Tabla 4-5):

Localización	Concentración media de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Despacho 118	1861
Office CUD	411
SIMNAV	258
Cámara Oficiales	101
Secretaría CUD	290

**Tabla 4-5 Concentración media de radón en la Fase 3**

En esta tercera fase se aprecia cómo el despacho 118 ha aumentado de media con respecto a la fase anterior. Las otras localizaciones parecen estar algo más controladas, excepto el Office del CUD, que tiene una media superior a la reglamentaria.

El SIMNAV y la Secretaría del CUD tienen unos niveles bastante similares, mientras que la Cámara de Oficiales tiene hasta tres veces menos de radiación media de lo que pide el CTE.

Cabe destacar que el SIMNAV (que pese a tener una media inferior a 300 Bq/m<sup>3</sup> llega a tener picos de hasta 1000 Bq/m<sup>3</sup>) y la Cámara de Oficiales no suelen ventilarse a lo largo de la semana, mientras que los otros habitáculos sí.

La Figura 4-38 muestra las medidas combinadas de radiación correspondientes a la segunda fase:

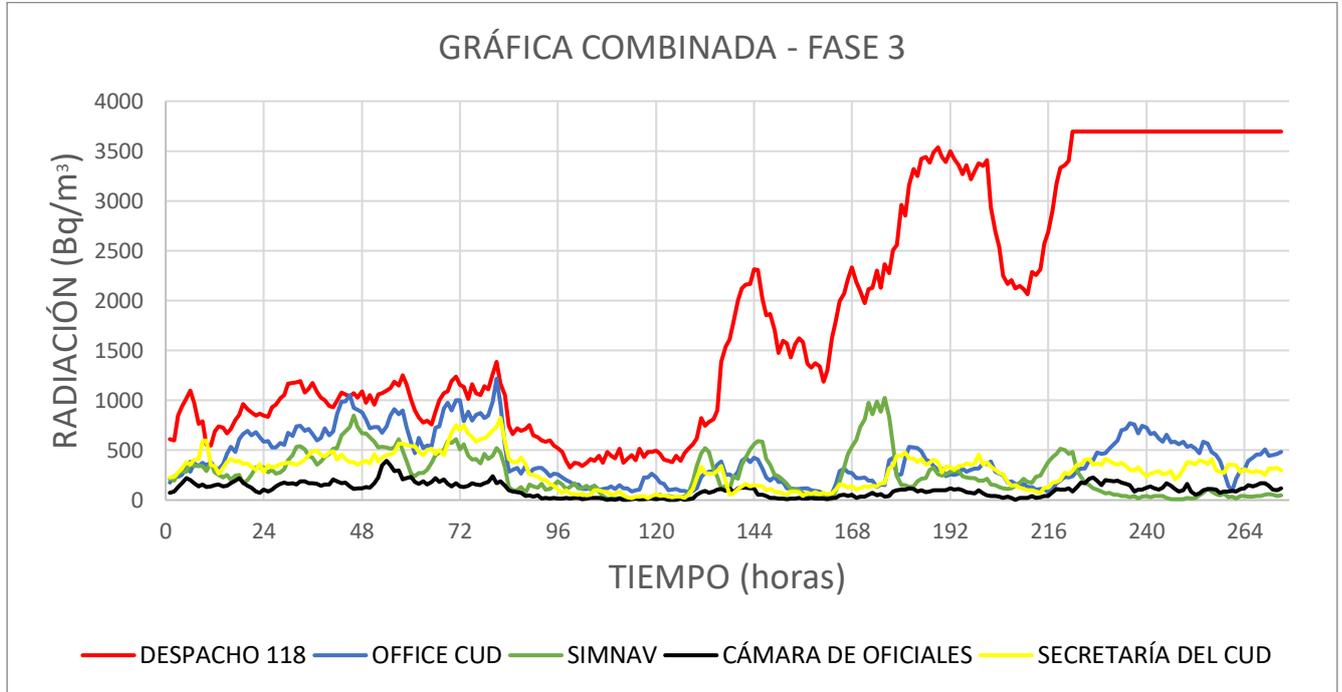
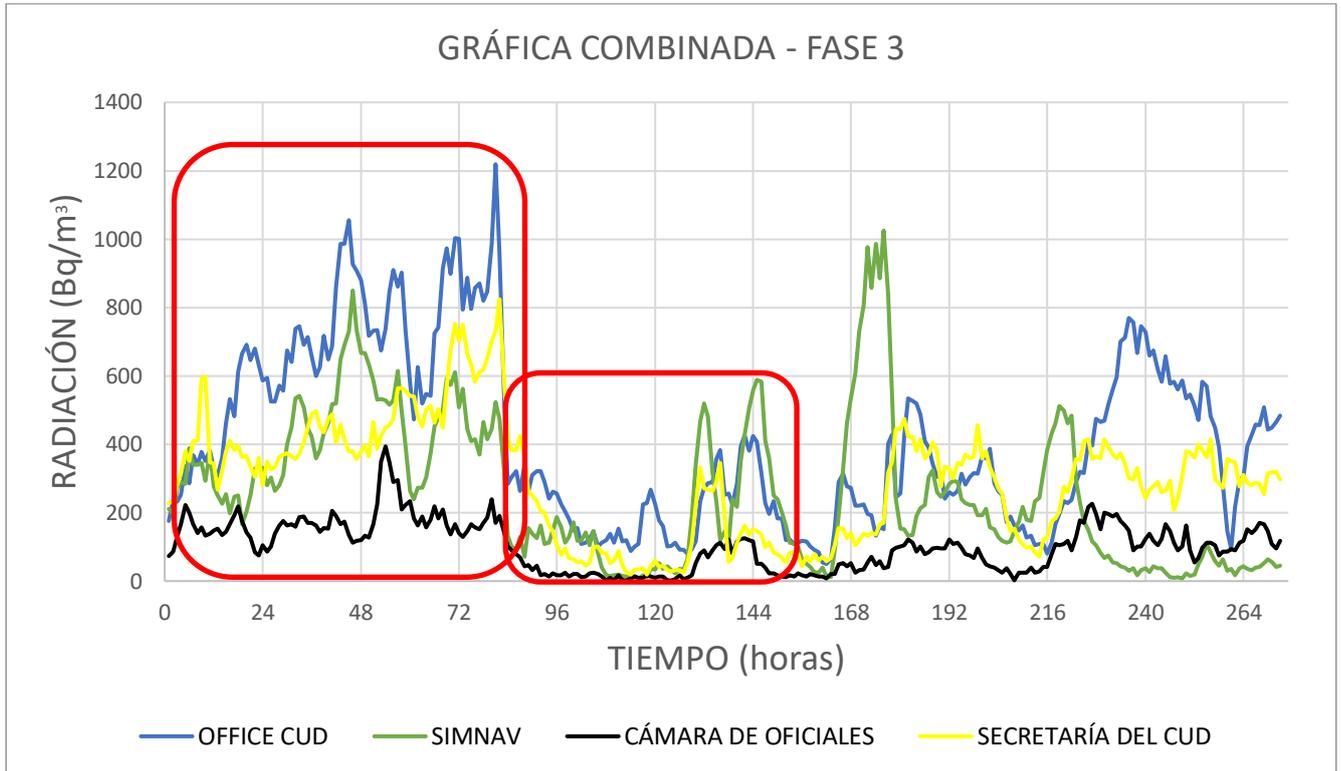


Figura 4-38 Gráfica combinada de los 5 dispositivos (Fase 3)

Se aprecia un comportamiento excepcional en el despacho 118 en los últimos días, manteniéndose el valor en 3696 Bq/m<sup>3</sup> de manera constante. Este hecho se debe a las limitaciones del equipo.

En la Figura 4-39 se muestra, como en los apartados anteriores, la evolución descartando el Despacho 118:



**Figura 4-39 Gráfica combinada exceptuando el despacho 118 (Fase 3)**

Igual que en la Fase 2, se observa un comportamiento análogo en las diferentes localizaciones (Figura 4-39). La Tabla 4-6 corresponde a la concentración media entre las 08:30 y las 18:30 de esta fase:

<b>Localización</b>	<b>Media de concentración de 08:30 a 18:30 (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Despacho 118	1755
Office CUD	400
SIMNAV	207
Cámara Oficiales	104
Secretaría CUD	317

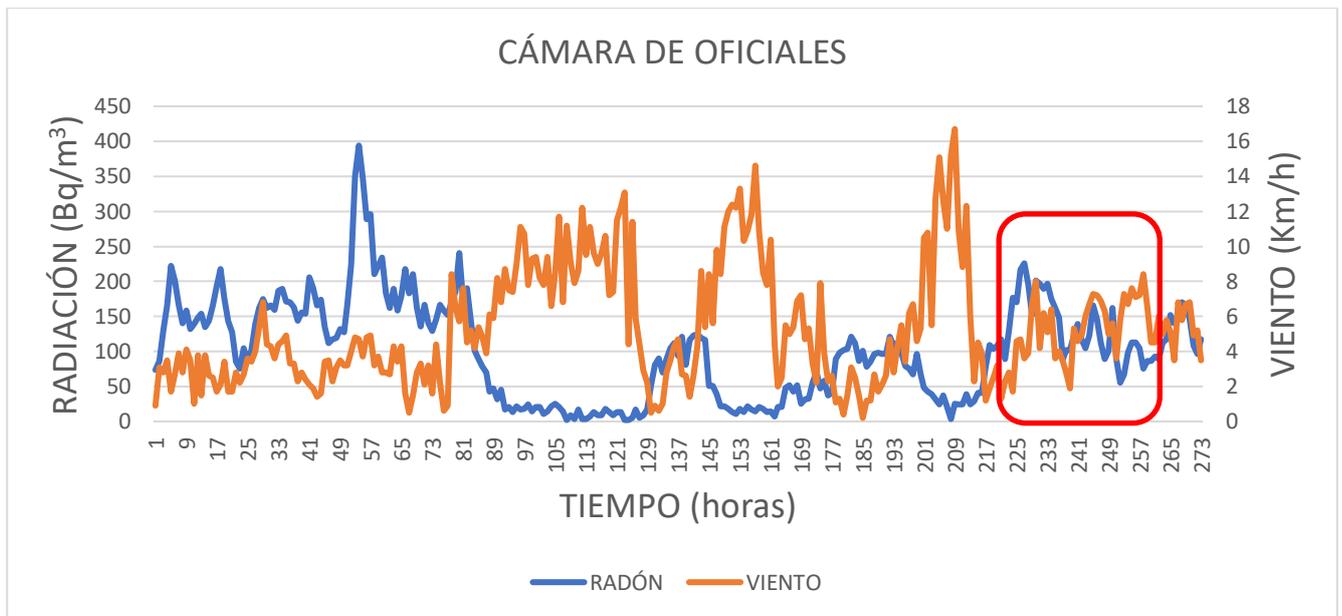
**Tabla 4-6 Media de concentración de radón en jornada laboral (Fase 3)**

En este caso puede verse que las condiciones laborales no son las óptimas, al menos en la Secretaría de CUD, donde se encuentra personal constantemente trabajando.

En cuanto al Office, el dato de concentración media es también superior a lo establecido, sin embargo, es una habitación poco frecuentada en la que los profesores simplemente invierten un período inferior a 30 minutos al día. Cabe destacar que la media en período laboral del despacho 118 continúa siendo casi seis veces superior a lo permitido. Pese a que este despacho no se ha encontrado habitado, ha despertado grandes alarmas.

Es por ello que la Directiva del CUD decidió tomar cartas en el asunto y el lunes 13 de enero ordenó el desalojo de todo el profesorado, cambiando sus despachos a la planta alta y quedando la planta baja completamente vacía.

En cuanto a los factores meteorológicos y su influencia en la concentración de radón, vuelve a repetirse el mismo caso que en la Fase 2, es decir, aumenta la concentración de radón cuando la intensidad del viento es menor a 10 km/h. A partir de esa intensidad puede apreciarse que la concentración disminuye. Este fenómeno puede apreciarse en la Figura 4-40:



**Figura 4-40 Concentración de radón frente al viento en la cámara de oficiales (Fase 3)**

Se concluye que guarda la misma relación que anteriormente puesto que en esa franja horaria no se aprecia la influencia de ningún otro fenómeno atmosférico.

## 4.2 Valoración de resultados obtenidos

Para concluir el apartado de resultados obtenidos referido a las diferentes fases llevadas a cabo durante el TFG, se adjunta la Tabla 4-7, que muestra las medias globales de los diferentes habitáculos que se han medido.

De esta manera se puede comprobar más fácilmente aquellos que superan lo establecido por normativa, los que están sometidos a unos niveles de concentración de radón menores y aquellos en los que se debería tomar acciones para reducir la exposición al radón.

Referencia de colores según la IS-33 del CSN:

- Verde: cumple normativa europea y no es necesario control.
- Amarillo: no cumple normativa europea pero no es necesario control.
- Rojo: se debe aplicar nivel bajo de control (los mayores de 1000 Bq/m<sup>3</sup> requieren nivel alto de control).

<b>Localización</b>	<b>Valoración de concentración de radón (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Despacho 118	1712
Despacho 114	401
Despacho 115	442
Despacho 218	101
Despacho 215	134
Seminario 1	519
Sala de grados	522
Despacho 217	302
Office CUD	411
SIMNAV	258
Cámara Oficiales	101
Secretaría CUD	290

**Tabla 4-7 Medias globales de concentración de radón en las 3 fases**

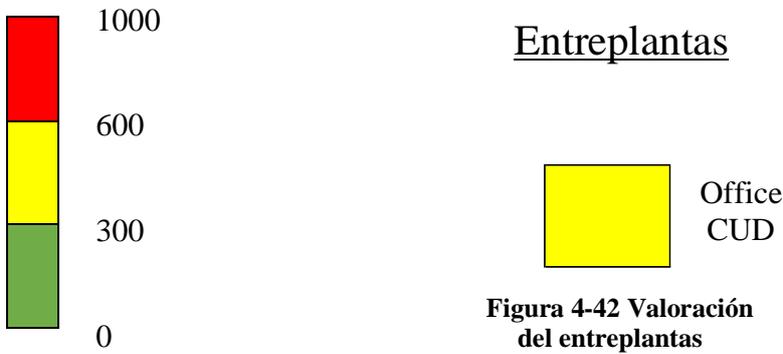
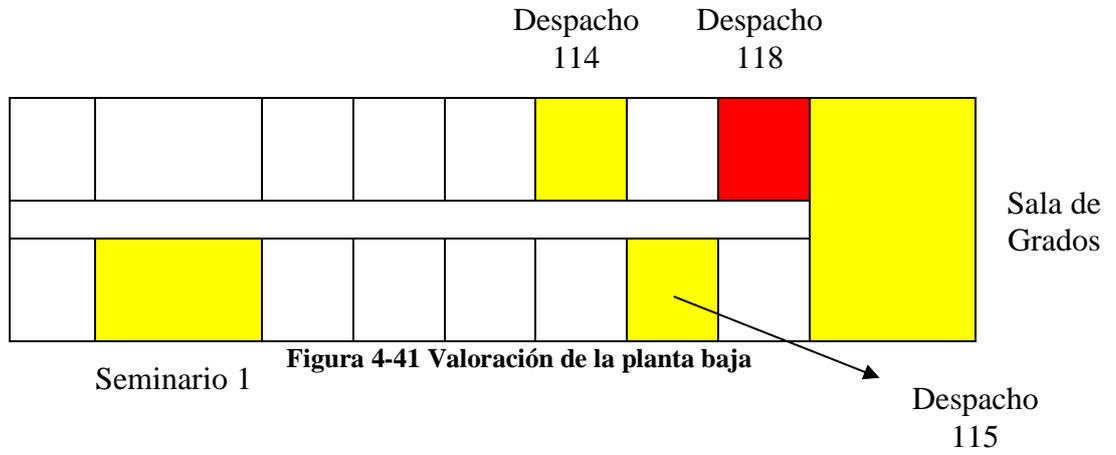
Como ya se ha visto anteriormente, el despacho 118 está sometido a niveles de concentración muy elevados, fenómeno anómalo debido a que los habitáculos que tiene alrededor (despachos 114, 112, 115 y sala de grados) tienen medias de radón entre 3 y 4 veces menores.

Por lo que respecta a la Cámara de Oficiales, habitáculo con niveles de radón más bajos junto al despacho 218, tiene su explicación en su posición geográfica. Debajo de ella se encuentra el Túnel del Viento de la ENM, que conecta la explanada con el Patio de Aulas. Como bien dice su nombre, es un lugar en el que siempre hay corriente, lo que impide al radón ascender directamente a la Cámara de Oficiales y acumularse en su interior.

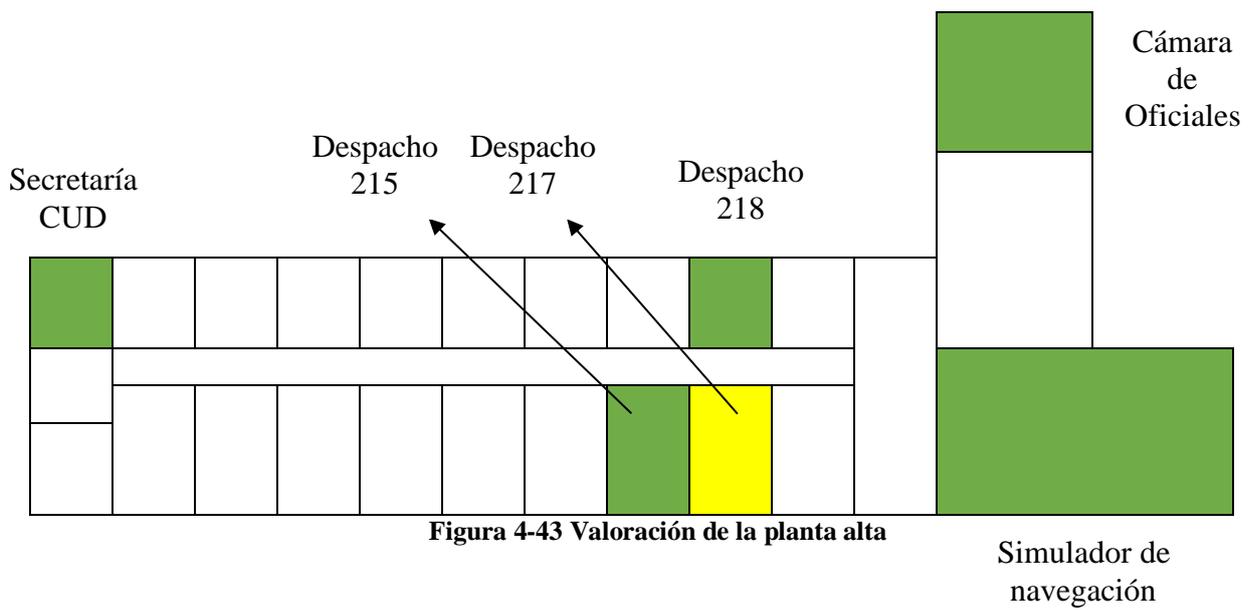
Por otro lado, se han estudiado las gráficas del despacho 218 y no se aprecia que sea debido a una ventilación constante, dado que los mínimos no siguen un patrón y comportamiento regular.

A continuación, se muestra de manera gráfica la valoración de los diferentes resultados obtenidos. La escala mostrada corresponde a la concentración de radón, medida en Bq/m<sup>3</sup>.

Planta baja



Planta alta



### **4.3 Protocolo de ventilación en despachos de la planta baja (27 de enero hasta 31 de enero)**

Tras realizar la correspondiente toma de datos y analizar los resultados, se planteó la necesidad de estudiar algo más en profundidad los despachos más afectados de la planta baja, por lo que se decidió realizar un protocolo de ventilación durante la semana del 27 al 31 de enero. Las horas en las que se llevó a cabo el protocolo fueron entre las 08:30 y 18:30, aproximadamente.

Cabe destacar que los valores tomados a horas exactas son directamente visualizados en el equipo de medición, mientras que los que aparecen en las gráficas de manera horaria son la media horaria, por lo que pueden no coincidir.

#### ▪ Día 1

El primer día de protocolo fue el lunes 27 de enero, que se llevó a cabo únicamente en el despacho 118, aquel en el que mayor concentración media se ha registrado durante el TFG.

Este protocolo consistía en abrir la mitad de la ventana durante un tiempo determinado (45 minutos), tomar muestras, y volver a cerrar la ventana para posteriormente volver a guardar los datos tras 45 minutos.

Para ello se pusieron a medir cuatro equipos, uno en cada esquina del habitáculo, y así comprobar si había alguna zona en concreto que tuviera concentraciones mayores que el resto.

Tras analizar los datos se vio que los valores entre los cuatro equipos fluctuaban en  $\pm 100$  Bq/m<sup>3</sup>, lo que supone un error relativo menor al 10%, margen totalmente aceptable.

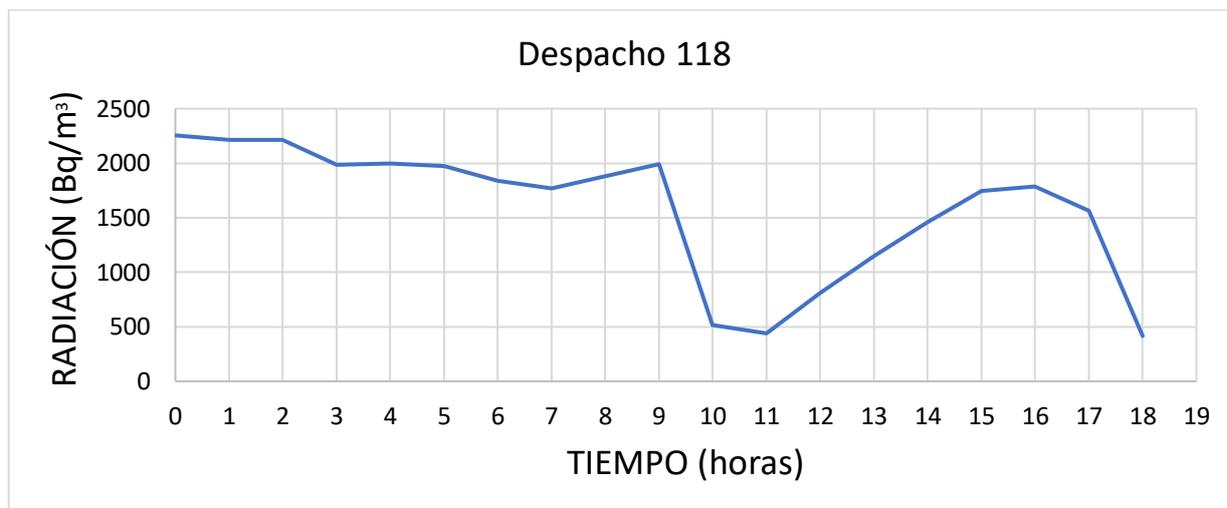
Los objetivos tras finalizar esta fase de ventilación eran los siguientes:

- Medir la velocidad con la que la concentración de radón disminuía con la ventilación.
- Comprobar si, tras cerrar la ventana de nuevo, la concentración aumentaba, o por el contrario seguía descendiendo pero a una velocidad diferente.

Se abrió la ventana a las 08:30 con un nivel de concentración media de 2000 Bq/m<sup>3</sup>.

Tras estar abierta 45 minutos, se cerró a las 09:15 con niveles medios de 1000-1100 Bq/m<sup>3</sup>. A las 10:00 había concentraciones de entorno a 500 Bq/m<sup>3</sup>.

Por la tarde se realizó el mismo procedimiento de 16:15 (1900 Bq/m<sup>3</sup>) a 17:45 (450 Bq/m<sup>3</sup>). Como puede verse, los resultados obtenidos fueron muy similares.



**Figura 4-44 Evolución del radón en día 1 de protocolo de ventilación. Despacho 118.**

Al acabar el día y tras analizar los datos, se comprobó que las velocidades de bajada con la ventana medio abierta fueron de entre 14 y 25 Bq·m<sup>-3</sup>/min.

Por otro lado, después de cerrar la ventana, se registró que la concentración continuaba descendiendo pero a un ritmo inferior, entre 10 y 14 Bq·m<sup>-3</sup>/min.

▪ Día 2

El segundo día de protocolo fue el martes 28 de enero y tuvo lugar tanto en el despacho 118 como en el 114, disponiendo dos medidores en cada uno (se mantiene la apertura de la ventana a la mitad).

Con ello, los objetivos deseados fueron los siguientes:

- Comprobar si, en un despacho sin comportamientos anómalos, el protocolo de ventilación sería suficiente para hacerlo otra vez “habitabile” con 45 minutos de ventilación. En caso negativo, se podría calcular el tiempo mínimo de ventilación en ese despacho para reducir la concentración hasta niveles aceptados por el CTE.
- Comprobar si la velocidad de aumento o descenso de concentración es mayor o menor en función de la cantidad de concentración de radón presente en el habitáculo.

A las 08:30 se abrió la ventana con concentraciones medias de 570 y 2580 Bq/m<sup>3</sup> en los despachos 114 y 118, respectivamente.

A las 09:15 se cerró con 400 y 1400 Bq/m<sup>3</sup>. Pese a estar cerrada, a las 10:00 había 140 y 650 Bq/m<sup>3</sup>.

Por la tarde se realizó el mismo protocolo. A 16:15 había 560 y 3100 Bq/m<sup>3</sup>, y a las 17:45 había descendido hasta los 130 y 700 Bq/m<sup>3</sup>.



Figura 4-45 Evolución del radón en día 2 de protocolo de ventilación. Despacho 114.

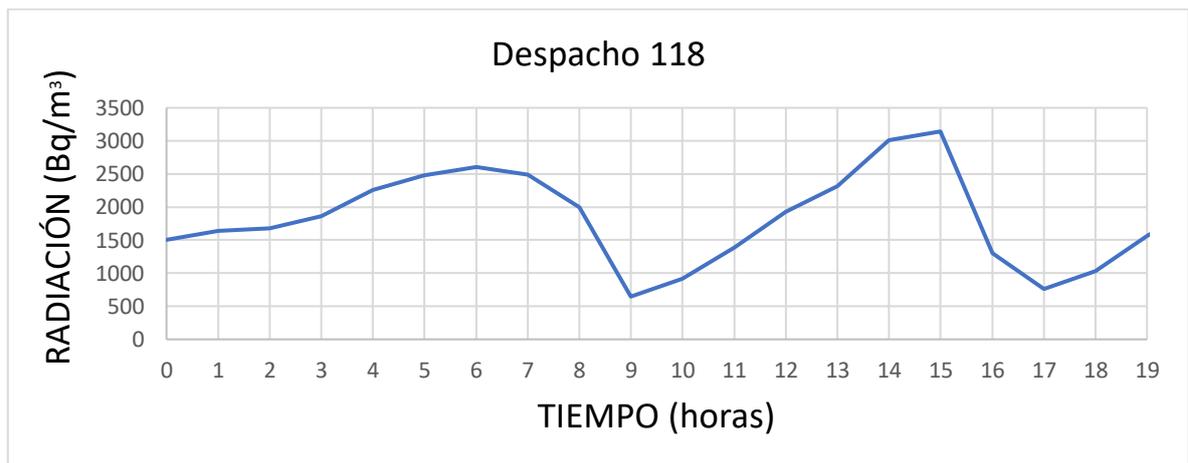


Figura 4-46 Evolución del radón en día 2 de protocolo de ventilación. Despacho 118.

Tras analizar los resultados al final del día se comprobó que con una ventilación de 45 minutos en el despacho 114 se podría disminuir la concentración hasta niveles de entre 100 y 160 Bq/m<sup>3</sup> (la mitad de los estipulado en el CTE).

Por otro lado, en cada despacho se calculó el porcentaje de radón extraído o acumulado tras abrir o cerrar la ventana, respectivamente, y se hizo visible que cuanto más concentración hay en un habitáculo, mayor es la velocidad de ganancia de radón.

▪ Día 3

El tercer día de protocolo fue el miércoles 29 de enero, manteniendo los equipos en los mismos despachos. La diferencia entre este protocolo y el del día anterior radica en la apertura de la ventana (siendo ahora total), y en el aumento del tiempo de apertura de 45 minutos a 1 hora y 30 minutos. Además, se ha estudiado la diferencia de concentración en períodos más pequeños (10 minutos).

A 08:30 se abre la ventana con concentraciones medias de 430 y 2300 Bq/m<sup>3</sup>, en los despachos 114 y 118, respectivamente. A las 10:00 se cierra con 90 y 400 Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente.

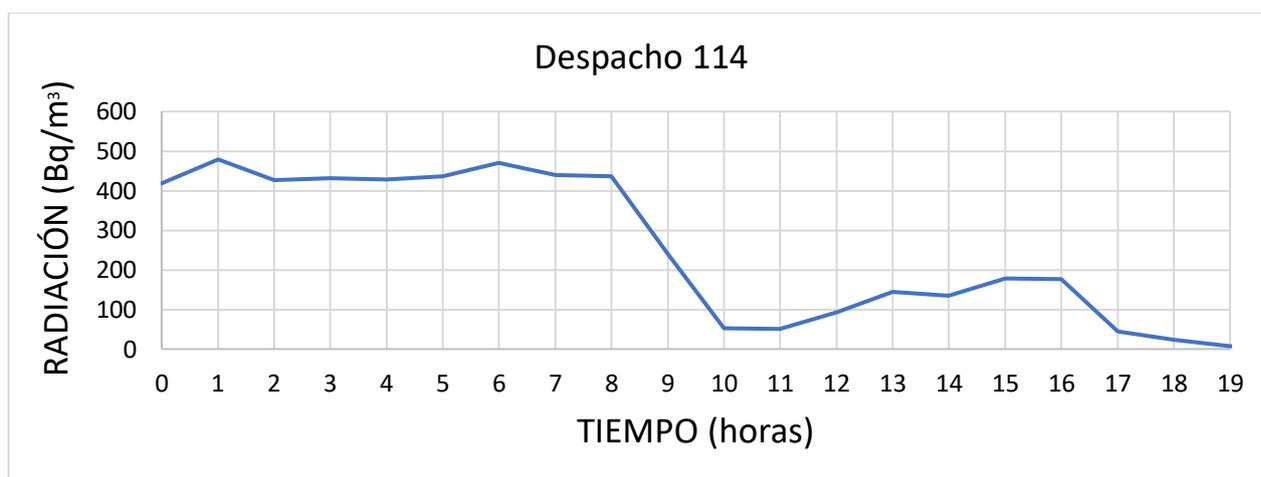


Figura 4-47 Evolución del radón en día 3 de protocolo de ventilación. Despacho 114.

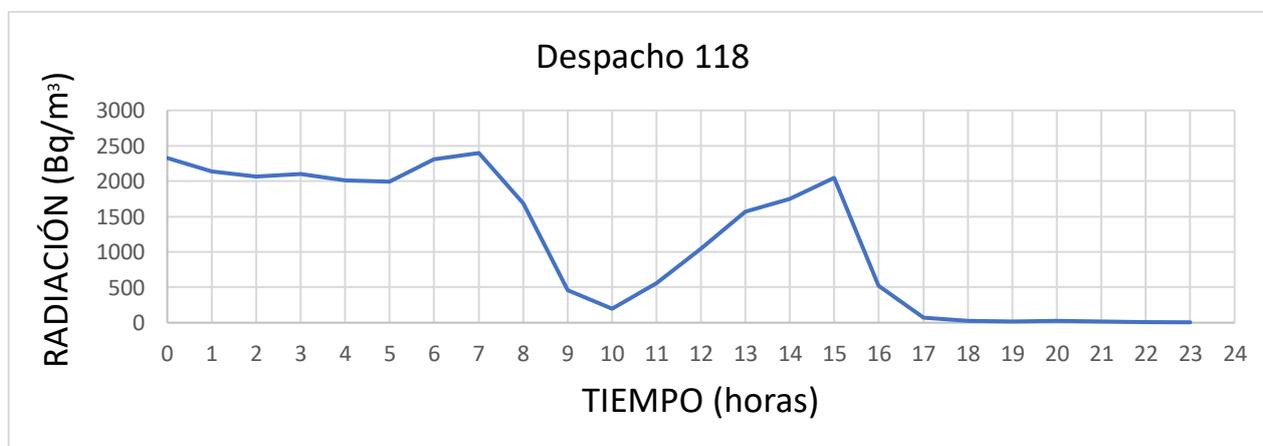


Figura 4-48 Evolución del radón en día 3 de protocolo de ventilación. Despacho 118.

Al principio (durante los primeros 20 minutos de fase de datos) muestra velocidades de descenso de entre 1-2 Bq·m<sup>-3</sup>/min, y 5-18 Bq·m<sup>-3</sup>/min, dependiendo del despacho.

En los siguientes 10 minutos, la velocidad aumenta a 5-7 y 28-45 Bq·m<sup>-3</sup>/min, respectivamente.

A continuación, muestra velocidades de descenso de 4-5 y 45-93 Bq·m<sup>-3</sup>/min.

De ese momento en adelante, comienza a descender hasta llegar a 2-4 y 16-22 Bq·m<sup>-3</sup>/min.

Por la tarde se realizó el mismo protocolo, descendiendo también los valores en la misma magnitud.

Con ventilación de entre 40-45 minutos (ventana y puerta completamente abiertas para que haya corriente), el despacho 114 es capaz de llegar a evacuar el radón necesario para descender la concentración a los límites cercanos ( $294\text{-}314\text{ Bq/m}^3$ ) que establece el CTE ( $300\text{ Bq/m}^3$ ).

Por tanto, sabiendo la conclusión extraída el Día 1 de protocolo que demuestra que tras cerrar todo, la tendencia sigue siendo negativa, podemos afirmar que el tiempo necesario para hacer “habitabile” el despacho 114 sería de entre 35-40 minutos.

Además, este hecho se demuestra viendo la media de concentración de radón durante la jornada laboral de este día, siendo de  $104\text{ Bq/m}^3$ .

Por lo que respecta al despacho 118, su concentración media de radón durante la jornada laboral fue de  $902\text{ Bq/m}^3$ , por lo que en este caso no sería suficiente con abrir ese tiempo.

- Día 4

La intención del protocolo de este día fue comprobar el comportamiento del radón durante el día 30, tras estar la ventana abierta 20 centímetros desde las 18:00 del miércoles 29 de enero, hasta las 08:30 del jueves 30 de enero.

La concentración de radón desde las 19:00 hasta las 08:30 que se cerró la ventana fluctuó desde los 0 hasta los  $18\text{ Bq/m}^3$ . El objetivo fue, por tanto, analizar el tiempo que pasaría desde que se cierra la ventana a las 08:30, hasta llegar a concentraciones que superan lo que establece el CTE. A las 08:30 se cierra la ventana con concentraciones de 3 y  $11\text{ Bq/m}^3$  en los despachos 114 y 118, respectivamente.



Figura 4-49 Evolución del radón en día 4 de protocolo de ventilación. Despacho 114.



**Figura 4-50 Evolución del radón en día 4 de protocolo de ventilación. Despacho 118.**

Tras comprobar los datos registrados por los medidores, se vio que la concentración de radón superaba los 300 Bq/m<sup>3</sup> después de entorno a 1 hora y 45 minutos en el despacho 118. Su media durante la jornada laboral fue de 1075 Bq/m<sup>3</sup>.

Por lo que respecta al despacho 114, la concentración de radón se mantuvo durante todo el día por debajo de los 170 Bq/m<sup>3</sup>, considerando el fin de la jornada laboral a las 18:00 ese día. La media durante la jornada laboral fue de 114 Bq/m<sup>3</sup>.

- Día 5

El objetivo del protocolo del día 5 fue confirmar los resultados del día 4, es decir:

- Comprobar que se volvía a cumplir el comportamiento del despacho 114 (no superar 300 Bq/m<sup>3</sup> en todo el día habiendo tenido la noche anterior la ventana abierta).
- Analizar un despacho próximo al 114 para ver la variación de radón a lo largo del día y comprobar si depende realmente dicha fluctuación de las condiciones meteorológicas o si depende de haber tenido la ventana abierta toda la noche.

Para el segundo objetivo se cambió de localización uno de los dispositivos al despacho 112. El procedimiento que se llevó a cabo fue el mismo que el día anterior, pero el despacho 112 no se ventiló en ningún momento. A las 08:30 comenzó con 101 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que a las 18:00 tenía 193 Bq/m<sup>3</sup>.

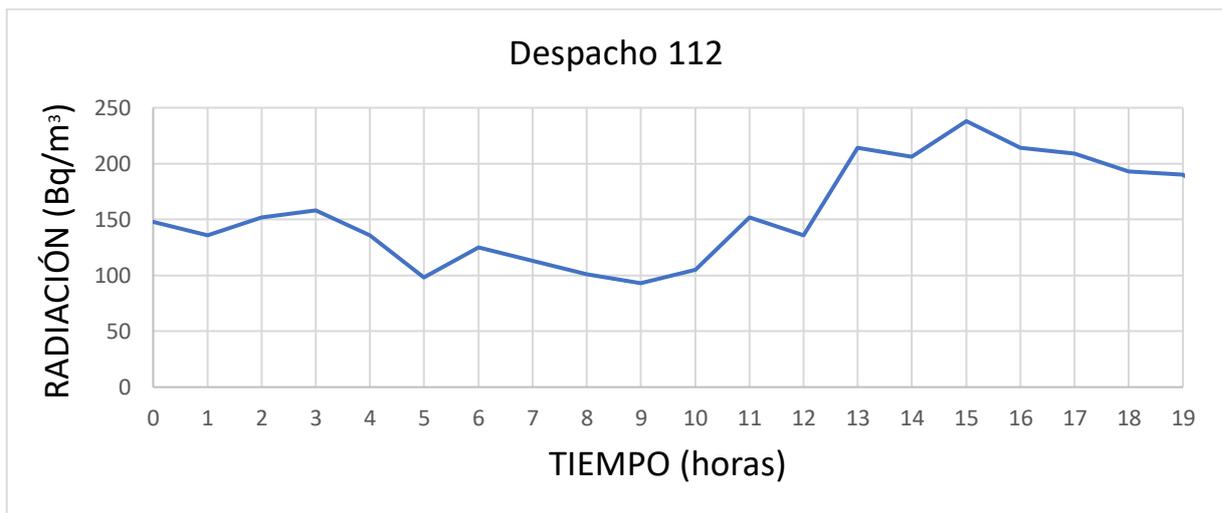


**Figura 4-51 Evolución del radón en día 5 de protocolo de ventilación. Despacho 114.**

Tras analizar los datos se comprobó que el comportamiento del radón en el despacho 114 se mantuvo como en el día anterior:

1. Ventilación toda la noche.
2. Cierre de ventana al inicio de la jornada laboral (14 Bq/m<sup>3</sup>). A 18:00 tenía 122 Bq/m<sup>3</sup>.
3. Concentración máxima de radón durante el día de 239 Bq/m<sup>3</sup>.
4. Concentración media en jornada laboral de 128 Bq/m<sup>3</sup>.

Por lo que respecta al despacho 112, que se mantuvo cerrado durante todo el tiempo, su concentración máxima fue también de 238 Bq/m<sup>3</sup>. Su concentración media de radón en la jornada laboral fue de 170 Bq/m<sup>3</sup>, superior por tanto a la media del despacho 114. Cabe destacar que la concentración de radón en el despacho 112 durante este día fue significativamente inferior a la media habitual en los despachos de la planta baja (Tabla 4-2 y Tabla 4-4).



**Figura 4-52 Evolución del radón en día 5 de protocolo de ventilación. Despacho 112.**

Estos resultados llevan a la conclusión de que el protocolo puede ser eficaz para reducir la exposición al radón durante las primeras horas de jornada laboral, sin embargo, no puede perderse de vista que la acumulación de radón depende de cada día y de las condiciones meteorológicas, por lo que lo más fiable sería aplicar una medida de mitigación permanente.

## 5 PROPUESTA DE MEDIDA DE MITIGACIÓN

### 5.1 Técnicas de protección

Como se ha expuesto anteriormente, el CTE en su apartado de salubridad: “*Sección HS 6 Protección frente a la exposición al radón*”, distingue entre varias medidas de protección según el municipio y la zona en la que se encuentra. Sin embargo, existen otras técnicas de mitigación del radón.

A continuación, se explicarán todas las técnicas posibles para mitigar el gas radón de las edificaciones:

#### ❖ Intervenciones en edificios existentes

- Barreras de protección: consiste en interponer una o varias capas de un material aislante al radón, en este caso en los suelos y paredes de los sótanos y plantas bajas. Su rendimiento es de los más bajos.
- Despresurización activa del suelo (DAS): esta eficiente medida basa su funcionamiento en la instalación de unas arquetas (interiores o exteriores a la casa) o bulbos de depresión, por las que se hará circular el radón, aunque también puede implementarse un sistema de tuberías con un elemento de extracción conectado a la red eléctrica, por lo que trabajaría en continuo.

A esta medida también se le llama extracción forzada y también se emplea en nuevas construcciones (Figura 5-1).

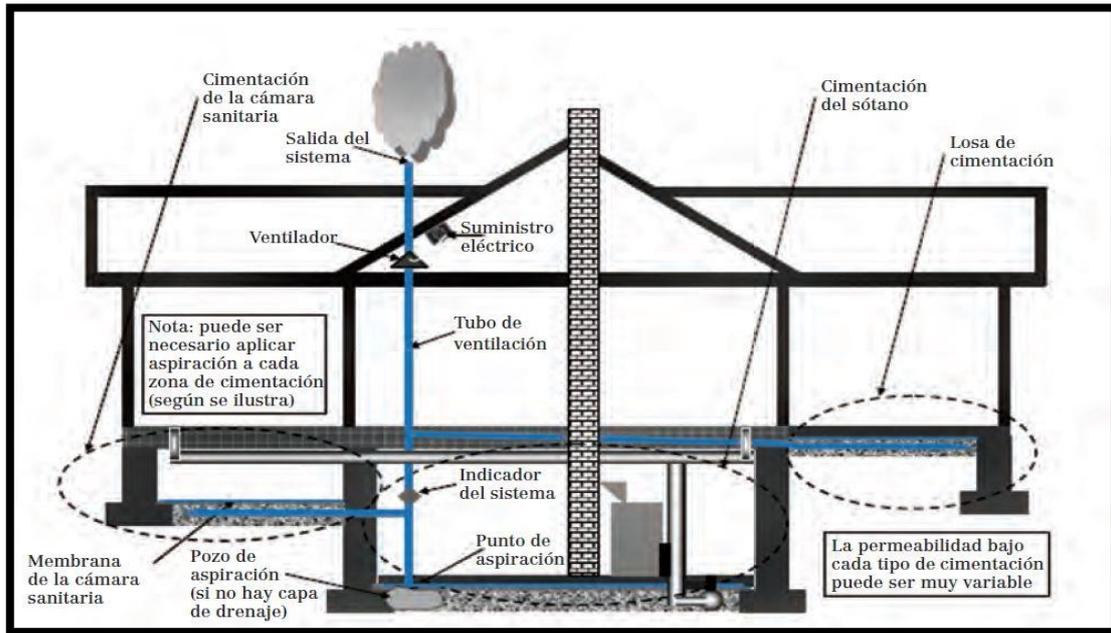


Figura 5-1 Despresurización activa del suelo (DAS) - Fuente: [40]

- Despresurización pasiva del suelo (DPS): con funcionamiento análogo al anterior, pero con la ausencia de dicho elemento eléctrico. Suele emplearse junto a otra medida.
- Ventilación: básicamente es una renovación constante de atmósfera, bien sea de manera natural o de manera forzada. Esta sencilla medida presenta buenos rendimientos para habitáculos con concentraciones de radón pequeñas, sin embargo, presenta un gran inconveniente: pérdida de hermeticidad. Esto conllevaría la instalación a mayores de un sistema que compensara dicha pérdida de calor, como un intercambiador de calor.

Por otro lado hay que destacar que esta medida puede suponer un arma de doble filo, puesto que una insuficiente entrada de aire limpio podría crear una depresión que aumentara la succión de radón, y por consiguiente su concentración (obteniendo así lo contrario al objetivo deseado).

- Extracción exterior: esta medida consiste en una pequeña excavación bajo la solera del edificio para crear un espacio hueco donde el radón tenderá a concentrarse. De esta manera solo se tendrá que instalar un sistema de extracción natural o forzado para proteger la vivienda del gas.
- Sellado de superficies: muy similar a las barreras de protección, se emplea simultáneamente a otras medidas y tiene como objetivo principal evitar la pérdida de aire acondicionado hacia el exterior. Pueden emplearse siliconas acrílicas o selladores de poliuretano expansivo. Presenta un inconveniente: no evita la acumulación del gas, es decir, simplemente impide su paso al interior.

❖ Edificios de nueva construcción

- Barreras de protección: de funcionamiento análogo al anterior, su localización sería entre el terreno sobre el que se edifica y el propio edificio, con el objetivo de impedir el ascenso o paso de este gas hacia el interior de la edificación.  
Es un método eficaz, aunque no es de los mejores dado que solamente impide el acceso a interiores y no elimina la acumulación del gas.
- Despresurización natural del terreno: este método basa su funcionamiento en la implementación de una extracción, natural o forzada, del radón hacia el exterior. Es decir, hacer ascender al radón desde una cámara de aire que se encuentra bajo la edificación hasta el exterior mediante un extractor o chimenea.
- Sistema de presurización: consiste en la creación de una zona de altas presiones bajo el edificio mediante la expulsión de aire desde dentro con un tubo. Con este sistema se consigue que el radón no entre al interior y escoja vías más fáciles por las que salir al exterior.

## 5.2 Contacto con empresas

Durante la realización del TFG se trató de contactar con diversas empresas o fuentes expertas en el sector, concretamente:

- INTERA
- Radon Alfa
- Radon Gal
- Radon Control
- Radon Spain

A continuación, se expone la información obtenida de las empresas con las que finalmente se pudo contactar.

En primer lugar, se habló con RadonSpain [41], empresa situada en la provincia de Pontevedra. Tras hablar con el experto sobre la situación del edificio del CUD, sus niveles de concentración de radón, etc, se llegó a tres posibles medidas que podrían implementarse en el edificio para hacer descender los niveles de radiación:

- 1) Sistema de ventilación. Esta medida implicaría implementar un sistema ventilación mecánica controlada (VMC) de doble flujo, con intercambio de calor entre la corriente de entrada y salida para minimizar las pérdidas energéticas.
- 2) Comprobar la existencia de una cámara de aire bajo el edificio y extraer el radón de manera forzada por los laterales del edificio.
- 3) Barreras de protección. El procedimiento sería levantar el suelo y alojar un serie de láminas de protección para tratar de aislar los despachos.

Las conclusiones a las que se llegó sobre las diferentes propuestas fueron determinantes en la futura toma de decisión de medida de mitigación.

Por un lado, la primera opción es de las más eficientes, aunque tiene como inconveniente la necesidad de un edificio completamente hermético, puesto que de poco serviría tener en un edificio un complejo sistema de ventilación de doble flujo que tuviera pérdidas energéticas considerables.

Por otro lado, la segunda opción puede resultar eficaz pero no se asegura que la cámara de aire exista, por lo que las obras llevadas a cabo hubiesen sido en vano. Además, tras realizar los correspondientes agujeros para comprobar su existencia, habría que implementar la medida en sí, que serían, por ejemplo, unas tuberías para extraer el radón.

Por último, la tercera opción es la menos eficiente y no consigue eliminar al 100% el radón presente bajo el edificio. Esta última medida se descarta casi por completo por la necesidad de levantar todo el suelo del edificio para colocar dicha barrera de protección, lo que resulta inviable económicamente.

En segundo lugar, se contactó con la empresa INTERA (Innovaciones Tecnológicas del Radón) [42], con sede en Santiago de Compostela, puntera en el sector y con grandes resultados obtenidos durante sus proyectos de remediación.

En la Tabla 5-1 se muestran algunos casos de éxito que la empresa ha llevado a cabo:

Lugar	$C_{RN}$ inicial (Bq/m <sup>3</sup> )	Técnica empleada	$C_{RN}$ final (Bq/m <sup>3</sup> )	Rendimiento (%)
Casa unifamiliar en el Padrón	4000	Extracción directa	85	98
Edificio de la USC	1000	Sobrepresión-Dilución	150	80
Vivienda unifamiliar en Ulla	1000	Ventilación del forjado con extracción (arqueta)	138	96

**Tabla 5-1 Casos de éxito de la empresa INTERA**

Durante la realización del TFG, un experto de la empresa accedió a tener una reunión con el alumno, sus tutoras y personal de la Directiva del CUD, para comprobar de primera mano la situación del edificio.

Esta reunión tuvo lugar el jueves 13 de febrero, en la que se trataron temas relacionados con la situación del radón a nivel mundial y en Galicia, procedimientos de medición, etc.

El procedimiento de esta empresa para abordar las altas concentraciones de radón en un edificio suele ser bastante estándar, mientras que las propias medidas de mitigación son muy distintas y personalizadas, según el edificio sujeto a estudio.

Dicho procedimiento suele constar de las siguientes fases:

- 1) Fase de medición. Suele hacerse con Cannister o con medidores de medición en continuo.
- 2) Elaboración de una memoria técnica o Proyecto de ejecución de obra.
- 3) Actuación de mitigación del radón.

En concreto para el caso del edificio del CUD, la empresa INTERA proporciona algunos detalles que a continuación se muestran:

- La fase de medición constaría de 7 puntos de medición en la planta baja y 5 en la primera planta.
- Presupuesto: 1780 €.

Como se ha comentado, las técnicas de INTERA son de las más eficientes hoy en día en el sector, llegando a disminuir un 80% de la concentración de radón en una primera actuación general y global, y continuando con una segunda actuación en los focos restantes de manera más localizada.

De manera paralela, la Dirección del CUD contactó con la empresa de prevención de riesgos laborales Quirón Prevención [43], estableciendo las siguientes indicaciones acerca del procedimiento que emplearía en el edificio del CUD:

- 1) Mediciones con equipos homologados (de traza) durante 3 meses según procedimiento establecido en el CTE.
- 2) Desarrollo de un informe detallado con los datos obtenidos en las mediciones.
- 3) Aplicación de medidas correctoras.
- 4) Nuevas mediciones de comprobación (otra vez de traza durante 3 meses).
- 5) Nuevo informe de situación: si aún supera los 300 Bq/m<sup>3</sup> establecidos, se debe poner en conocimiento del CSN.

El presupuesto que Quirón Prevención estableció para realizar las mediciones de radón en el edificio era de 2000 €. Además, indicaron no solo la necesidad de cumplir la ley, sino de reducirlo al máximo (debe recordarse que la OMS establece un nivel de 100 Bq/m<sup>3</sup>).

### **5.3 Propuesta final**

En el presente subapartado se propondrán diferentes alternativas para reducir la elevada concentración de radón presente en el edificio del CUD. Para ello, además de la opinión de los expertos anteriormente contactados, se tendrán en cuenta las recomendaciones de la Xunta de Galicia (Figura 5-2), en la que establece una guía de medidas de corrección para las diferentes viviendas de la Comunidad Autónoma según su concentración media de radón:

TIPOLOGÍA DE VIVIENDAS			NIVEL CONCENTRACIÓN RADÓN (Bq/m3)	
			MEDIO (300 < x < 600)	ALTO (> 600)
ESPACIO HABITABLE	SOLERA		Ventilación interior	Presurización positiva en interior de vivienda
	FORJADO SANITARIO		Ventilación C.A. de forjado sanitario ó Ventilación interior	Despresurización activa
ESPACIO NO HABITABLE	SOLERA		Sellado + Barrera anti-radón	Barrera anti-radón + Despresurización activa
	FORJADO SANITARIO		Sellado + Ventilación C.A. de forjado sanitario	Barrera anti-radón + Ventilación forzada C.A. de forjado sanitario

Figura 5-2 Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes. Xunta de Galicia.

Según esta guía, en la mayor parte de los despachos del CUD podría ser suficiente con ventilación, excepto en el despacho 118.

A continuación, se explican diferentes medidas que se recomienda adoptar con el objetivo de reducir la concentración de radón en el edificio del Centro Universitario de la Defensa.

Estas medidas están ordenadas según el grado de “facilidad” con la que se llevarían a cabo.

### 1. Ventilación natural:

- Una de las condiciones para que esta medida sea eficiente es que las ventanas se encuentren abiertas en contraposición, es decir, que exista la corriente suficiente y necesaria para poder renovar la atmósfera.

Esta medida se podría llevar a cabo realizando un protocolo de ventilación oficial por parte del CUD. Para ello, el centro designaría a cierto personal para ventilar los despachos, seminarios y diferentes salas con el fin de evitar la acumulación del gas radón en su interior.

Se adjunta como anexo un posible registro de dicho protocolo (ver Anexo I: Registro de protocolo de ventilación). El tiempo de apertura de ventanas depende de las condiciones meteorológicas de cada día, puesto que el radón es muy impredecible. Sin embargo, se recomienda comenzar con un período de apertura de ventanas de 45 minutos.

Este período de ventilación se recomienda realizarlo en ambas plantas, en todos los despachos y seminarios. De esta manera se asegura la correcta renovación de atmósfera. Además, es importante realizarlo a primera hora de la mañana, antes del comienzo de la jornada laboral. Si la medida resultara eficiente, podría considerarse no abrir todos los despachos y hacerlo de manera alterna.

- Otro hecho que impediría la acumulación del gas radón en el interior de los habitáculos sería la implementación de unas “rejillas de gas” en las paredes y puertas del edificio (Figura 5-3). De esta manera se permitiría la ventilación constante y la extracción lenta, pero eficaz, del gas.



**Figura 5-3 Rejilla en puerta de habitación**

- El edificio del CUD cuenta con un sistema de climatación compuesto por bombas de calor que recirculan el agua hacia unos fan-coils situados en cada uno de los despachos. El aire proviene de la aspiración exterior (conducido por unas tuberías) y del propio aire de los despachos que asciende por el techo poroso. Este aire mezclado en la cámara superior está frío, por lo que se precalienta antes de impulsarlo por los ventiladores hacia dentro del despacho otra vez.

El sistema de renovación del aire funciona de forma independientemente del sistema de climatación. Por tanto, siempre existe una renovación de atmósfera en los despachos. Sin embargo, este sistema está temporizado de lunes a viernes y de 06:00 a 18:00 (sábados y domingos no funciona). Además, se tiene dos circuitos y dos temporizadores, uno para cada planta.

La propuesta es, por tanto, aumentar esos períodos de temporización pese al mayor gasto energético (derivado de la impulsión del aire y de una mayor necesidad de climatización). Inicialmente podría aumentarse al máximo, es decir, de manera continua (24 horas al día, incluidos los fines de semana). De esta manera, y mediante una correcta monitorización de la concentración de radón, podría determinarse si la medida es eficiente, pudiendo disminuir el tiempo de temporización hasta alcanzar el

óptimo que permita mantener unas condiciones de habitabilidad saludables para el personal docente.

Por otra parte, en comparación con la medida de ventilación natural abriendo ventanas, tiene como ventaja que se realiza de manera automática y en todos los despachos de manera simultánea.

2. Revisión de los habitáculos generales del edificio. Esta medida constaría de las acciones que a continuación se enumeran:

- Retirar los enchufes y comprobar su hermeticidad, valorando la posibilidad de introducir siliconas que garantizaran su estanqueidad.
- Encontrar posibles grietas y sellarlas.
- Comprobar si entre los falsos techos y la cámara de las paredes hay comunicación, y en el caso de haberla, cerrarla para no permitir el ascenso del radón.
- Comprobar la influencia del pladur en la inmisión del radón hacia el interior de los habitáculos por ser poroso.
- Determinar si por el hueco del ascensor se produce un ascenso del radón debido al vacío generado por el ascensor, o un ascenso también producido cuando baja porque el ascensor ocupa ese espacio.
- Valorar emplear pinturas plásticas en algún habitáculo en concreto para proporcionar el sellado de la habitación.
- Sellar posibles arquetas del subsuelo. De esta manera, con una arqueta bien hermética se puede conducir el gas radón por unas tuberías y extraerlo sin dificultad al exterior.

3. Ventilación forzada: el principio sería básicamente de impulsión en la entrada y extracción en la salida. Para ello podría emplearse un pequeño ventilador de baja potencia que pudiera extraer el gas radón fuera del habitáculo.

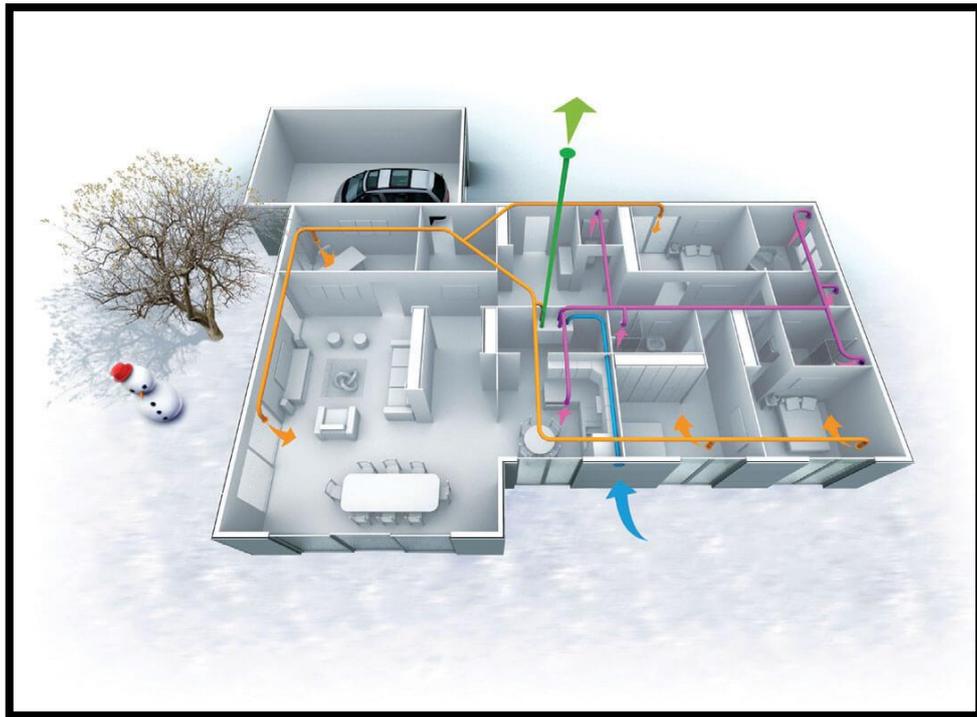
Este sistema puede equiparse a uno de presurización positiva, como el necesario según las recomendaciones de la Xunta de Galicia (Figura 5-2).

4. Implementación de una arqueta “trampa” para extraer el radón del subsuelo.

5. Levantar el suelo de la planta baja para forzar el paso de aire en el subsuelo.

6. Climatización mediante un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC) de doble flujo (Ver Figura 5-4). Este sistema permite extraer el aire viciado de una habitación y lo renueva con aire del exterior.

La ventaja de esta medida es la proximidad entre las temperaturas del aire de salida y el de entrada, hecho que se consigue al poner en contacto ambos fluidos mediante tuberías.



**Figura 5-4 Sistema de VMC - Fuente: [43]**

Todas las medidas arriba mencionadas se aplicarían de manera secuencial, es decir, se debería aplicar en orden, estudiando su efectividad y valorando la necesidad de implementar las siguientes.



## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 6.1 Conclusiones

El TFG realizado ha contado con diferentes fases. Por una parte, se llevó a cabo una investigación en estudios científicos relacionados con el gas noble radón. De esta manera pudo verse la importancia que está adquiriendo a nivel mundial, y la preocupación que está creando en la sociedad científica. Por otra parte, se cuenta con los datos medidos durante los meses de diciembre y enero, que aportan información acerca del comportamiento del radón dentro del edificio del CUD.

Además, se realizó un protocolo de ventilación con el que se pudo extraer datos para la correspondiente medida de mitigación.

A continuación, se detallan las principales conclusiones extraídas tras la realización del TFG:

- 1) La preocupación social y científica acerca del radón está en exponencial aumento debido a las muertes que provoca año a año de manera silenciosa a nivel mundial.
  
- 2) El análisis de los diferentes artículos y estudios científicos proporciona una idea de las relaciones que tiene este gas con algunas enfermedades (algunas totalmente confirmadas como el cáncer de pulmón y otras aún por validar mediante más investigación), de la importancia de estudiarlo en medios naturales como el agua (debido a su consumo y posible influencia en la salud humana), su posible implementación como indicador de seísmos inminentes o su dependencia con distintos factores meteorológicos (que hacen que su concentración aumente o disminuya).
  
- 3) Los datos registrados durante las diferentes fases de estudio del TFG generan gran alarma tanto en la planta baja del CUD, que llega a tener niveles de concentración de radón de entre 700 y 3700 Bq/m<sup>3</sup>, como en la primera planta, llegando a registrar habitáculos con más de 300 Bq/m<sup>3</sup>, como el despacho 217 y el Office del CUD.
  
- 4) Las medias de concentración de radón registradas en el edificio del CUD superan los límites estipulados por normativa europea y nacional (300 Bq/m<sup>3</sup>). Como determina la IS-33 del CSN, el nivel máximo de radón para la jornada laboral será de 600 Bq/m<sup>3</sup>.

Comparando ese nivel con los del CUD, se determina que hay despachos con más de tres veces dicho valor, habiendo otros despachos con valores muy cercanos.

Como establece la instrucción correspondiente, para los edificios donde se desarrollen actividades con alta permanencia, el límite de intervención será de 300 Bq/m<sup>3</sup>. El CUD, por tanto, puede considerarse como tal, por lo que no cumpliría ni con la normativa actual a nivel nacional o europeo, ni las recomendaciones de la OMS (100 Bq/m<sup>3</sup>).

- 5) Los equipos empleados durante la realización del presente TFG tienen un límite de medición de radón muy bajo para los niveles que se pueden llegar a encontrar en zonas de Galicia como Pontevedra.
- 6) Es por ello por lo que se hace notable la necesidad de dotar al CUD de la ENM de equipos de medición de radón más sofisticados, con límites superiores mucho más grandes que los del RadonEye (3696 Bq/m<sup>3</sup>), como por ejemplo el AlphaGuard (2 – 2.000.000 Bq/m<sup>3</sup>, con 3% error), que además permite medir las concentraciones de radón en agua y en los materiales de construcción. Se hace obvia la existencia de un foco de radón externo al edificio del CUD (no debido al material de construcción) debido a los diferentes y dispares valores obtenidos en los diferentes despachos a lo largo de la realización del TFG.

En concreto se trata del despacho 118, que contiene niveles de radiación superiores a los 3700 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que despachos contiguos (a una distancia no mayor de diez metros) no contienen medias superiores a los 600 Bq/m<sup>3</sup>.

- 7) El comportamiento del radón es muy complejo, y su ciencia poco estudiada y muy relativa a los parámetros característicos de cada área donde se encuentra. Además, como se ha expuesto, no se puede establecer un protocolo totalmente fiable y sistemático que estudie el comportamiento del radón en todos los edificios, sino que dependerá de las condiciones de cada uno, puesto que el radón es muy cambiante incluso en entornos muy cercanos, hecho demostrado en este TFG.

Por ello, para la mitigación de radón en cualquier edificio, no se tendrá en cuenta una única medida de mitigación estándar, sino que se estudiará en profundidad dicho edificio, evaluando las diferentes alternativas y juntándolas para sacar la máxima eficiencia de ellas.

- 8) La falta de control en aperturas de ventanas y puertas, y de la recirculación del aire debido al sistema de ventilación, han complicado el estudio de los diferentes despachos, impidiendo conocer con certeza el comportamiento del gas radón en el edificio del CUD.
- 9) Tras los análisis correspondientes del radón con respecto a la influencia de los parámetros meteorológicos, se llega a la conclusión de la estrecha relación entre la concentración de radón y parámetros como el viento, teniendo mucha menos influencia el resto de los parámetros (humedad, temperatura, presión y precipitaciones).

En cualquier caso, los parámetros meteorológicos no son suficientes para explicar las grandes variaciones en la concentración de radón observadas con el tiempo.

Con relación a los otros parámetros, resulta curioso cómo el CSN y el Doctor Frutos establecen unos parámetros como más influyentes, y en el presente TFG no muestran tanta influencia en la concentración de radón.

- 10) El protocolo de ventilación realizado aporta datos concluyentes en lo referente a tiempos aproximados de ventilación en el CUD para disminuir la concentración de radón hasta niveles permitidos por la normativa. Se recomienda, por tanto, un período de apertura de ventanas de 45 minutos con un protocolo de ventilación oficial llevado a cabo por personal del CUD, además del aumento de renovación de atmósfera interior con los correspondientes temporizadores del edificio del CUD.

Mediante la realización de esta ventilación sistemática puede determinarse la nueva concentración media en jornada laboral y comprobar la eficacia de la medida propuesta. En caso de que no fuese suficiente, se deberán aplicar otro tipo de medidas más eficientes pero más costosas económicamente, como por ejemplo implementar una arqueta bajo el edificio, o una climatización mediante un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC) de doble flujo.

## 6.2 Líneas futuras

El presente TFG basado en las concentraciones de radón en un edificio de la Escuela Naval Militar sirve como precedente a posibles estudios o líneas futuras desarrollados en este centro docente.

Algunas de estas líneas de futuro son las siguientes:

- 1) Posibilidad de futura colaboración entre el Centro Universitario de la Defensa y la Universidad de Santiago de Compostela (USC), donde se encuentra RadonLab [44], compuesto por investigadores de la USC, y también el Laboratorio de Radón en Galicia [45], en el que trabaja Alberto Ruano-Raviña, también miembro del Centro de Investigación Biomédica en Red de Epidemiología y Salud Pública (CIBERESP). De esta manera se conseguirían líneas de investigación muy interesantes entorno al gas radón en Galicia.
- 2) Desarrollo de un software de predicción del comportamiento de radón en edificios de la ENM dadas las características del habitáculo en concreto, época del año, fenómenos meteorológicos, materiales de construcción del edificio, etc.
- 3) Procedimiento de estandarización de medición y medidas de mitigación en la ENM para extrapolación a edificios similares en la misma zona geográfica.
- 4) Con el anterior procedimiento estandarizado en un edificio de una base militar (ENM), llevar a cabo otros estudios análogos en bases de la Armada Española como las de Ferrol, Cádiz, Cartagena o Canarias.
- 5) Para conocer los límites de radón en otros recintos militares como las academias correspondientes a los Ejércitos de Tierra y Aire, abrir líneas de investigación entre los tres CUD's de los que dispone el Ministerio de Defensa.
- 6) Ampliar los estudios de medición al ámbito puramente naval, es decir, realizar mediciones en buques de la Armada, tanto en la mar durante las navegaciones como en puerto estando atracados.
- 7) Para asegurar las condiciones laborales y de habitabilidad de los diferentes edificios de la ENM, llevar a cabo estudios focalizados en un único lugar durante un período de larga duración para su correcta monitorización.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

En este apartado se muestran las diferentes fuentes de información empleadas para la realización del Trabajo de Fin de Grado:

- [1] «RTVE,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.rtve.es/television/20191107/dia-europeo-del-gas-radon-segunda-causa-cancer-pulmon-tras-tabaco/1989085.shtml>.
- [2] Organización Mundial de la Salud, «WHO,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [3] «Control y gestión de obras,» [En línea]. Available: <https://controlygestiondeobras.es/gas-radon/>.
- [4] «Redacción médica,» [En línea]. Available: <https://www.redaccionmedica.com/secciones/neumologia/-el-radon-es-responsable-de-un-numero-significativo-de-canceres-de-pulmon--6448>.
- [5] G. Muñoz Yébenes, Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar, 2019.
- [6] «La Voz de Galicia,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.lavozdegalicia.es/noticia/sociedad/2015/01/17/alberto-ruano-cancer-radon-mayor-exposicion-ambiental-tabaco/0003\\_201501G17P27991.htm](https://www.lavozdegalicia.es/noticia/sociedad/2015/01/17/alberto-ruano-cancer-radon-mayor-exposicion-ambiental-tabaco/0003_201501G17P27991.htm).
- [7] «Faro de Vigo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.farodevigo.es/sociedad/2019/06/26/cinco-viviendas-ourense-pontevedra-supera/2129989.html>.
- [8] «El Mundo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/madrid/2019/07/18/5d30503821efa0b3418b4589.html>.
- [9] «El País,» 2019. [En línea]. Available: [https://elpais.com/sociedad/2019/11/28/actualidad/1574966107\\_501969.html](https://elpais.com/sociedad/2019/11/28/actualidad/1574966107_501969.html).
- [10] «Hoy,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.hoy.es/extremadura/junta-prepara-guia-20191128124440-nt.html>.

- [11] «La Voz de Galicia,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.lavozdegalicia.es/noticia/deza/silleda/2020/02/12/gas-radon-situa-segunda-causa-muerte-despues-tabaco/0003\\_202002D12C3991.htm](https://www.lavozdegalicia.es/noticia/deza/silleda/2020/02/12/gas-radon-situa-segunda-causa-muerte-despues-tabaco/0003_202002D12C3991.htm).
- [12] «La Voz de Galicia,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.lavozdegalicia.es/apw\\_hrd/login.php?apw-origin=https://www.lavozdegalicia.es/noticia/arousa/meano/2020/02/16/dedicamos-esfuerzo-tabaco-radon-presta-atencion/0003\\_202002A16C5994.htm](https://www.lavozdegalicia.es/apw_hrd/login.php?apw-origin=https://www.lavozdegalicia.es/noticia/arousa/meano/2020/02/16/dedicamos-esfuerzo-tabaco-radon-presta-atencion/0003_202002A16C5994.htm).
- [13] Consejo de la Unión Europea, DIRECTIVA 2013/59/EURATOM DEL CONSEJO de 5 de diciembre de 2013, 2013.
- [14] «El País,» 2019. [En línea]. Available: [https://elpais.com/sociedad/2019/11/28/actualidad/1574966107\\_501969.html](https://elpais.com/sociedad/2019/11/28/actualidad/1574966107_501969.html).
- [15] Consejo de Seguridad Nuclear, Instrucción IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
- [16] Consejo de Seguridad Nuclear, Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes.
- [17] Ministerio de Fomento, «Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.».
- [18] «Código Técnico,» [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/index.html>.
- [19] Organización Mundial de la Salud, «WHO,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [20] «Scopus,» [En línea]. Available: <https://www.scopus.com/home.uri>.
- [21] Consejo de Seguridad Nacional, Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios.
- [22] Borja Frutos Vázquez, Estudio experimental sobre efectividad y viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones.
- [23] S. S. Y. W. J. Jin-Kyu Kang, «Health Effects of Radon Exposure».
- [24] A. D.-U. J. M. B.-D. K. T. K. Alberto Ruano-Ravina, «Radon exposure and tumors of the central nervous system».
- [25] National Center for Biotechnology Information, «NCBI,» [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>.
- [26] Laboratorio de Radiactividad Ambiental, «El gas Radón en el ámbito Laboral».
- [27] VV.AA., «Cáncer de pulmón y radón residencial en no fumadores: un estudio de agrupación en el noroeste de España.».
- [28] «RadonSpain,» [En línea]. Available: <https://www.radonspain.com/radon-en-el-agua.htm>.
- [29] Consejo de la Unión Europea, «Directiva 2013/51/Euratom del Consejo de 22 de octubre de 2013».
- [30] Ministerio de la Presidencia, «Real Decreto 314/2016 de 29 de julio de 2016».

- [31] J. W. L. L.-V. L. C. Kevin Kelleher, «International Rn-222 in drinking water interlaboratory comparison».
- [32] H. Alonso, «Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer».
- [33] O. R. O. Janet A. Ademola, «Radon-222 from different sources of water and the assessment of health hazard».
- [34] «El País,» 1997. [En línea]. Available: [https://elpais.com/diario/1997/05/23/espana/864338428\\_850215.html](https://elpais.com/diario/1997/05/23/espana/864338428_850215.html).
- [35] IBERFAULT, «Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico,» 2014.
- [36] Instituto de Ciencias del Mar, 2015. [En línea]. Available: [http://icmdivulga.icm.csic.es/camp\\_shake\\_objectius/?lang=ca](http://icmdivulga.icm.csic.es/camp_shake_objectius/?lang=ca).
- [37] Instituto Geográfico Nacional. [En línea]. Available: <http://www.ign.es/web/resources/sismologia/estaciones/estaciones.html>.
- [38] «iButton,» [En línea]. Available: <https://ibutton.cl/product/datalogger-temperatura-humedad-hygrochron-ds1923/>.
- [39] «Meteo Galicia,» [En línea]. Available: <https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=19060>.
- [40] «Simulaciones y proyectos,» [En línea]. Available: <https://www.simulacionesyproyectos.com/el-gas-radon/>.
- [41] «Radon Spain,» [En línea]. Available: <https://www.radonspain.com/>.
- [42] «INTERA,» [En línea]. Available: <https://www.intera.es/>.
- [43] «Quirón Prevención,» [En línea]. Available: <https://www.quironprevencion.com/es/>.
- [44] «Siberzone,» [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/>.
- [45] «RadonLab,» [En línea]. Available: <https://igfae.usc.es/radonlab/>.
- [46] «Radón Galicia,» [En línea]. Available: <http://radon.gal/>.



## ANEXO I: REGISTRO DE PROTOCOLO DE VENTILACIÓN

A continuación, se muestra una propuesta de registro que llevaría a cabo el personal designado diariamente.



REGISTRO OFICIAL DE VENTILACIÓN – EDIFICIO DEL CUD



DESPACHO:

Fecha	Hora apertura mañana	Hora cierre mañana	Hora apertura tarde	Hora cierre tarde	Persona responsable	Firma	Observaciones
23/03/2020							
24/03/2020							
25/03/2020							
26/03/2020							
27/03/2020							
30/03/2020							
31/03/2020							
01/04/2020							
02/04/2020							
03/04/2020							

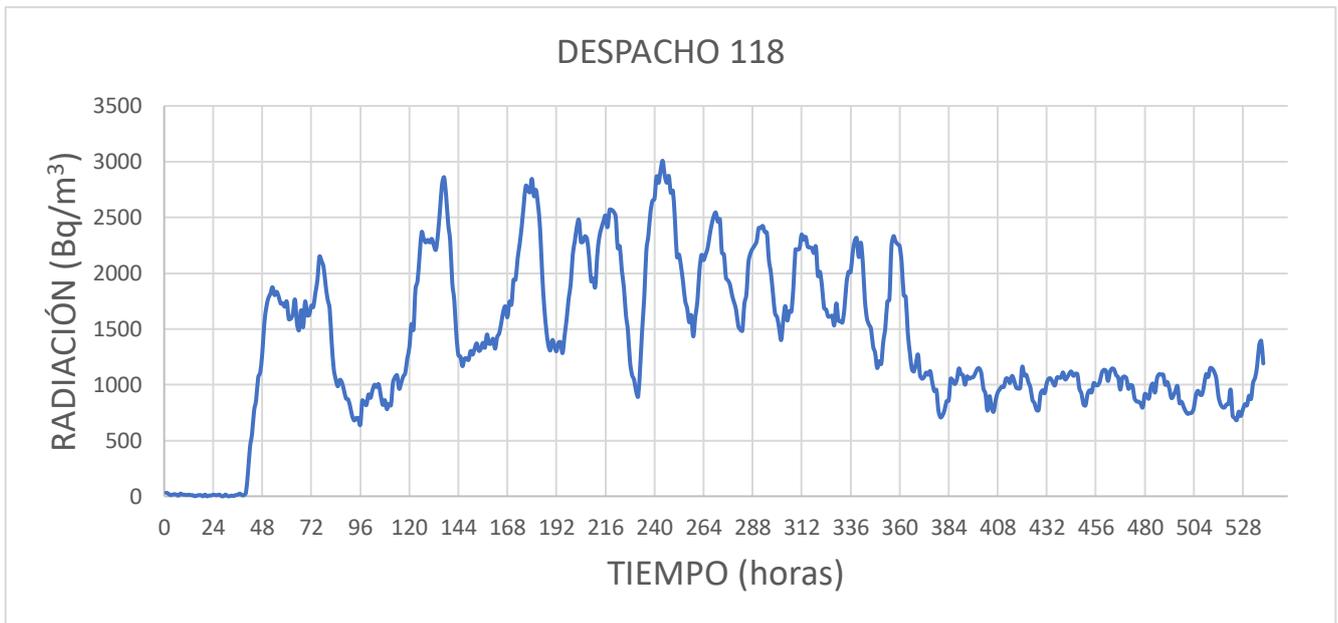
Figura A1 - 1 Registro de protocolo de ventilación

## ANEXO II: GRÁFICAS DE LAS DIFERENTES FASES POR LUGAR DE ESTUDIO

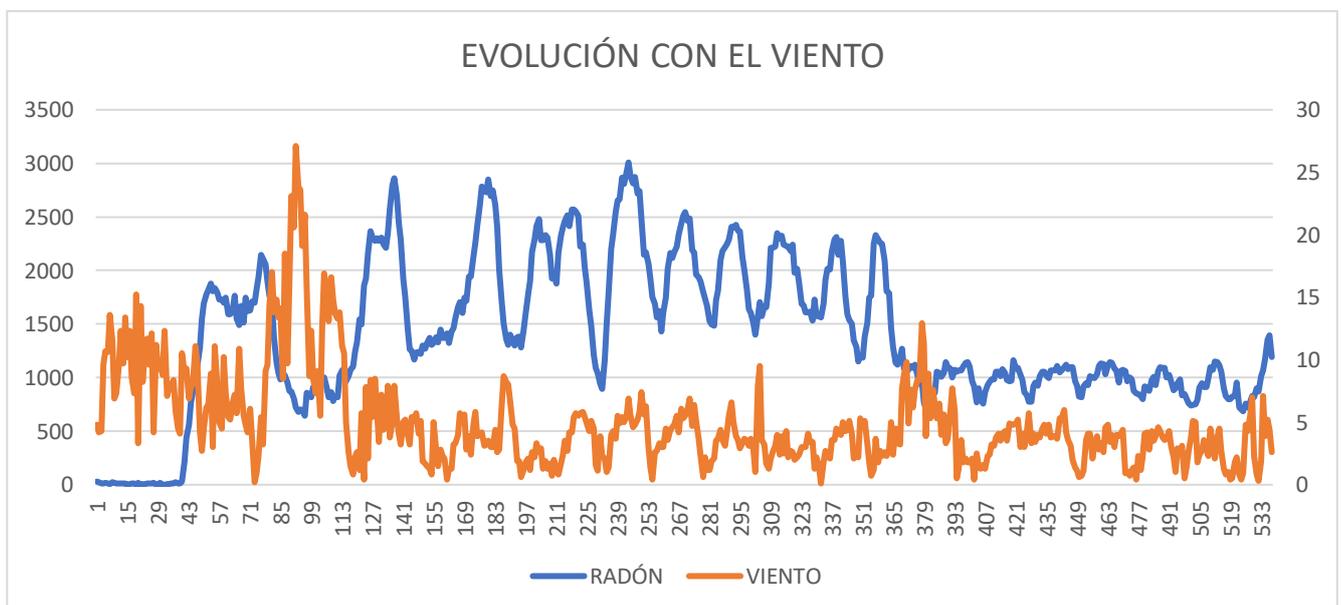
En el presente anexo se incluyen todas las gráficas obtenidas en las Fases 2 y 3, organizadas por lugar de estudio. Es importante decir que no todas las gráficas tienen unidades, puesto que son las mismas que las expresadas durante la memoria: viento en Km/h, lluvia en L/m<sup>2</sup>, temperatura en °C y presión en hPa.

### 1) FASE 2

- DESPACHO 118



**Figura A2 - 1**



**Figura A2 - 2**

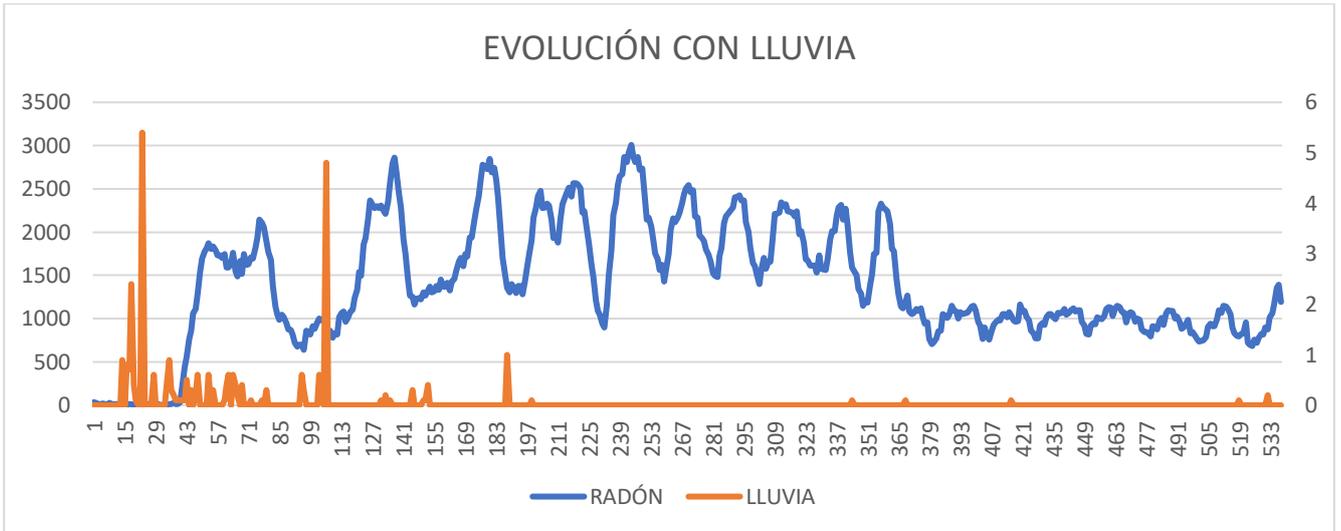


Figura A2 - 3

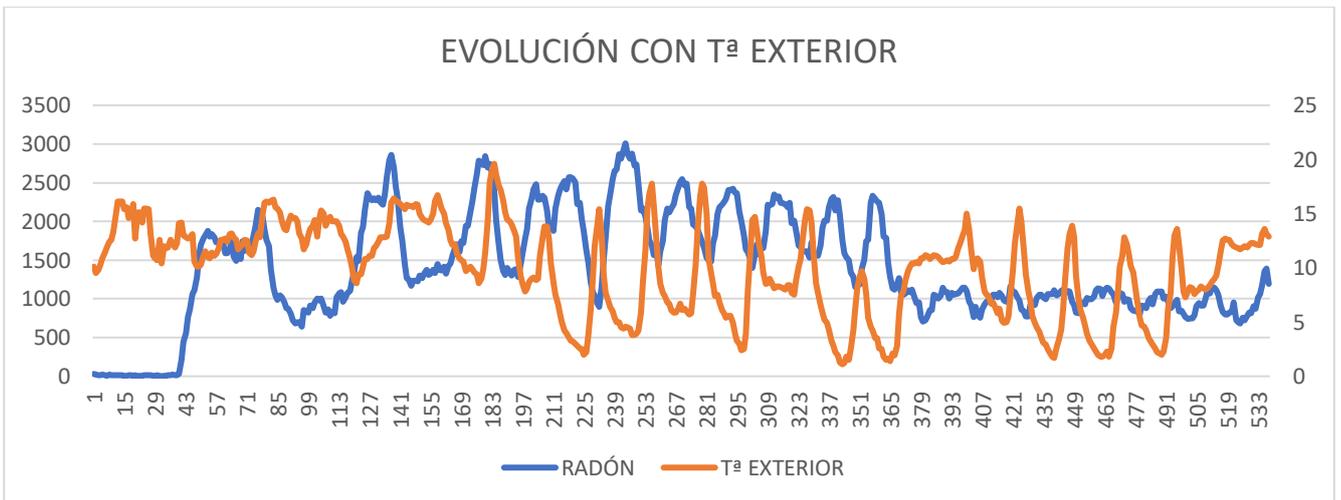


Figura A2 - 4

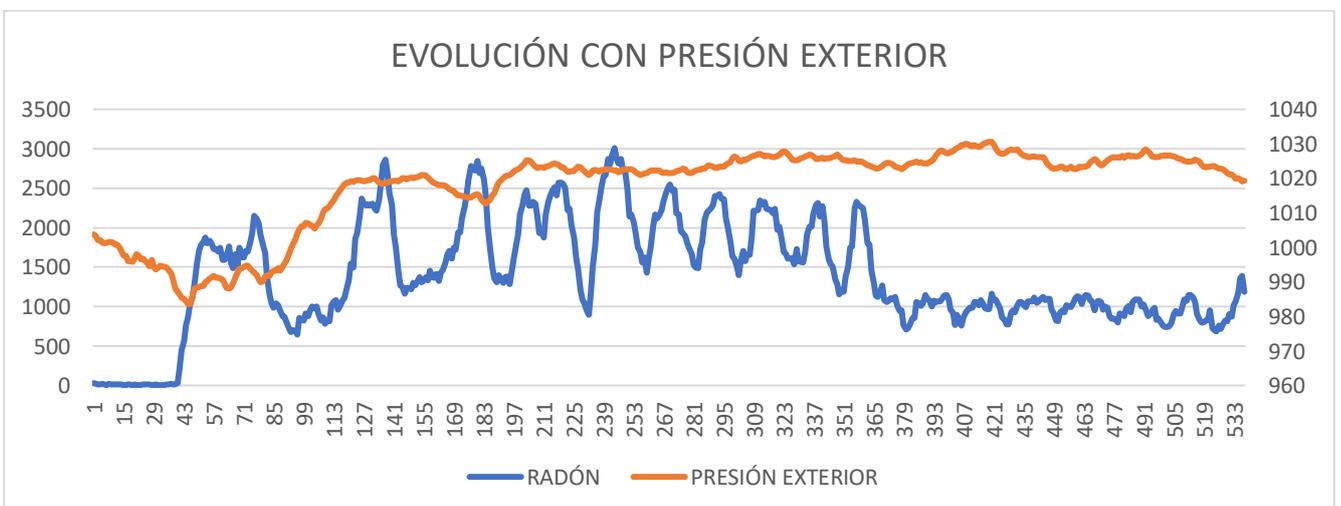


Figura A2 - 5

● DESPACHO 114

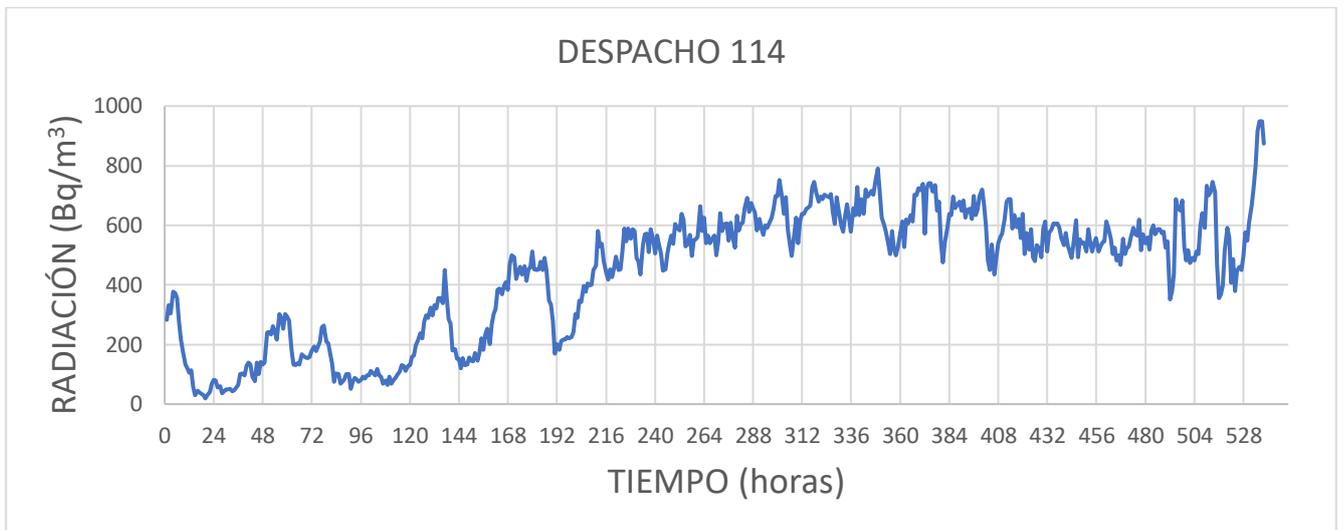


Figura A2 - 6

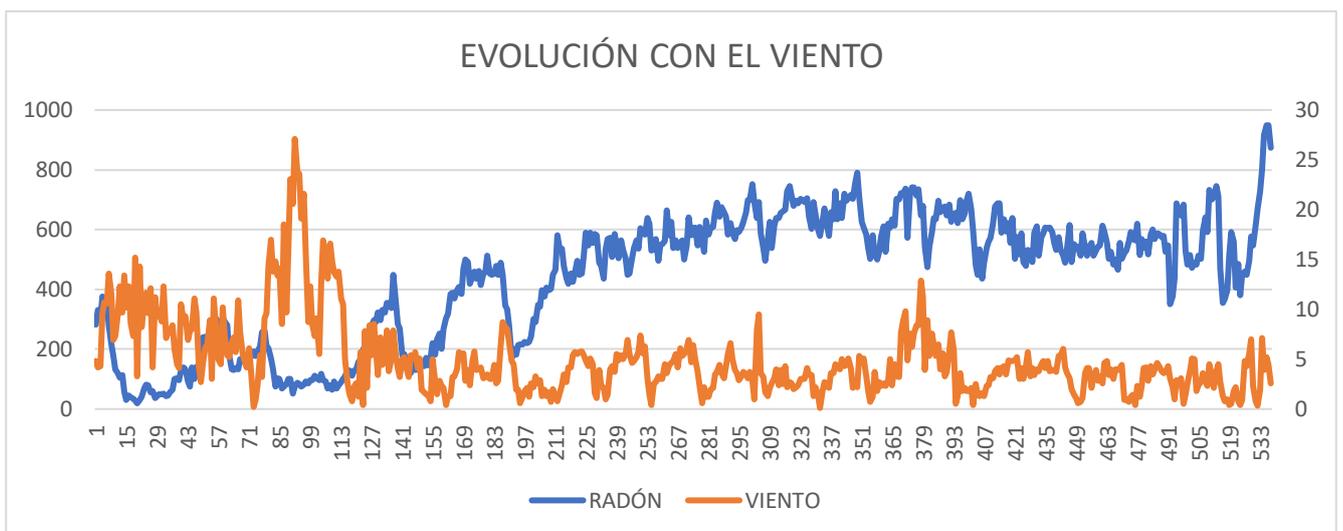


Figura A2 - 7

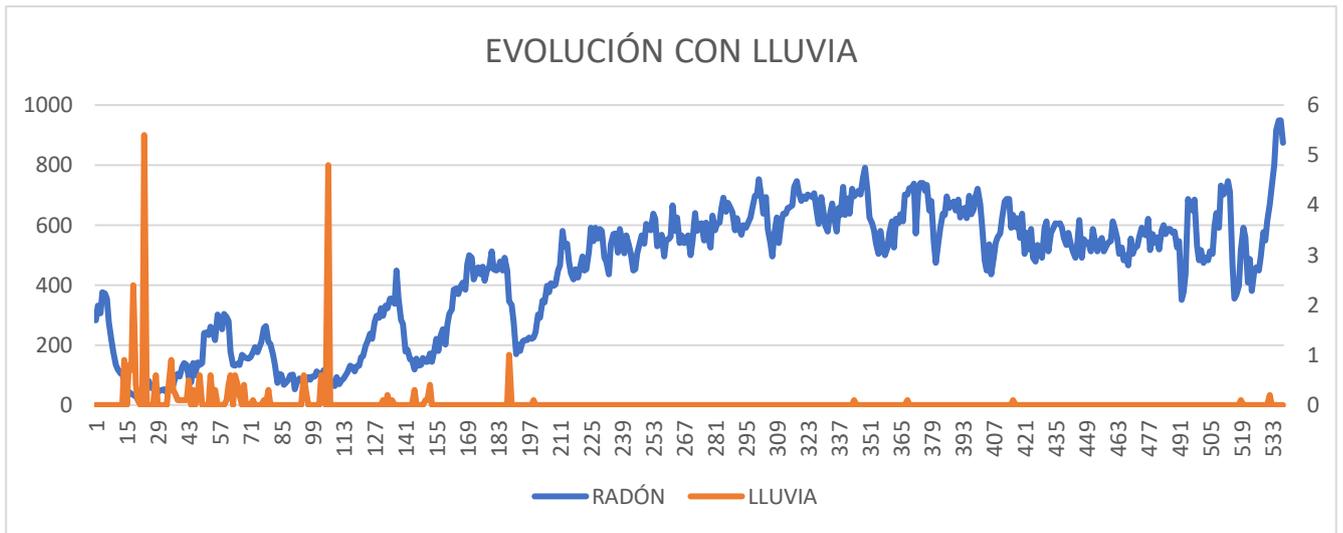


Figura A2 - 8

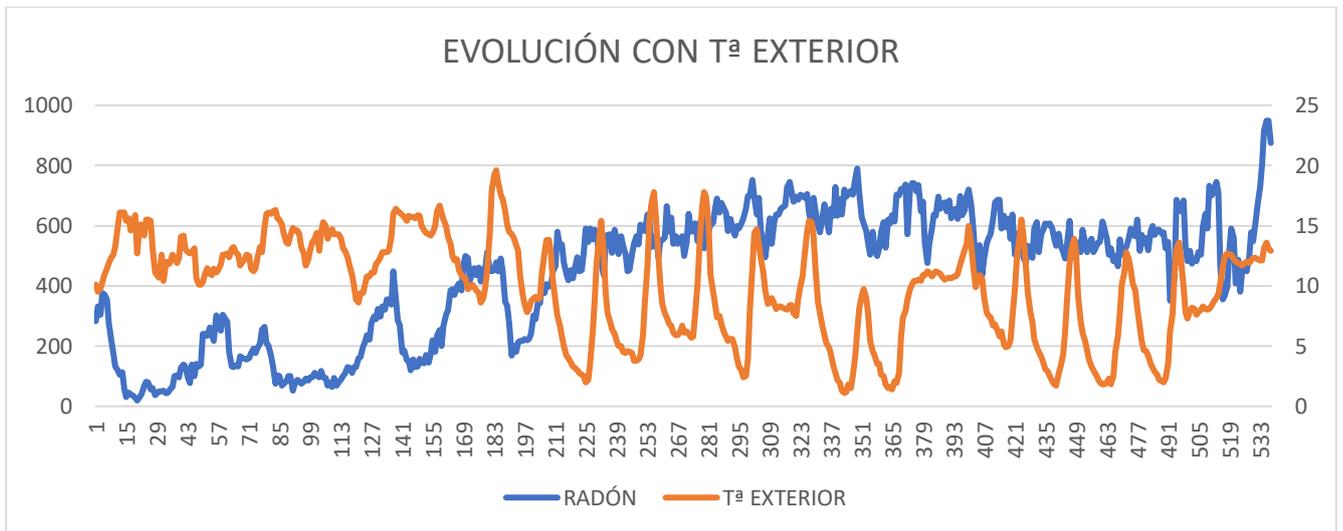


Figura A2 - 9

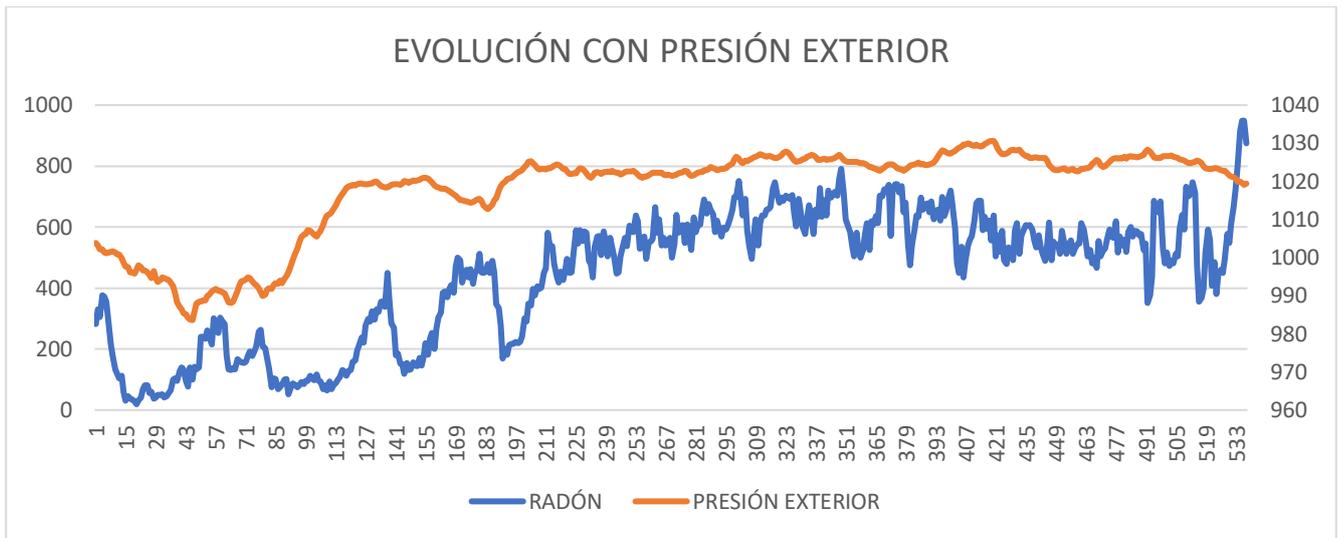


Figura A2 - 10

- SEMINARIO 1

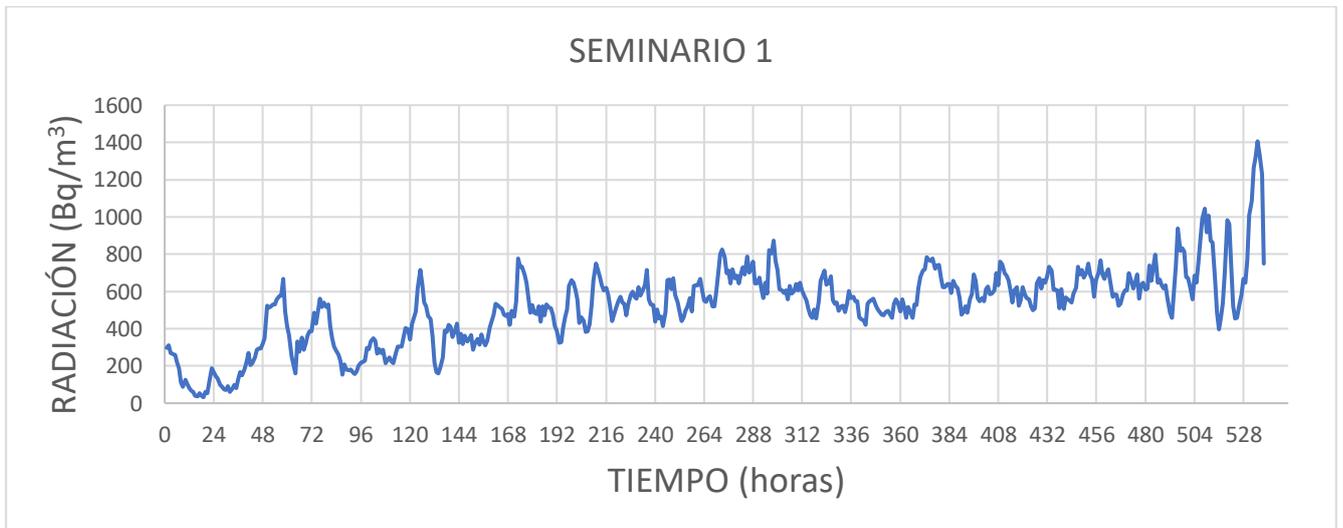


Figura A2 - 11

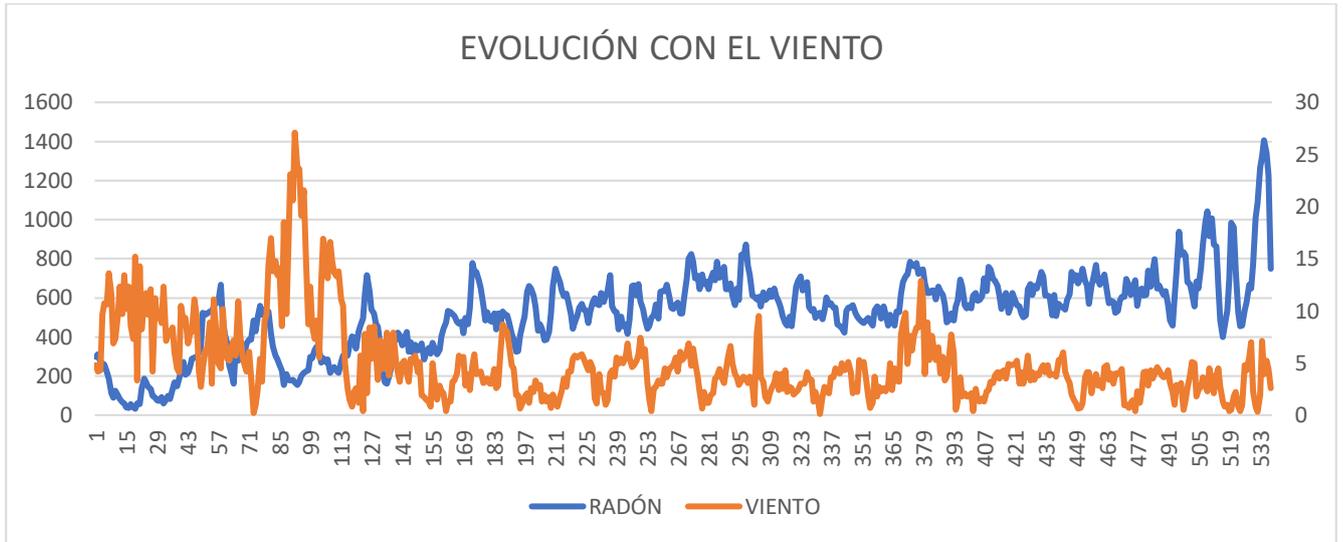


Figura A2 - 12

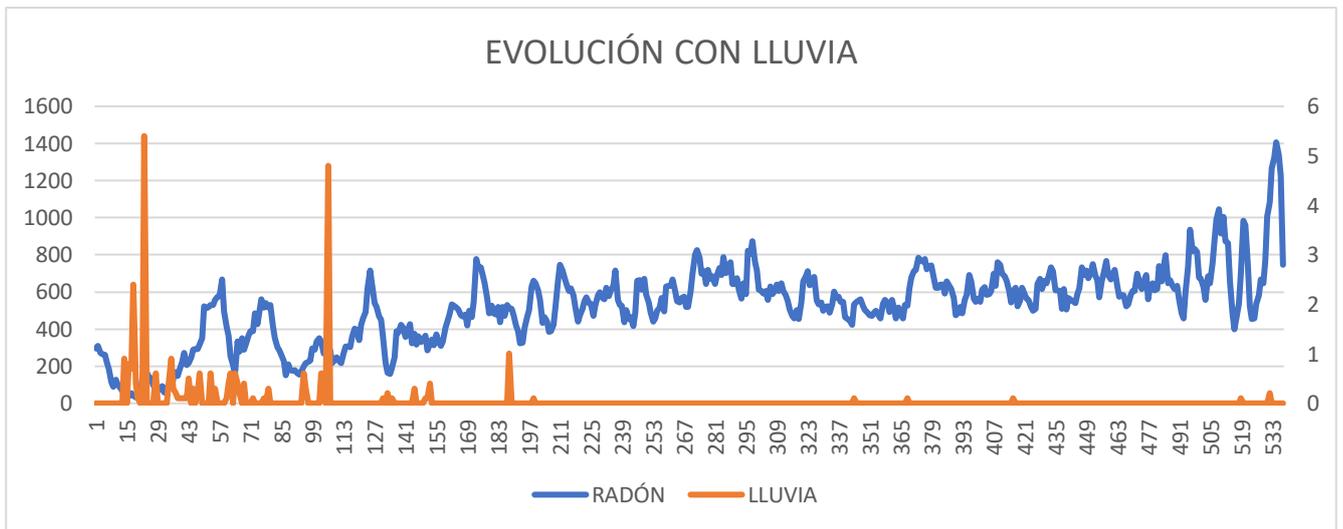


Figura A2 - 13

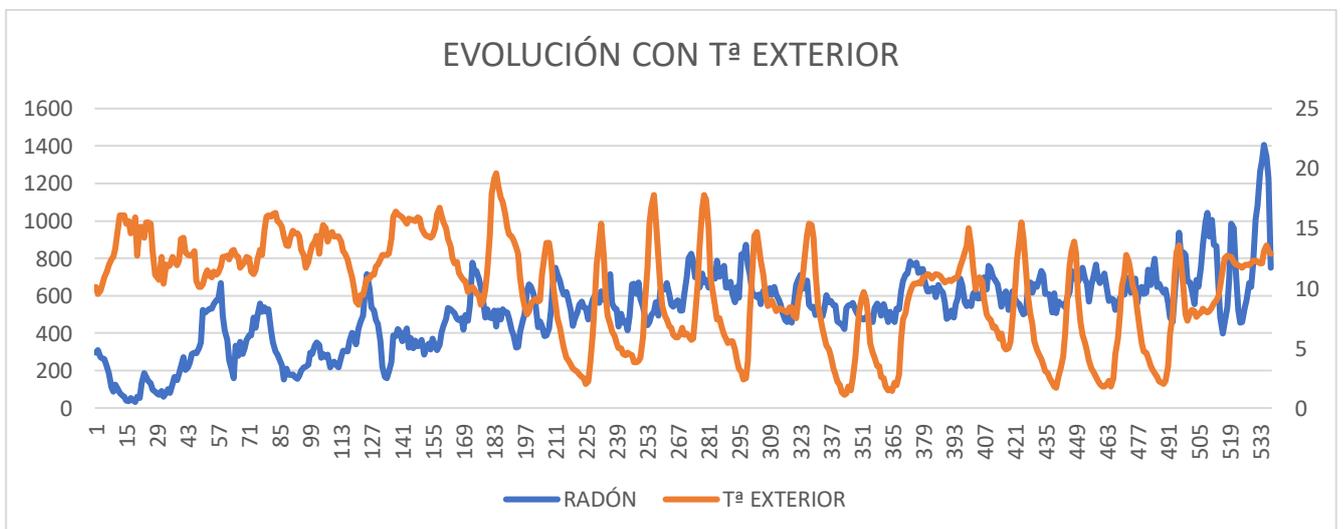


Figura A2 - 14

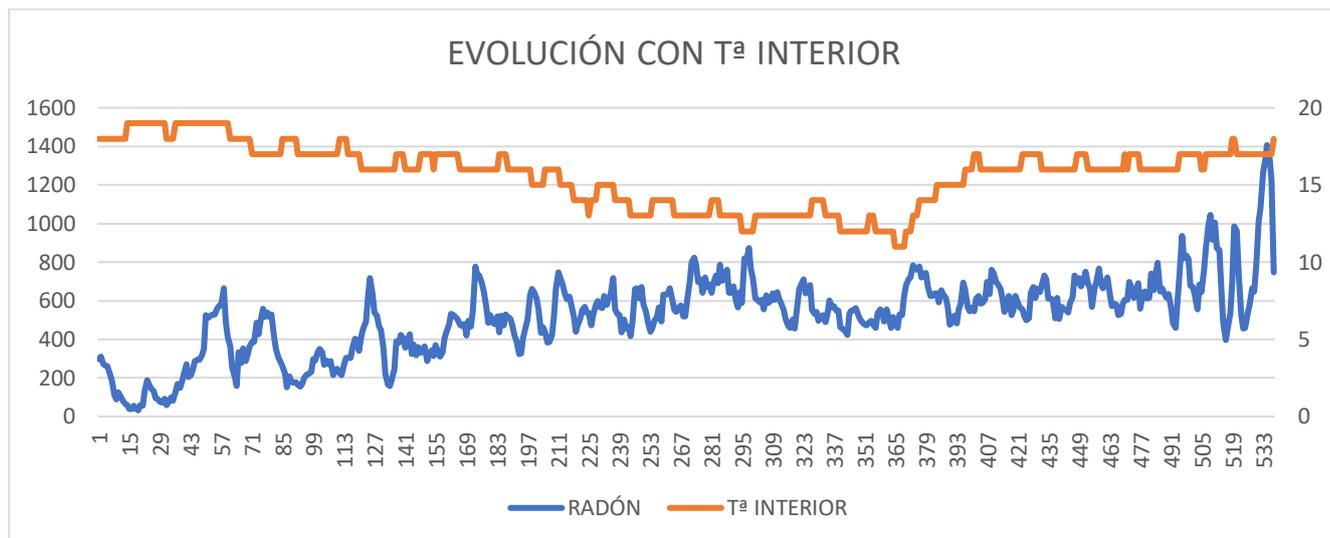


Figura A2 - 15

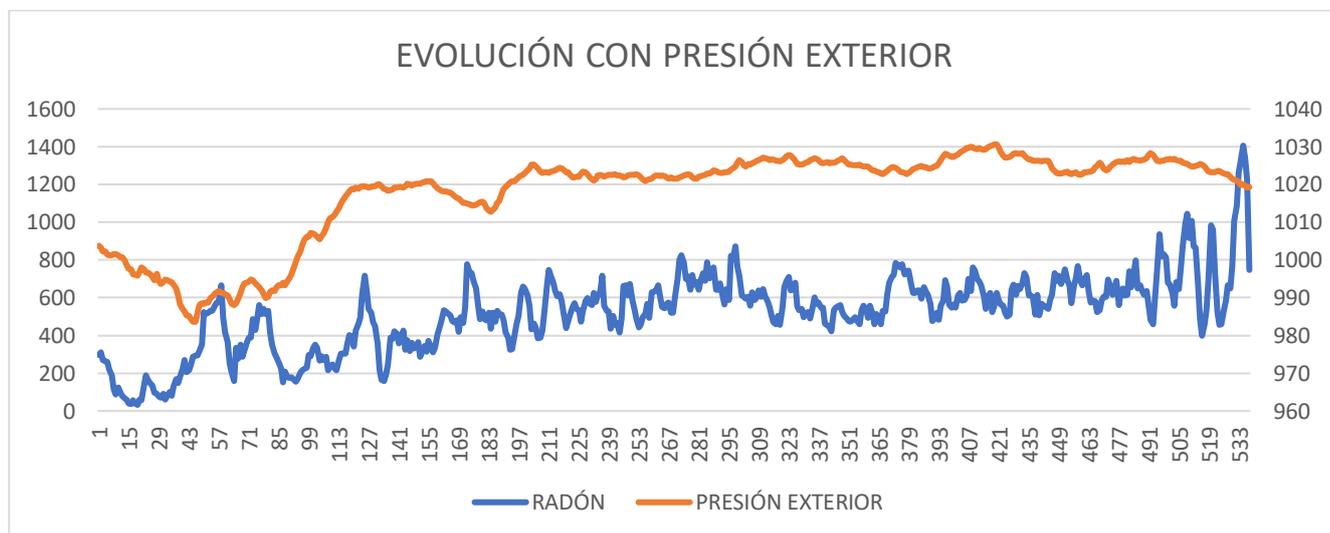


Figura A2 - 16

● SALA DE GRADOS



Figura A2 - 17

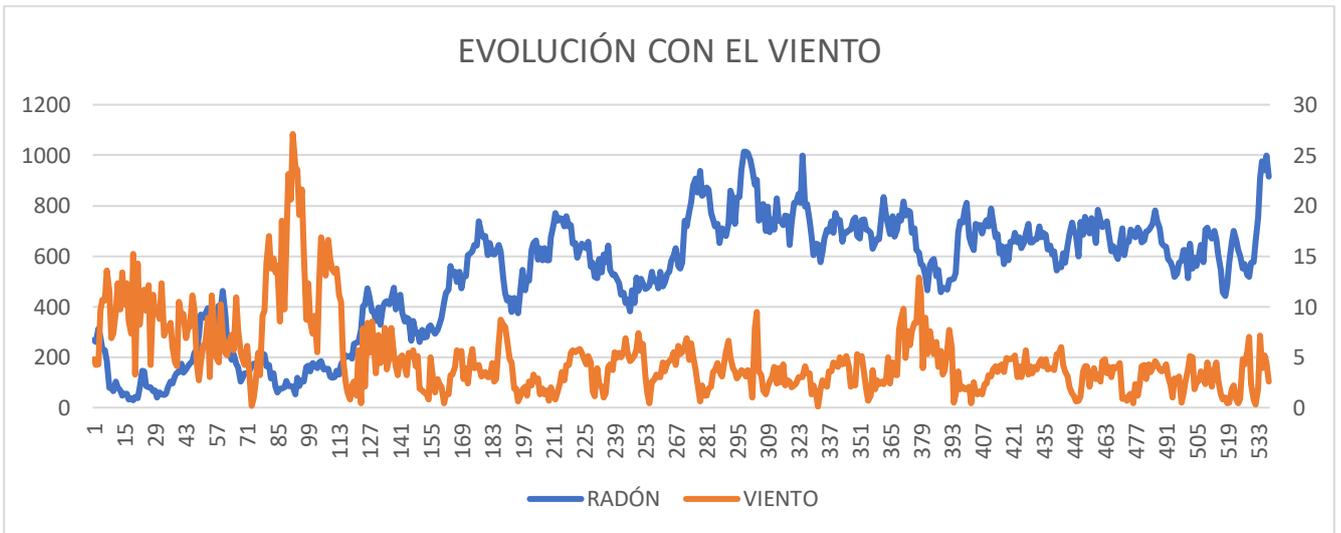


Figura A2 - 18

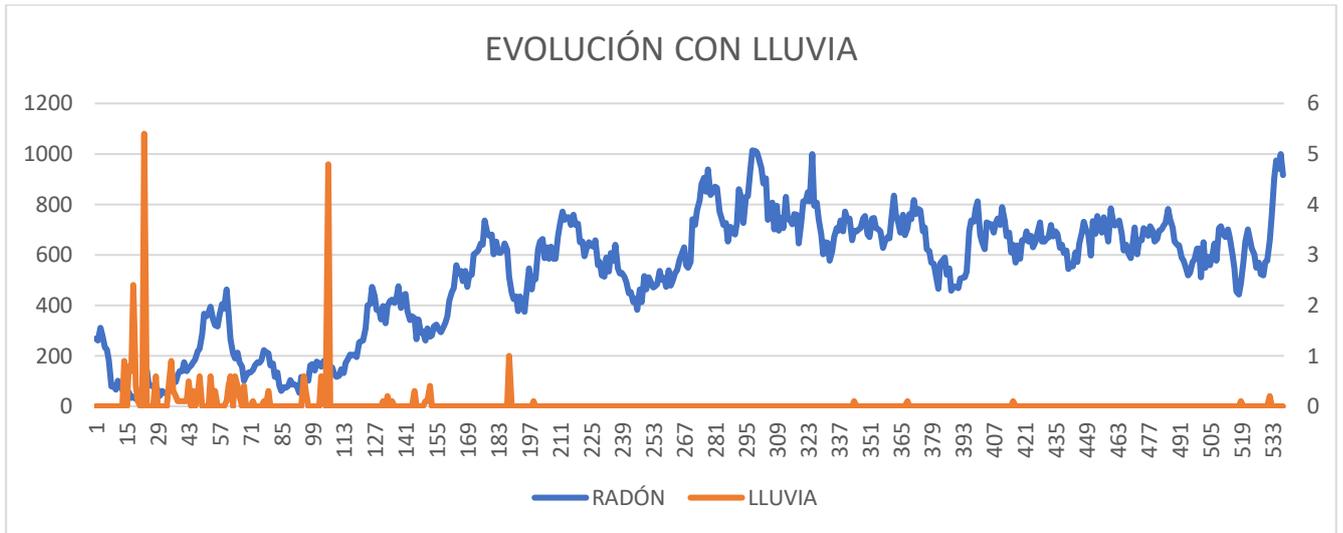


Figura A2 - 19

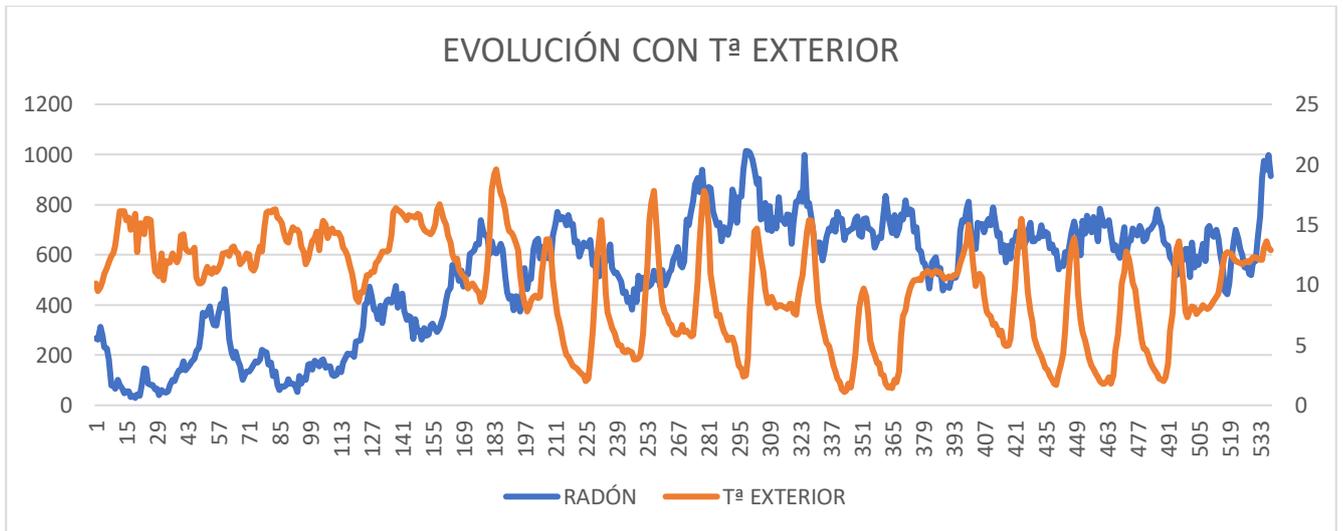


Figura A2 - 20

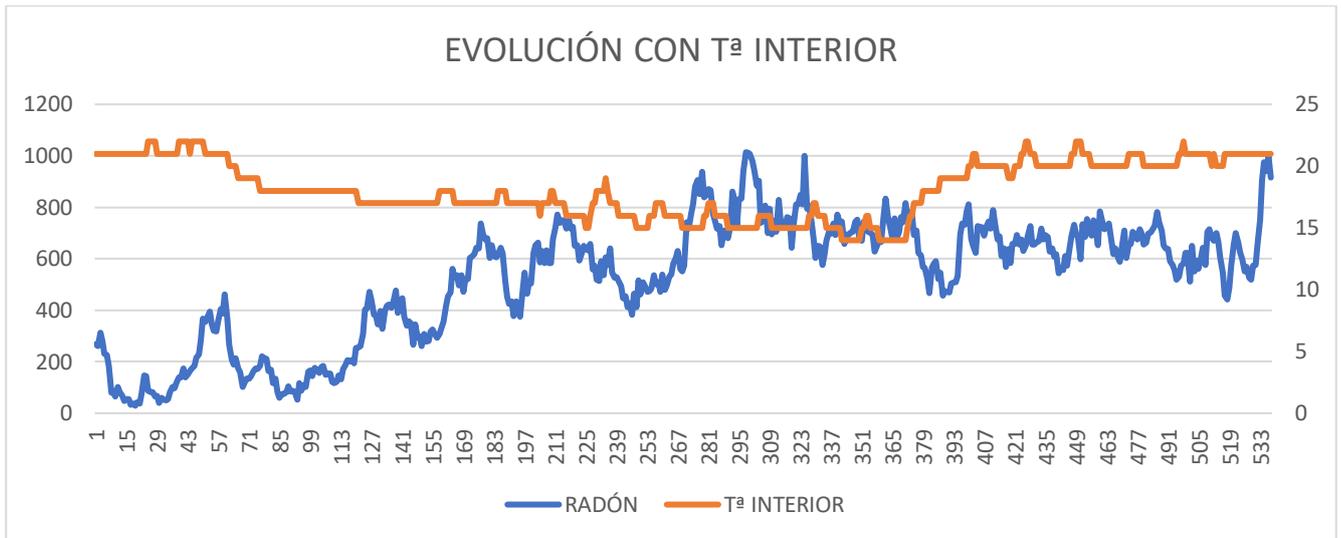


Figura A2 - 21

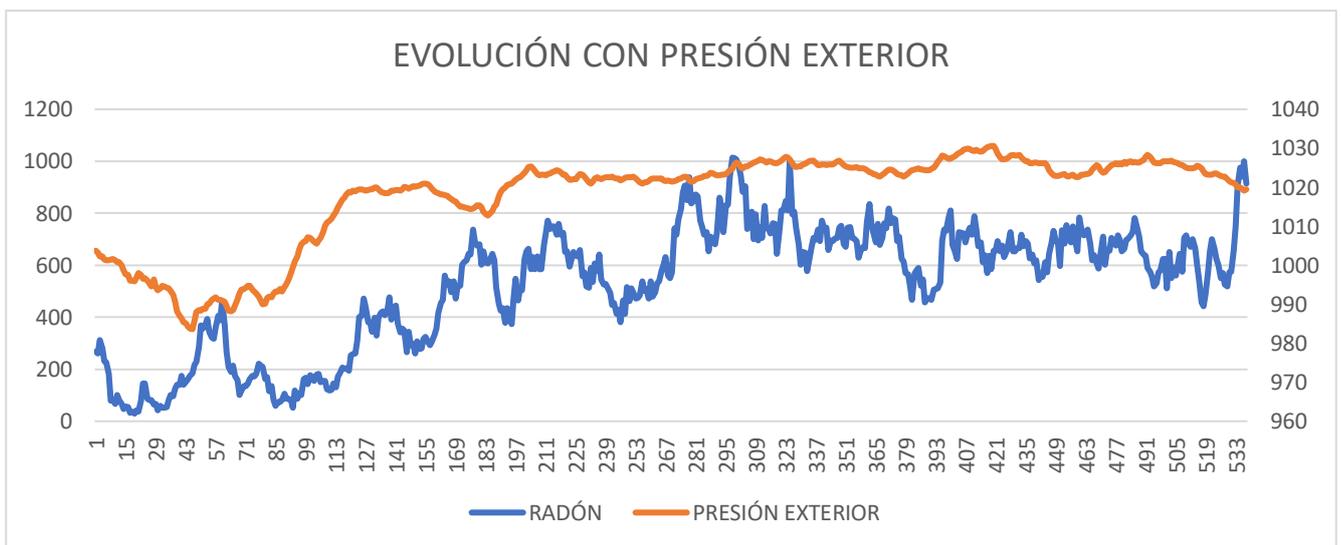


Figura A2 - 22

• DESPACHO 217

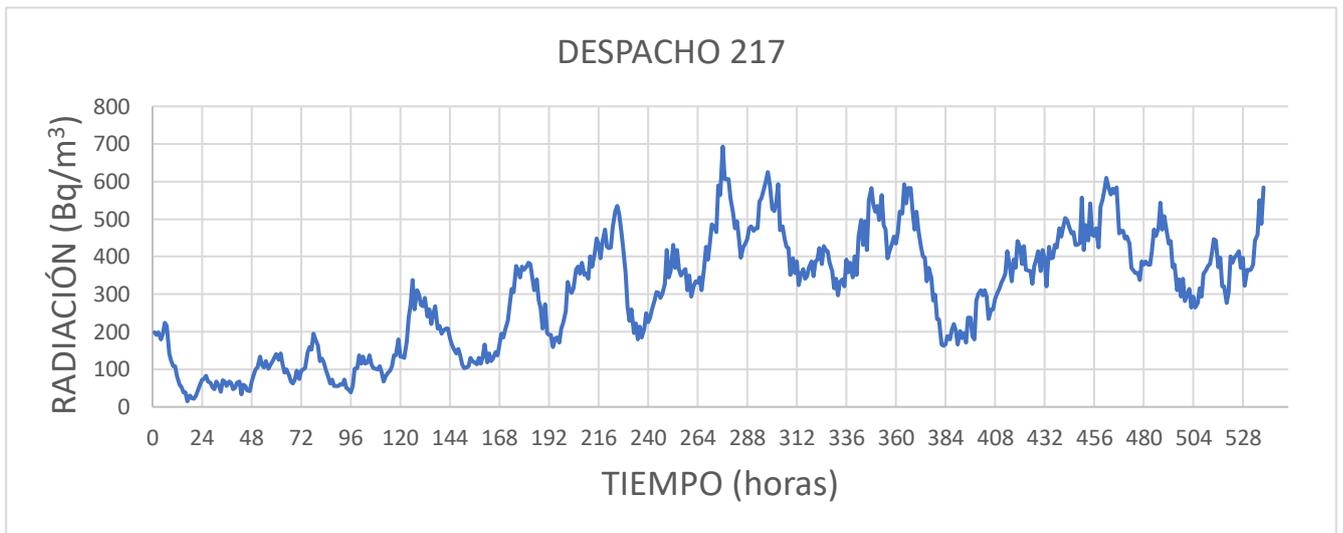


Figura A2 - 23

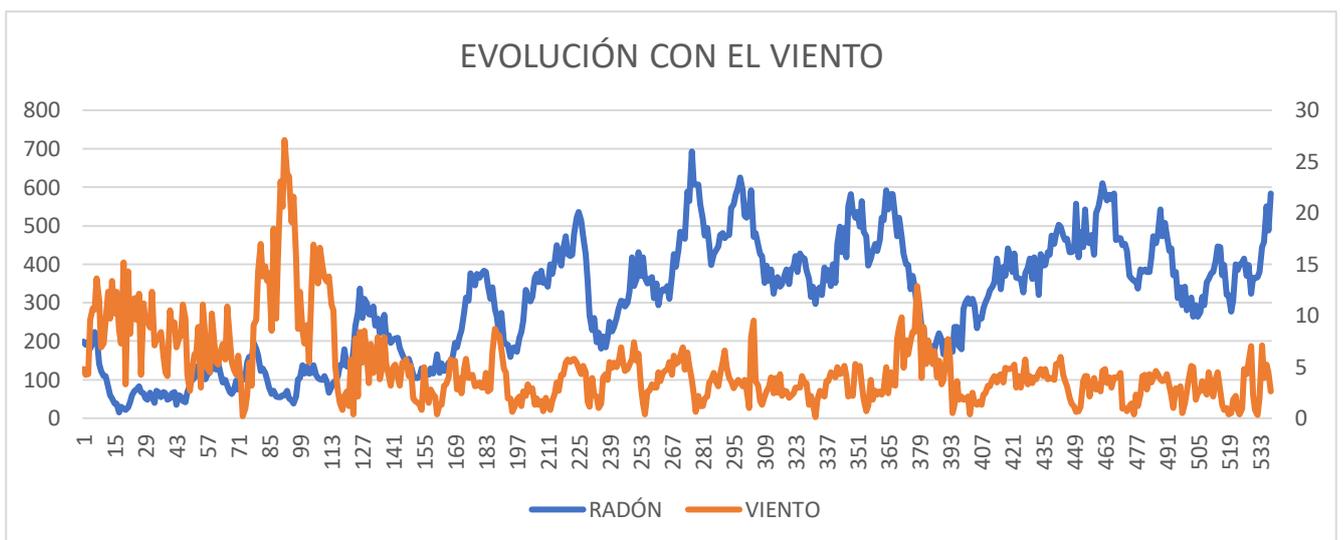


Figura A2 - 24

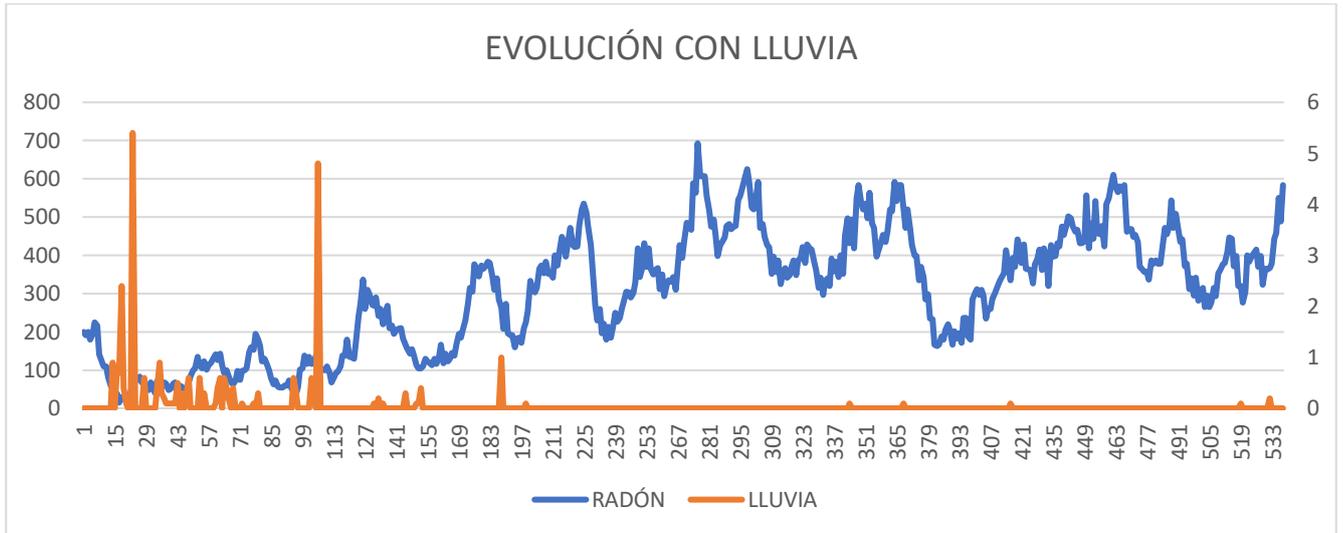


Figura A2 - 25

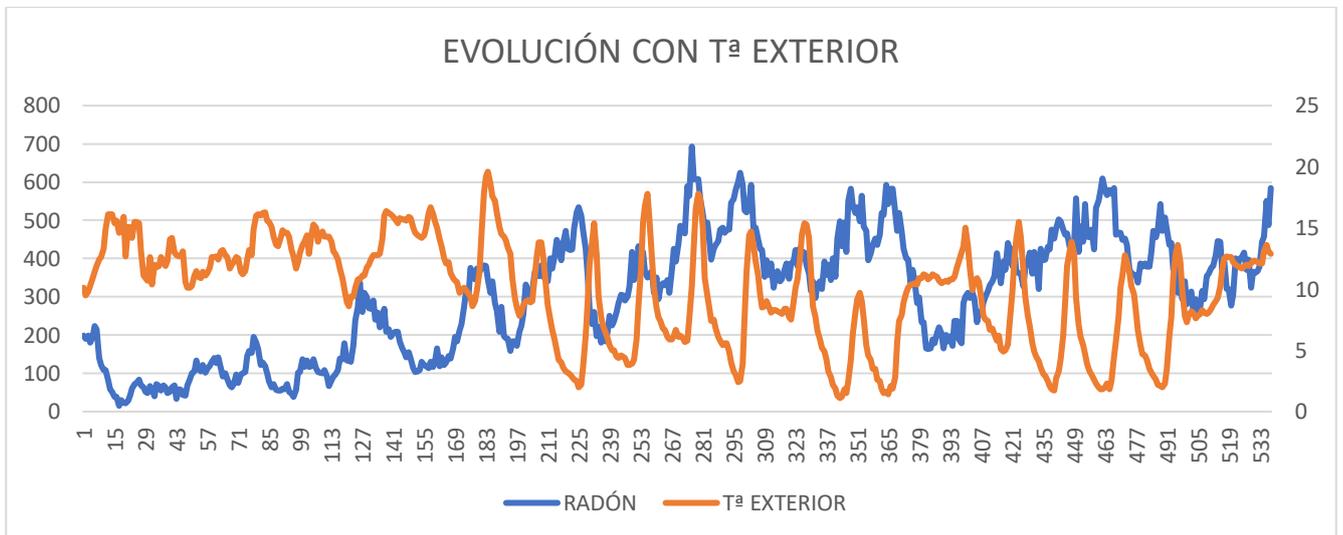


Figura A2 - 26

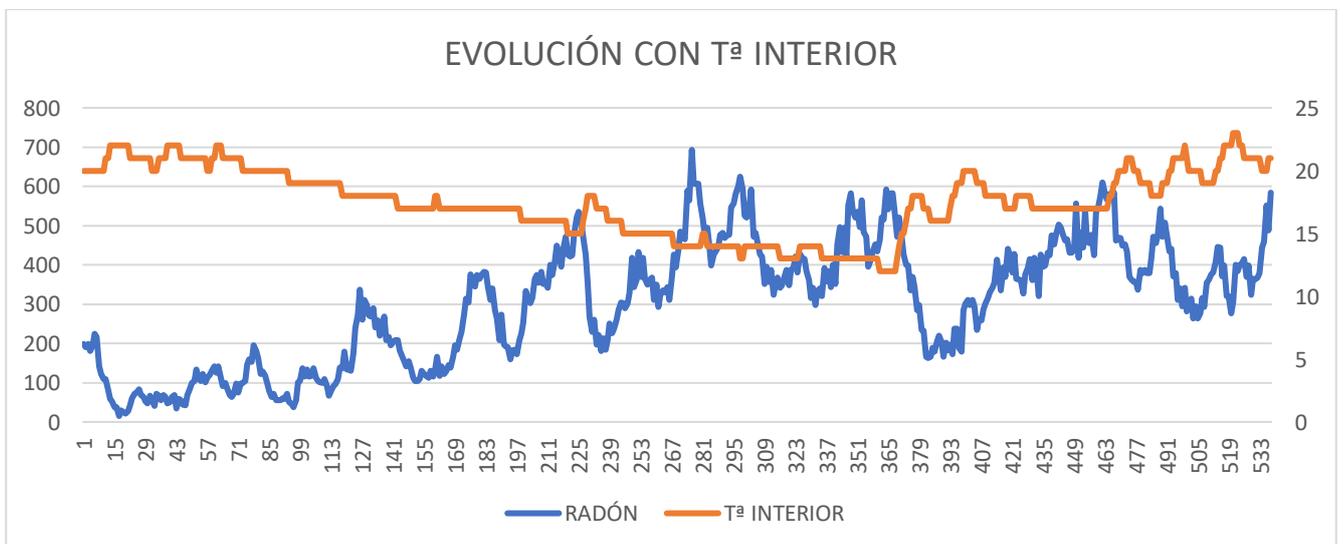


Figura A2 - 27

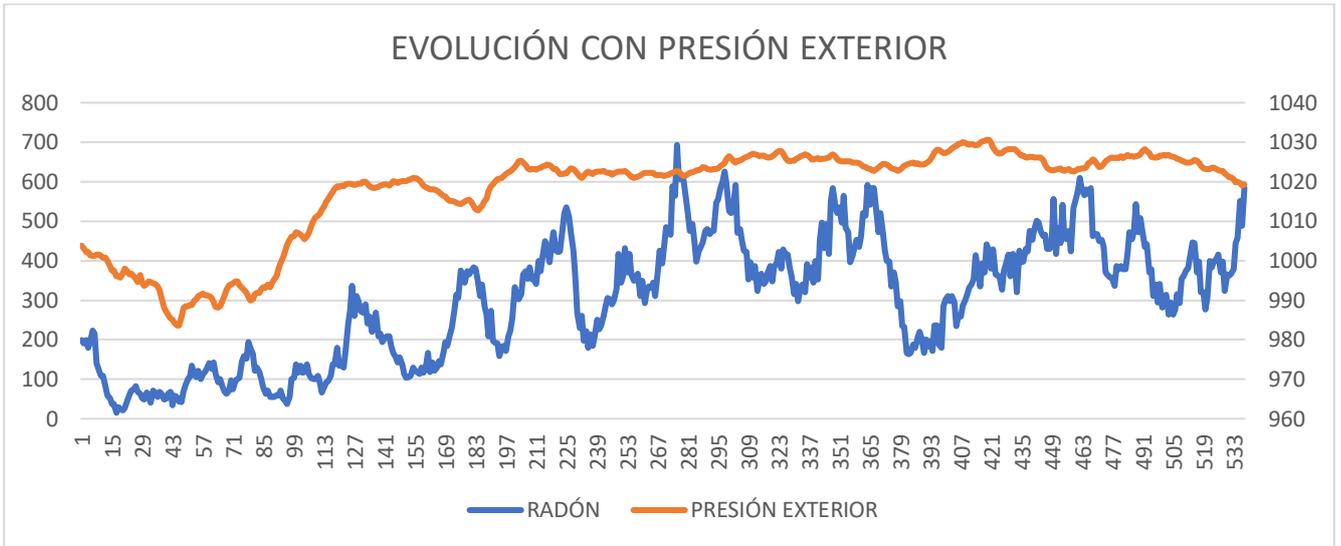


Figura A2 - 28

## 2) FASE 3

- DESPACHO 118



Figura A2 - 29

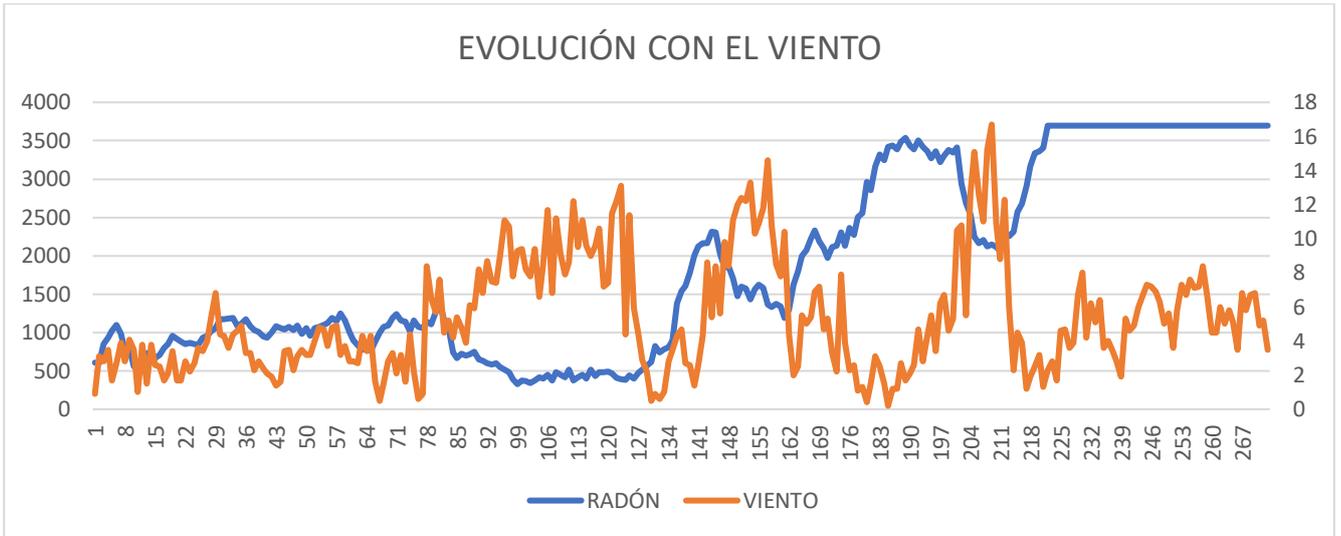


Figura A2 - 30

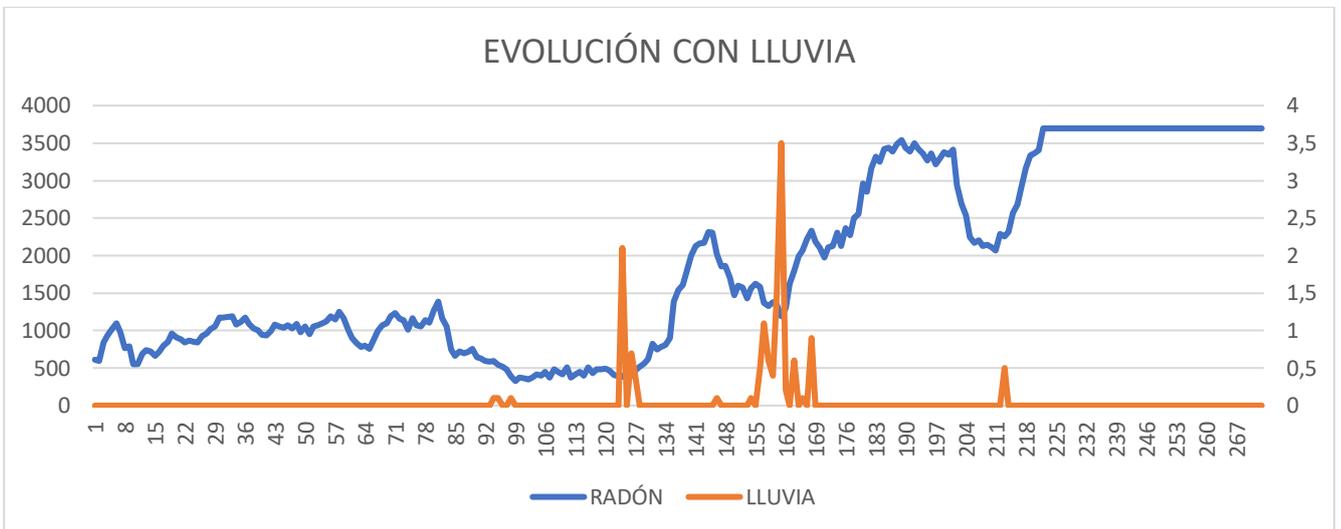


Figura A2 - 31



Figura A2 - 32

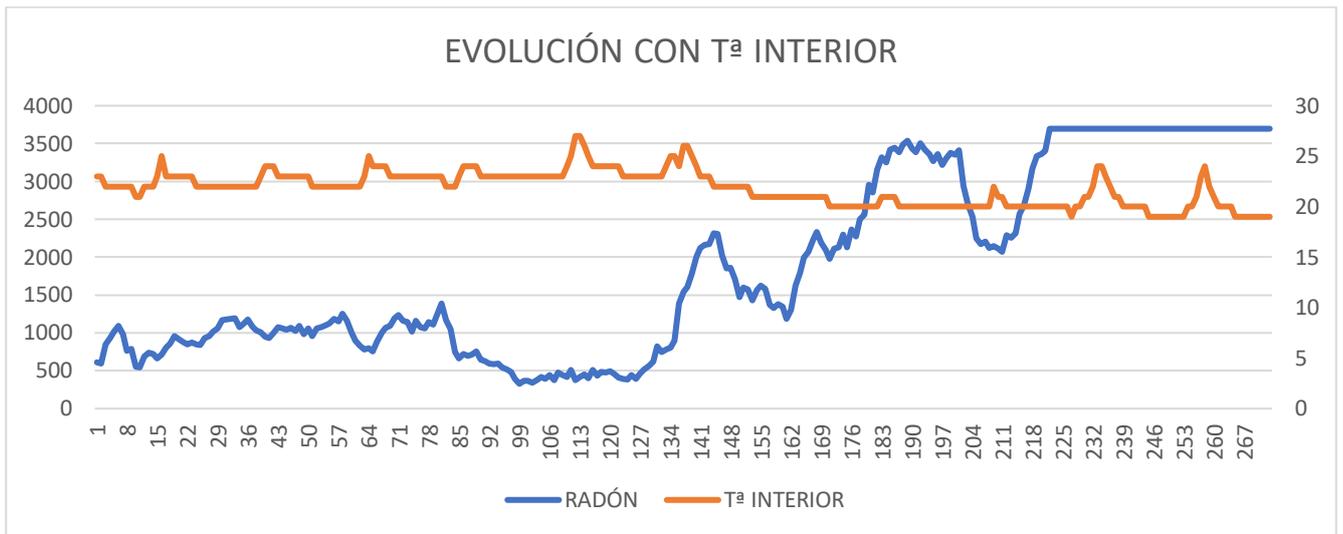


Figura A2 - 33

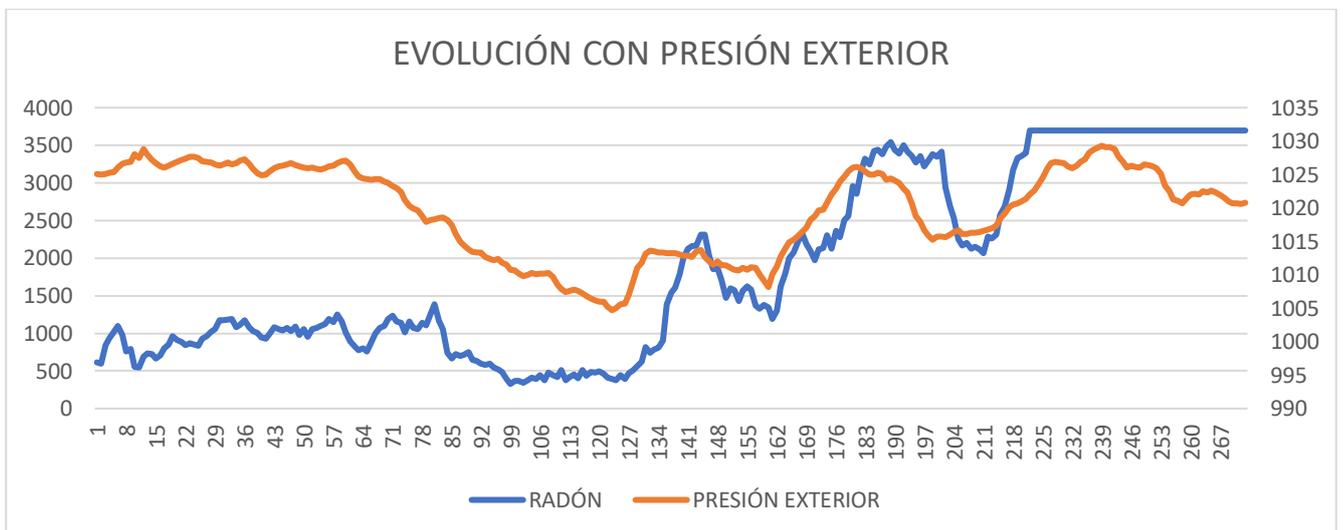


Figura A2 - 34

- OFFICE CUD

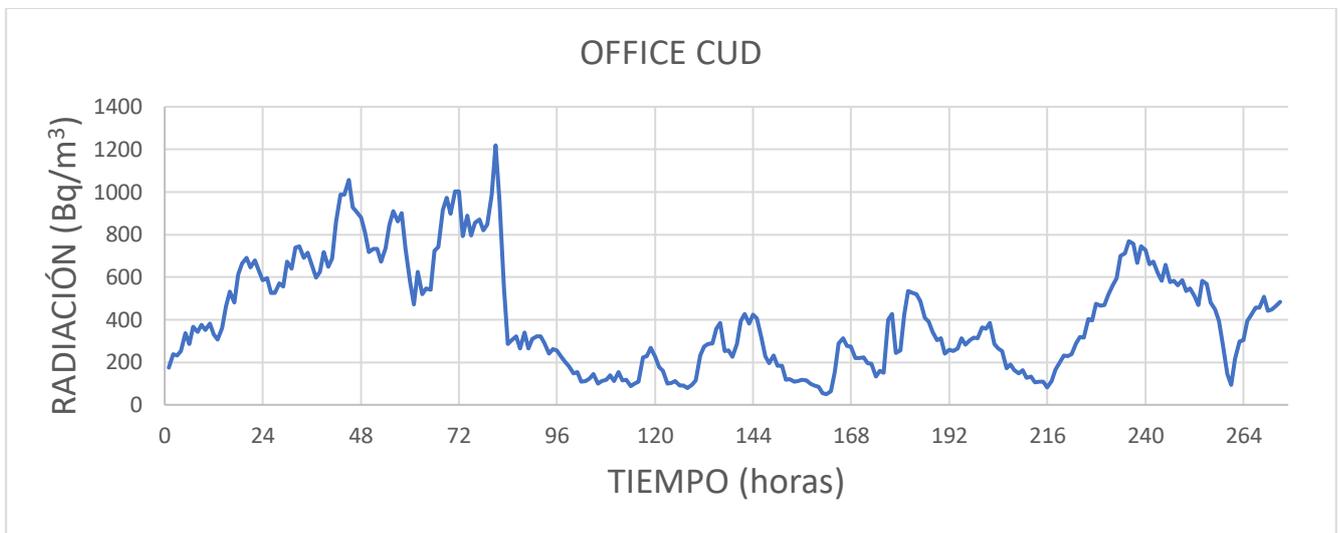


Figura A2 - 35

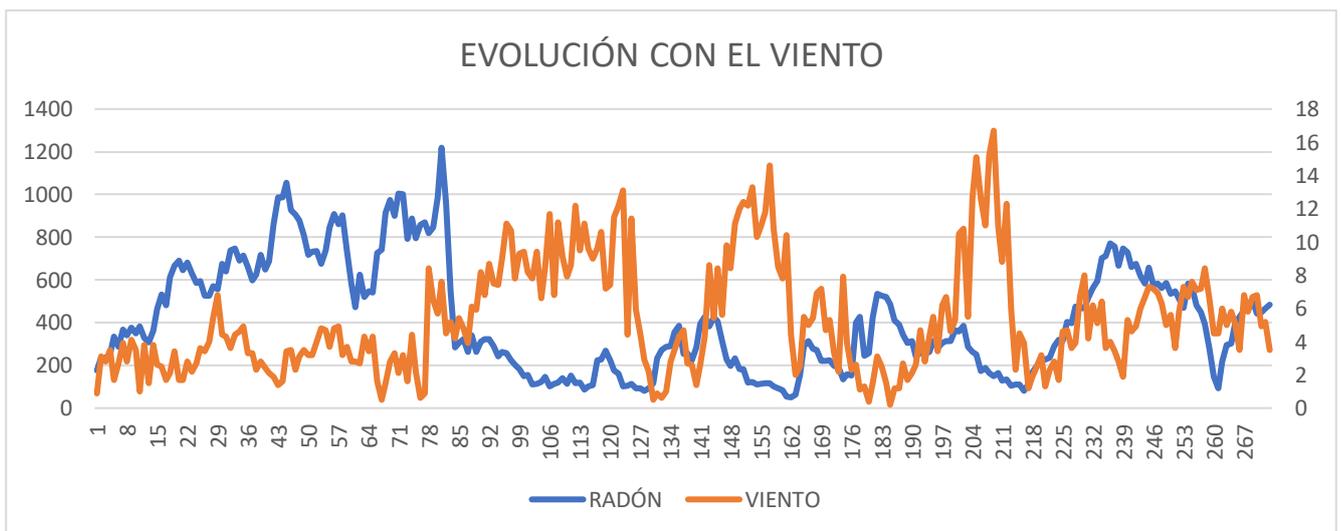
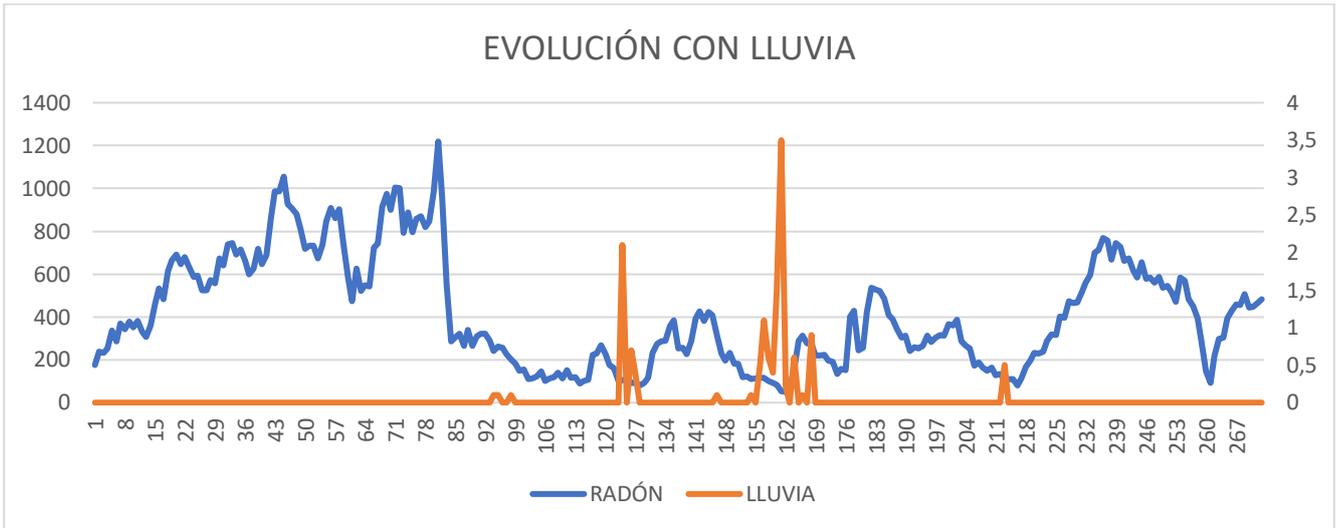
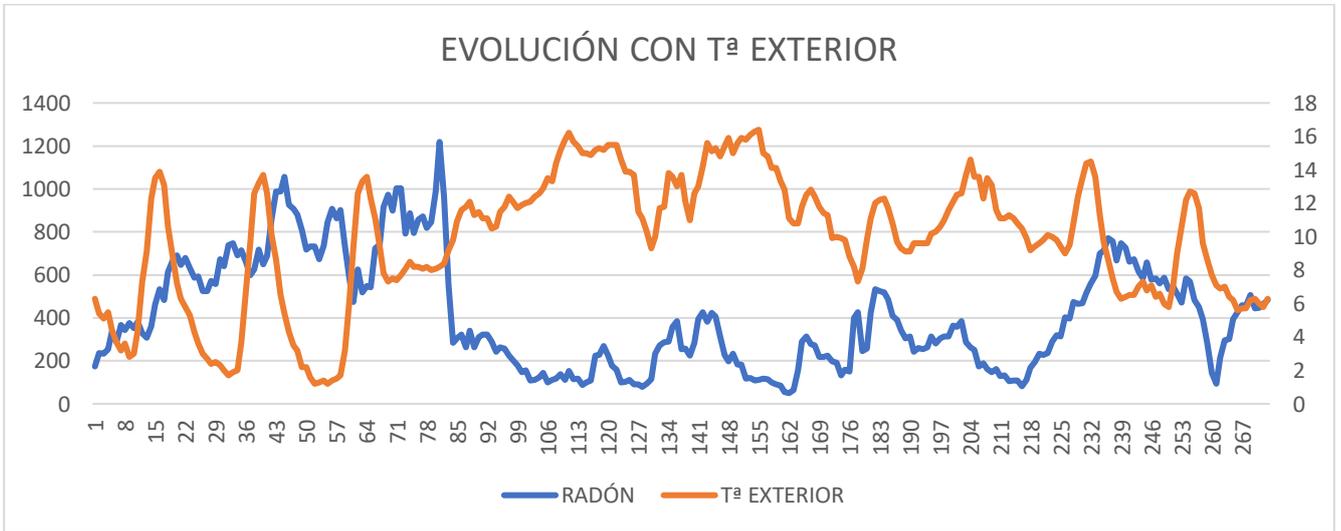


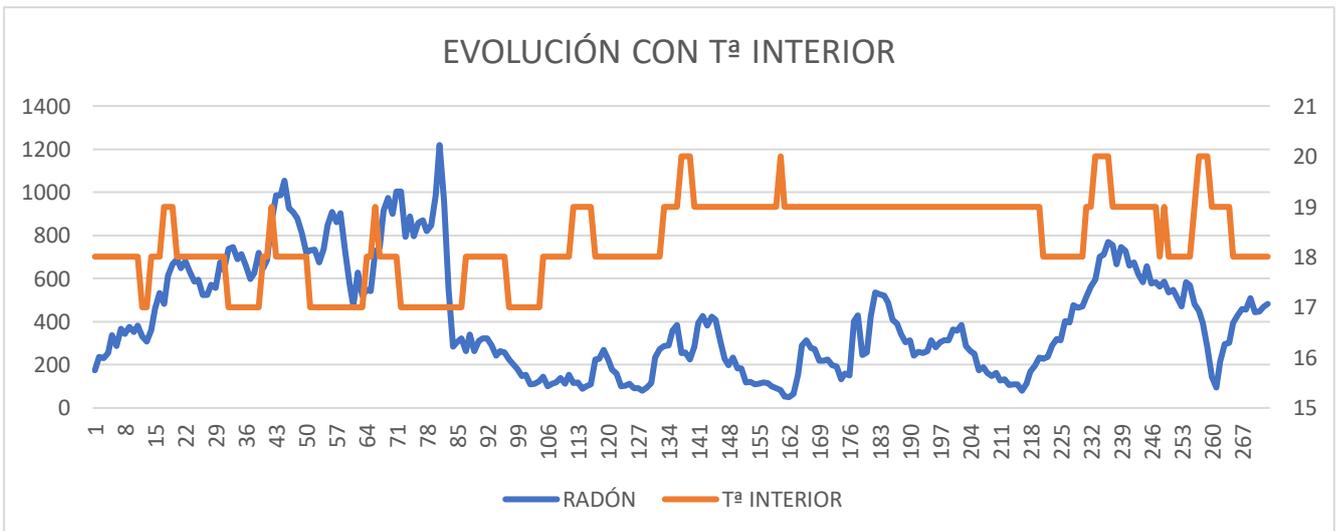
Figura A2 - 36



**Figura A2 - 37**



**Figura A2 - 38**



**Figura A2 - 39**

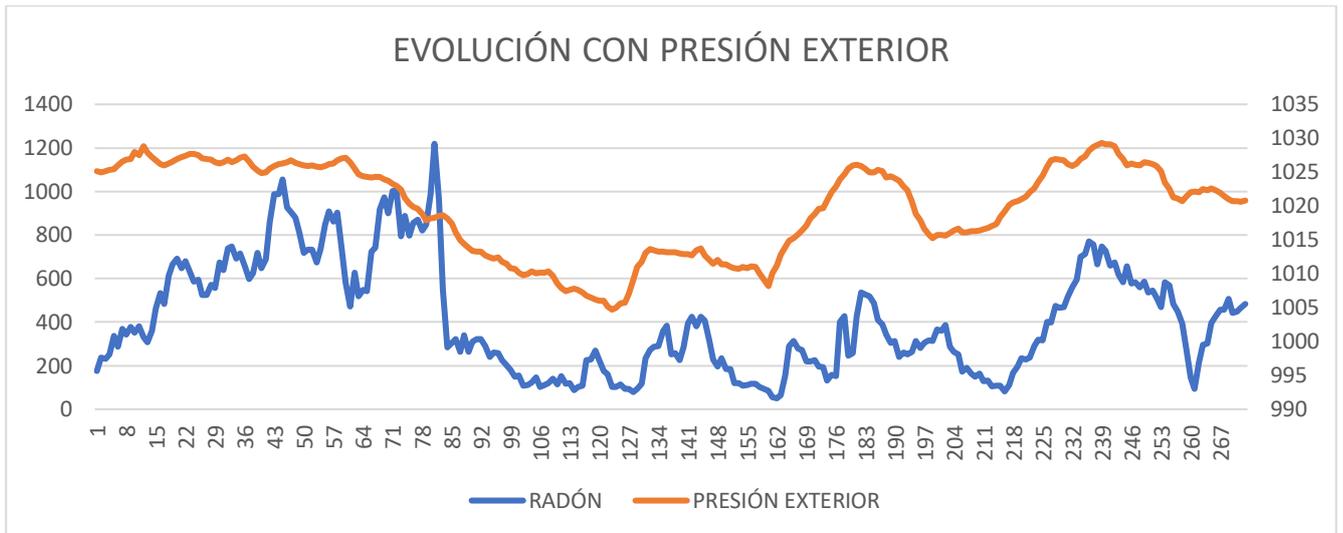


Figura A2 - 40

- SIMULADOR DE NAVEGACIÓN

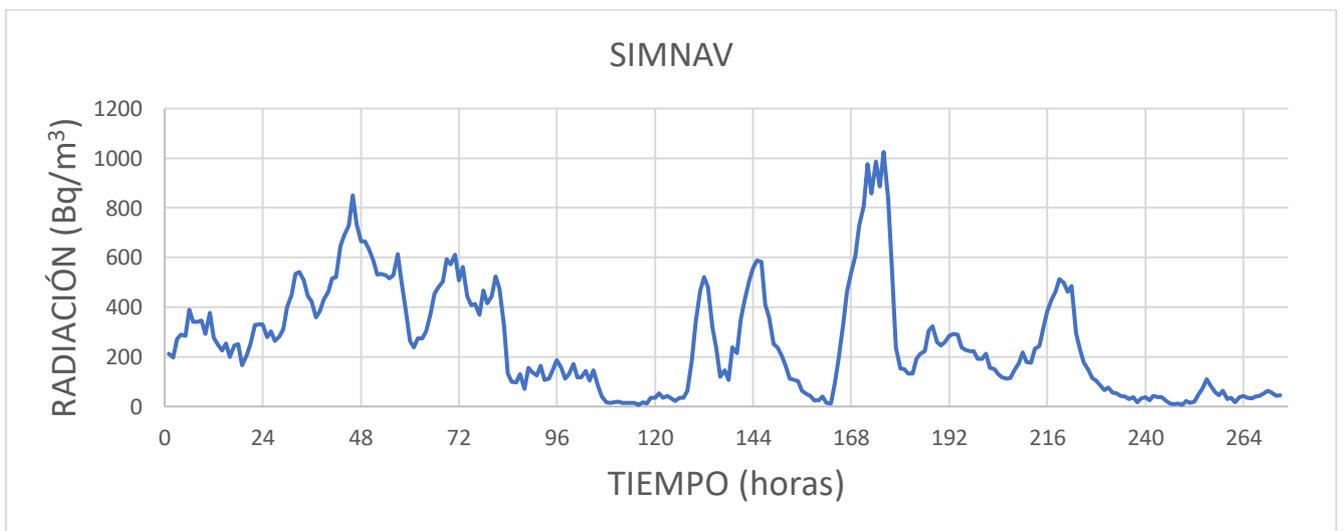


Figura A2 - 41

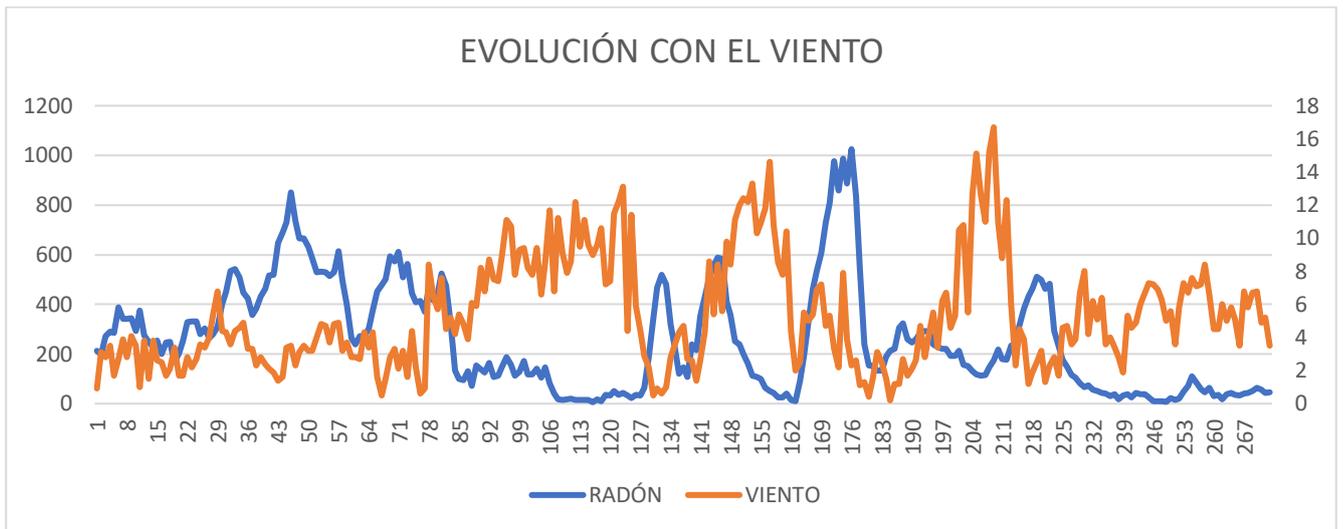


Figura A2 - 42

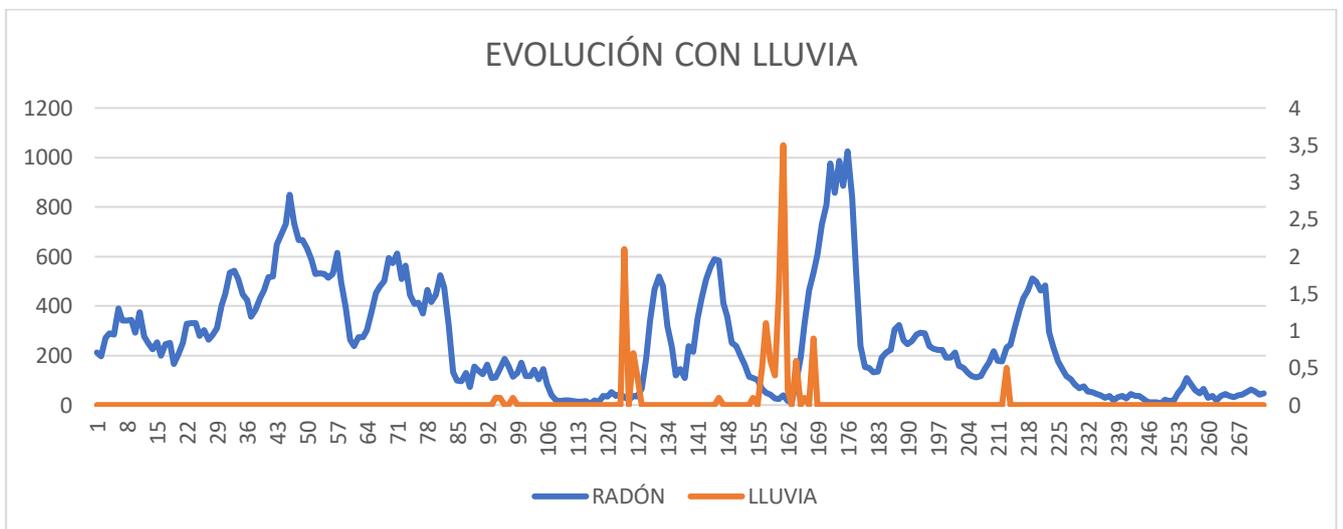


Figura A2 - 43

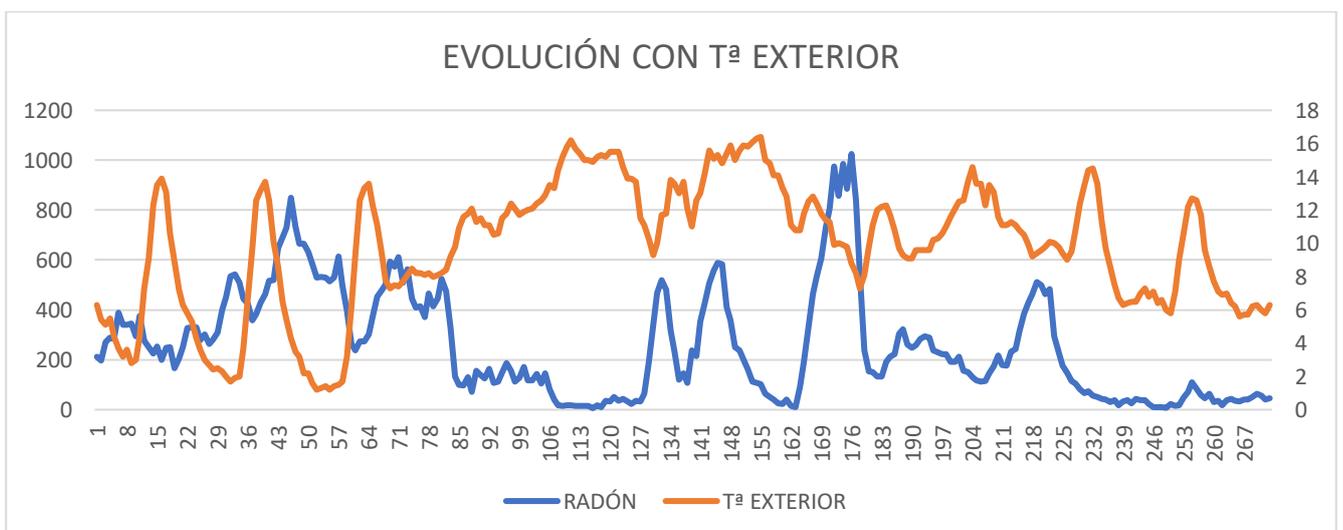


Figura A2 - 44

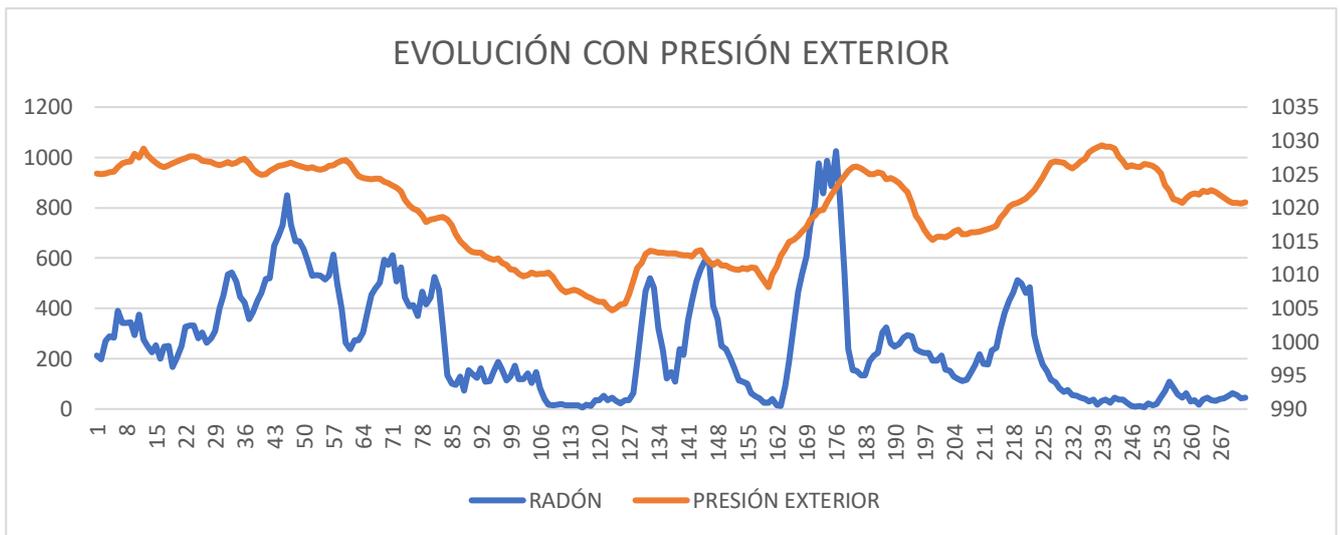


Figura A2 - 45

- CÁMARA DE OFICIALES



Figura A2 - 46

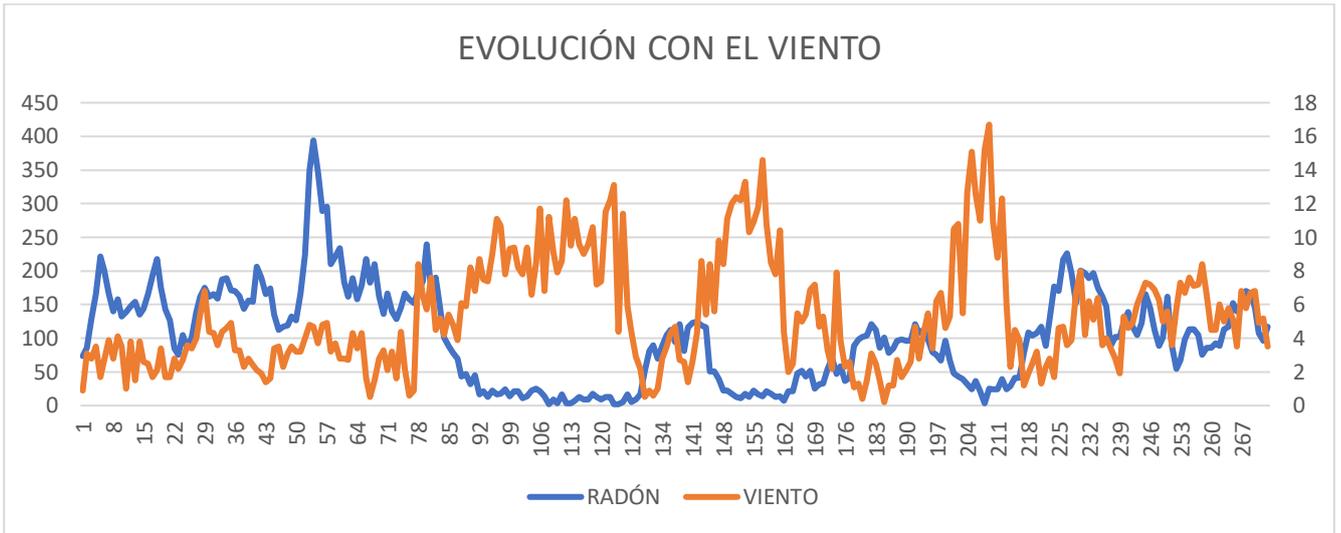


Figura A2 - 47

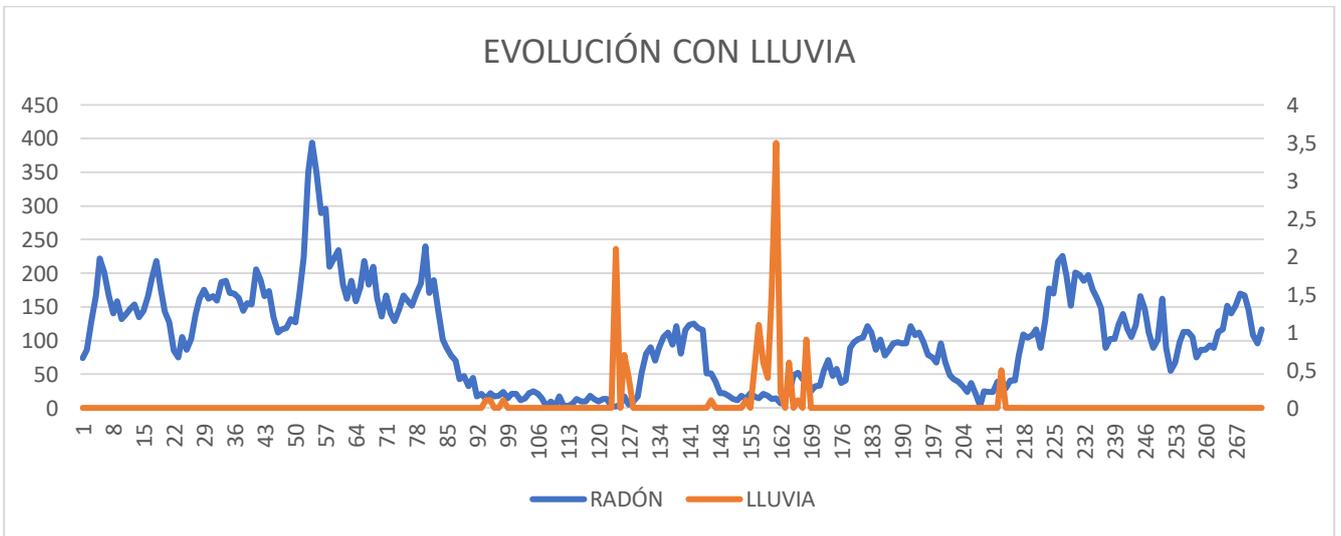


Figura A2 - 48



Figura A2 - 49

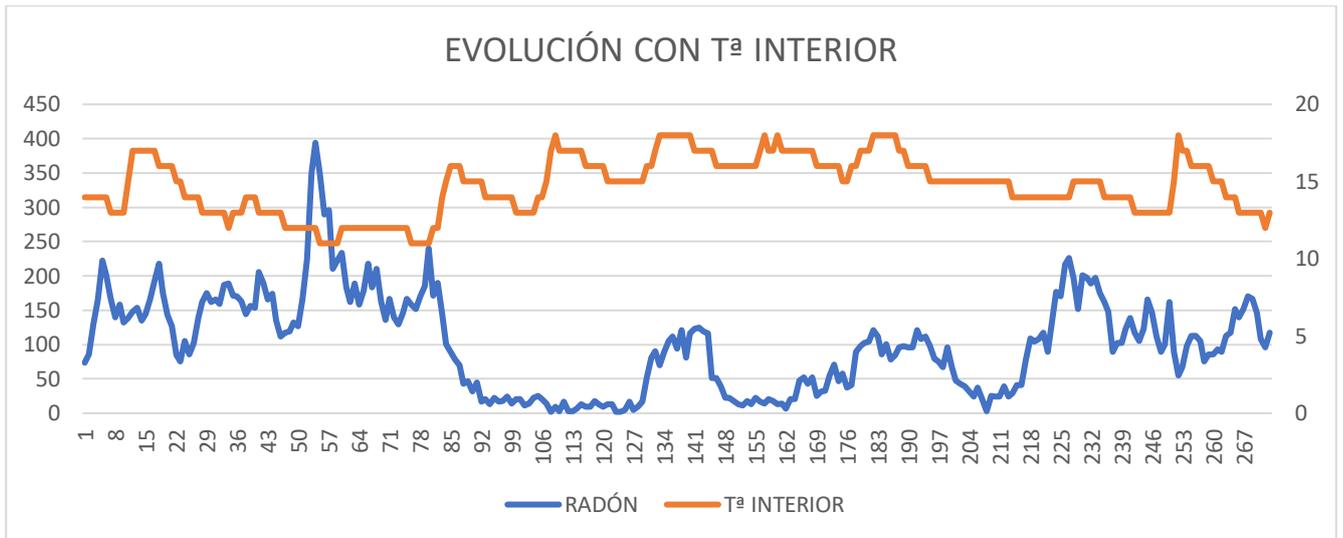


Figura A2 - 50

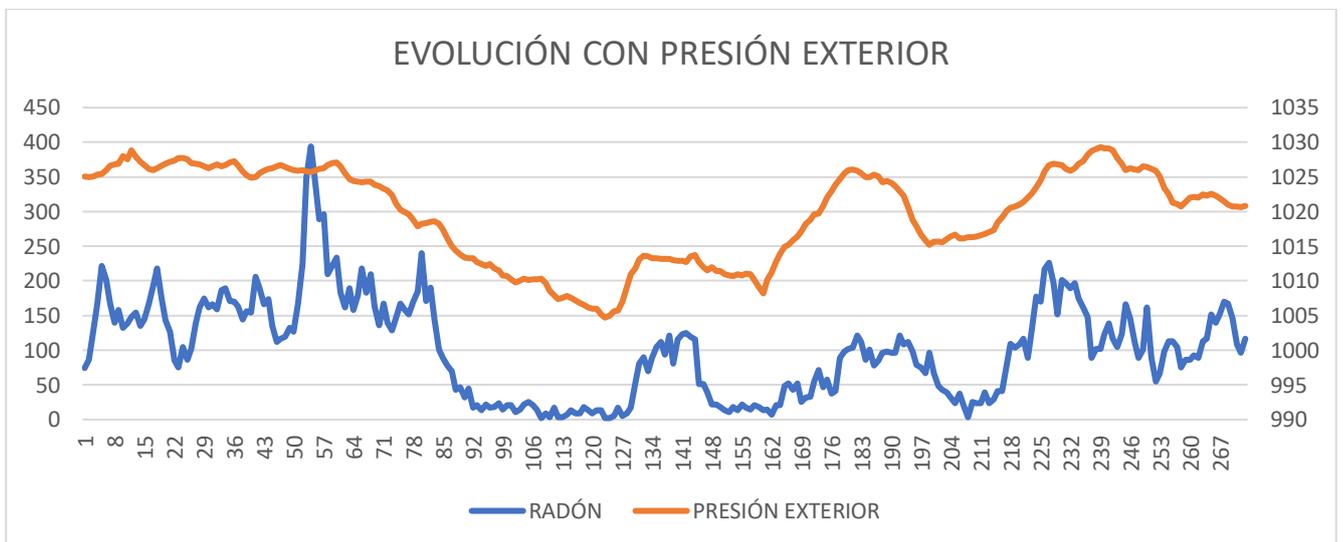


Figura A2 - 51

- SECRETARIA CUD



Figura A2 - 52

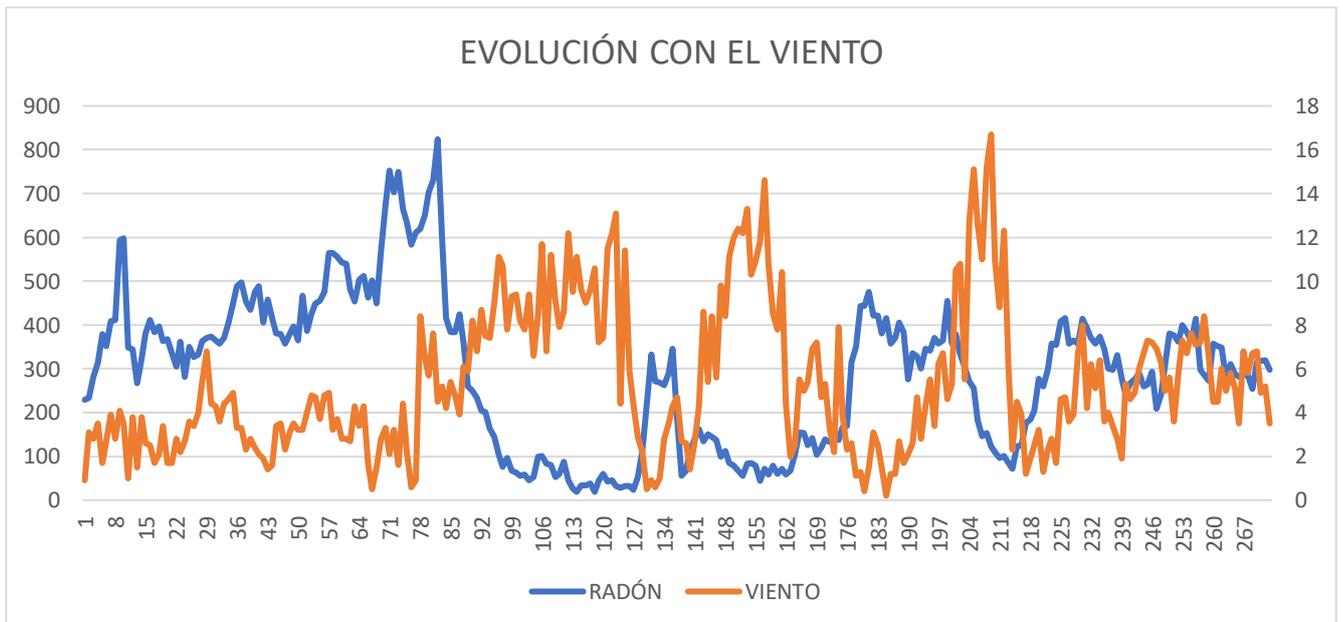


Figura A2 - 53



Figura A2 - 54

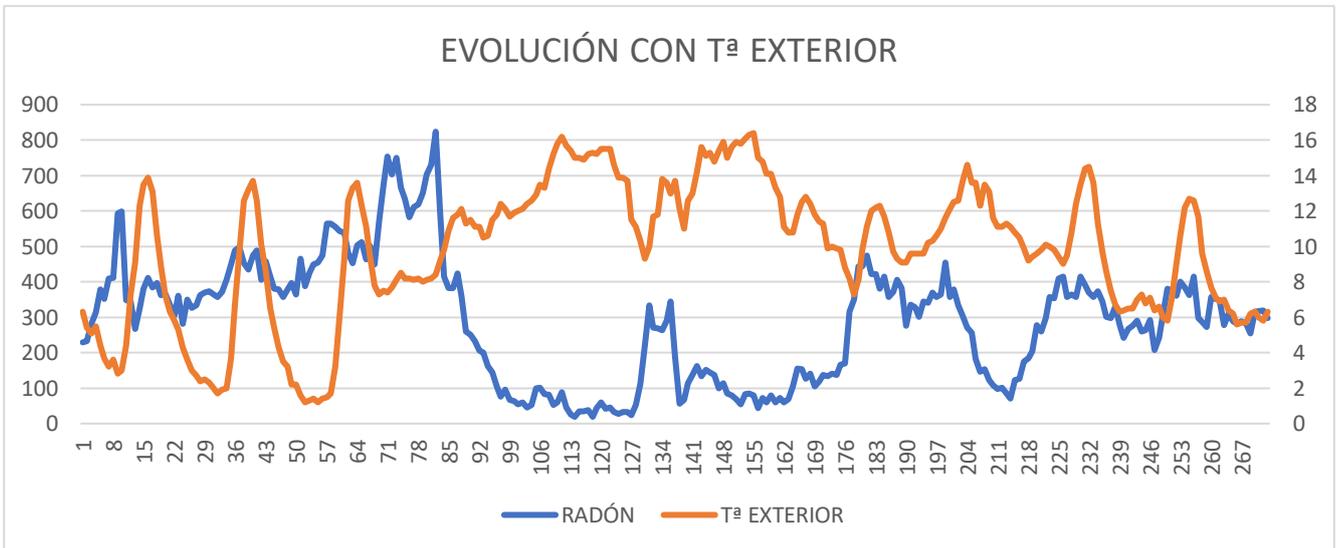


Figura A2 - 55

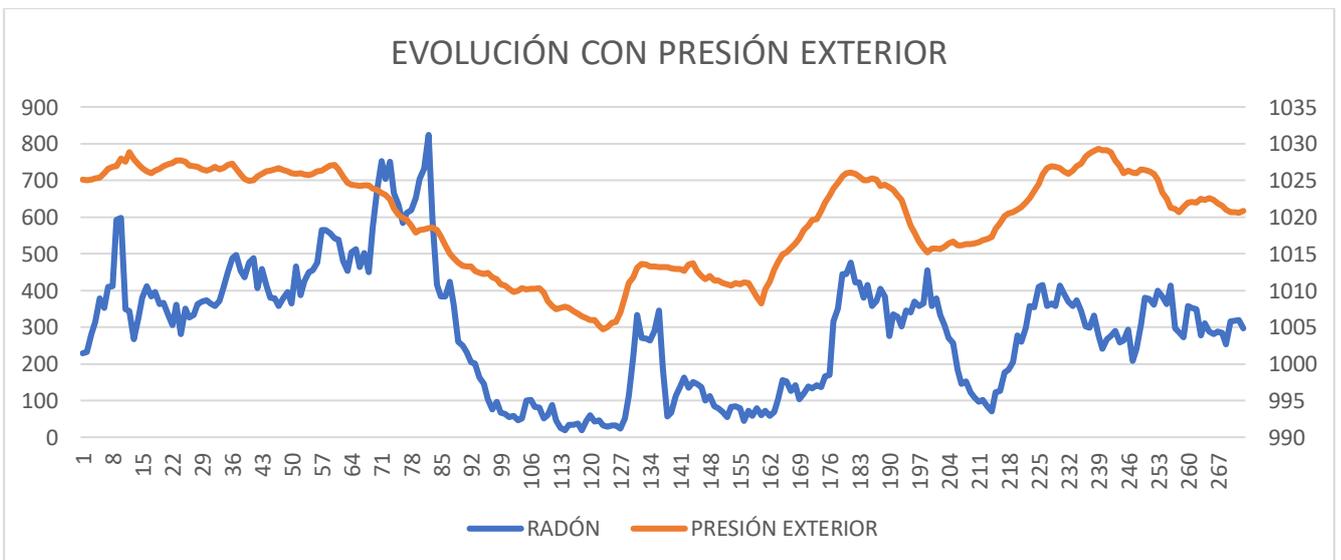


Figura A2 - 56