



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental de los factores que influyen en la
concentración de gas radón disuelto en agua de consumo.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alfredo Guerrero Muñoz

DIRECTORES: Santiago Rafael Urréjola Madriñán
Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental de los factores que influyen en la
concentración de gas radón disuelto en agua de consumo.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tuvo como objetivo evaluar la concentración de radón en fuentes y manantiales de la Península del Morrazo, analizando la influencia de factores geológicos, hidrogeológicos y fisicoquímicos. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión sobre la literatura en fuentes académicas, de la que se extrajo que la concentración de radón en el agua resulta de la combinación de los parámetros estudiados sugiriendo que el resultado final será variable dependiendo de cómo interactúen entre sí dichas condiciones y parámetros. Para realizar el estudio, se realizaron muestreos en 28 fuentes, midiendo la concentración de radón mediante el equipo RTM 1688-2 de SARAD, junto con parámetros complementarios como pH, temperatura del agua, caudal, turbidez y concentración de fosfatos. Posteriormente, de estas dos fuentes se seleccionaron dos, en las que se tomaron muestras repetitivas a diferentes horas del día durante un periodo de tiempo, estudiando, además de los parámetros mencionados, la variación de la meteorología. Los resultados mostraron variabilidad significativa, con concentraciones sin sobrepasar el límite normativo de 500 Bq/l. Se confirmó que la litología, el grado de fracturación y la profundidad del acuífero son factores importantes, pero no determinantes en este estudio, mientras que el pH y la temperatura podrían modular la movilidad del uranio y el radón.

PALABRAS CLAVE

Radón, fuentes, factores fisicoquímicos, factores meteorológicos, factores geológicos

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Justificación e importancia.....	6
1.2 Localización del estudio.....	7
1.3 Iniciativa del Centro Universitario de la Defensa	7
1.4 Objetivos	8
1.5 Metodología general	8
2 Estado del arte	9
2.1 Normativa de aguas de consumo	9
2.2 Factores que afectan a la concentración de radón en el agua.....	10
2.2.1 Tipos de acuíferos.....	10
2.2.2 Revisión de la literatura	11
2.2.3 Factores geológicos	22
2.2.4 Factores hidrogeológicos	23
2.2.5 Factores fisicoquímicos del agua.....	24
2.2.6 Recapitulación y discusión de los principales factores.....	27
2.3 Métodos de medida de radón en agua	28
2.3.1 Métodos activos	28
2.3.2 Métodos pasivos	31
3 Desarrollo experimental	34
3.1 Identificación y localización de manantiales	35
3.2 Determinación experimental de la concentración de radón en agua.....	38
3.3 Medición de parámetros fisicoquímicos	42
4 Resultados experimentales	45
4.1 Muestras generales	45
4.1.1 Resultados concentración de radón	45
4.1.2 Análisis paramétrico	47
4.2 Comparación resultados con el TFG de Sánchez Ferragut	51
4.3 Relación geológica con la concentración de radón.....	53
4.4 Resultados fuentes específicas	56
4.4.1 Resultados de concentración de radón.....	56

4.4.2 Resultados condiciones meteorológicas	59
4.4.3 Resultados otros parámetros	64
5 Conclusiones y líneas futuras	69
5.1 Conclusiones	69
5.2 Líneas futuras	70
6 Bibliografía.....	71
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	74
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	75
Anexo III: Características RTM-1668.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 RAD-7	29
Figura 3-1 Esquema general del TFG (Elaboración propia)	34
Figura 3-2 Mapa de fuentes analizadas (Elaboración propia)	35
Figura 3-3 Mapa de fuentes de Marín [34].....	36
Figura 3-4 RTM 1668-2 [35].....	38
Figura 3-5 Montaje experimental [35]	39
Figura 3-6 Frasco de protección contra la entrada de agua [35]	39
Figura 3-7 Software Radon in Water Calculation [35]	41
Figura 3-8 Pérdida de radón frente al tiempo [4]	41
Figura 4-1 Gráfico porcentual de concentración de radón superior a 100 Bq/l (Elaboración propia)	46
Figura 4-2 Gráfico porcentual de concentración de radón por rangos (Elaboración propia).....	47
Figura 4-3 Concentración de radón-caudal (Elaboración propia)	47
Figura 4-4 Concentración de radón-Temperatura del agua (Elaboración propia).....	48
Figura 4-5 Concentración de radón-pH (Elaboración propia).....	49
Figura 4-6 Concentración de radón-Turbidez (Elaboración propia)	50
Figura 4-7 Concentración de radón-Fosfatos (Elaboración propia)	51
Figura 4-8 Comparación valores 2024 vs 2025 (Elaboración propia)	52
Figura 4-9 Mapa geológico Cara Norte de la Península del Morrazo [40].	53
Figura 4-10 Mapa geológico Cara Sur Península de Morrazo [41].....	55
Figura 4-11 Gráfico análisis geológico (Elaboración propia)	56
Figura 4-12 Valores de concentración de radón Fonte do Arrabalde (Elaboración propia)	57
Figura 4-13 Valores de concentración de radón en Fonte do Igrexario (Elaboración propia)	58
Figura 4-14 Concentración de radón-Temperatura ambiental (Elaboración propia)	59
Figura 4-15 Concentración de radón-Presión atmosférica (Elaboración propia).....	60
Figura 4-16 Concentración de radón-Humedad relativa (Elaboración propia)	61
Figura 4-17 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas en el día (Elaboración propia)..	62
Figura 4-18 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas 6 horas (Elaboración propia)....	63
Figura 4-19 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas en la última hora (Elaboración propia)	64
Figura 4-20 Concentración de radón-pH (Elaboración propia).....	65
Figura 4-21 Concentración de radón-Temperatura del agua (Elaboración propia).....	66
Figura 4-22 Concentración de radón-Turbidez (Elaboración propia)	67
Figura 4-23 Concentración de radón-Fosfatos (Elaboración propia)	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Numeración de Fuentes (Elaboración propia)	36
Tabla 4-1 Tabla general de resultados de concentración de radón y otros parámetros (Elaboración propia)	46
Tabla 4-2 Fuentes analizadas en 2024 y 2025 (Elaboración propia) [4]	52
Tabla 4-3 Resumen de fuentes con su litología.....	55
Tabla 4-4 Valores concentración de radón de Fonte do Arrabalde (Elaboración propia).....	57
Tabla 4-5 Valores concentración de radón en Fonte do Igrexario (Elaboración propia)	58

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación e importancia

El radón (Rn-222), es un gas noble radioactivo de origen natural, derivado de la desintegración del radio (Ra-226) dentro de la cadena de decaimiento del uranio (U-238). Su alta movilidad se debe a que no queda retenido en la matriz rocosa, sino que se difunde a través del suelo y puede disolverse en agua subterránea. Al liberarse en espacios cerrados durante el uso doméstico del agua (duchas, cocinas, grifos), representa un riesgo significativo para la salud humana [1].

Desde hace décadas, la exposición al radón ha sido identificada como la segunda causa principal de cáncer de pulmón, solo por detrás del tabaco [2]. Esto se debe a que, al ser inhalado, sus productos de desintegración pueden adherirse a las células epiteliales del sistema respiratorio, emitiendo partículas alfa, que pueden dañar el ADN y aumentar el riesgo de mutaciones cancerígenas. En este sentido, organismos como la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) han clasificado al radón y sus productos de desintegración como agentes carcinógenos para los humanos desde 1988. En la actualidad, se reconoce que su impacto en la salud no se limita únicamente a la inhalación, sino también a la ingesta de agua contaminada con radón, lo que puede contribuir a la exposición interna por radiación ionizante.

El riesgo asociado a la presencia de radón en aguas de consumo procedentes de aguas subterráneas suele ser bajo comparado con el correspondiente al total de radón inhalado, pero es un riesgo diferenciado de éste, puesto que la exposición se produce tanto por el consumo del gas disuelto como por la inhalación del radón liberado y de sus radionucleidos derivados. En áreas con acuíferos graníticos, como Galicia, se han identificado altas concentraciones de radón en agua de consumo humano, como demuestran estudios del Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar social [1].

A pesar de su importancia, el estudio del radón en agua de consumo ha recibido menos atención que su presencia en el aire. Hasta el momento, son pocos los estudios que analizan el riesgo sanitario de la ingesta de radón presente en el agua de consumo. Uno de ellos analiza el aumento del riesgo de desarrollar cáncer de estómago en una zona en la que el agua de consumo contenía elevadas concentraciones de uranio y otros radionucleidos de origen natural, los resultados obtenidos no encontraron relación positiva entre la presencia de radón en el agua y el riesgo de cáncer de estómago [3].

1.2 Localización del estudio

Galicia es una comunidad autónoma del noroeste de España caracterizada por una geología dominada por formaciones graníticas y metamórficas, lo que la convierte en una de las zonas con mayor potencial de exposición al radón en la Península Ibérica. Este gas noble radiactivo se encuentra en los acuíferos subterráneos y puede disolverse en el agua, lo que representa un riesgo para la salud pública cuando se consume sin tratamiento.

El consumo de agua en Galicia depende en gran medida de fuentes subterráneas, especialmente en las zonas rurales, donde es habitual que los habitantes recojan agua directamente de manantiales y fuentes naturales. Esta práctica, aunque tradicional, puede exponer a la población a niveles elevados de radón, ya que el agua no suele pasar por tratamientos específicos de reducción de radiactividad.

Además, la geología gallega influye directamente en la concentración de radón en el agua. Las rocas graníticas y metamórficas ricas en uranio favorecen la liberación de este gas radiactivo en los acuíferos, con una mayor presencia en aguas subterráneas profundas. Por ello, el estudio del radón en agua en esta comunidad es de gran relevancia para evaluar su impacto en la salud pública y establecer estrategias de mitigación.

El estudio del radón en aguas subterráneas ha sido objeto de diversas investigaciones en Galicia. Uno de los estudios más completos es el realizado en la cuenca de la Ría de Vigo, que identificó concentraciones de radón significativamente más altas en aguas subterráneas que en aguas superficiales. Este análisis incluyó:

- Manantiales y pozos en diversas ubicaciones.
- Estudios de variabilidad estacional del radón en el agua.
- Comparación entre fuentes naturales y sistemas de abastecimiento público.

Además, se han realizado estudios en otras zonas de Galicia, como Ourense y Lugo, donde se han detectado altas concentraciones de radón en acuíferos cristalinos. Sin embargo, muchos de estos estudios se han centrado en áreas urbanas y periurbanas, dejando un vacío de información sobre zonas rurales y fuentes de agua no reguladas, como los manantiales utilizados por la población.

1.3 Iniciativa del Centro Universitario de la Defensa

El interés por parte del CUD en la concentración de radón en el agua en la región de las Rías Baixas se fortaleció con el Trabajo de Fin de Grado del Alférez de Navío Jaime Nicolás Sánchez-Ferragut, presentado en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) en la Escuela Naval Militar. Este trabajo representó el primer estudio sobre radón en agua en la zona de la Península del Morrazo, incluyendo la Escuela Naval Militar y diversas fuentes de agua en los municipios de Moaña, Marín y Bueu, abriendo una nueva línea de estudio para futuras investigaciones [4].

El estudio de Sánchez-Ferragut tenía como objetivos principales determinar la concentración de radón en el agua en la Escuela Naval Militar y la Península del Morrazo y evaluar la efectividad de métodos de reducción del radón en el agua, como la agitación y el paso del tiempo.

Los resultados obtenidos mostraron que, si bien el agua de la Escuela Naval Militar presentaba bajos niveles de radón, muchas de las fuentes de la Península del Morrazo tenían valores notablemente superiores, pero sin sobrepasar los límites establecidos por la normativa vigente.

Este trabajo abrió una línea de estudio que ahora el presente Trabajo de Fin de Grado ampliará, obteniendo nuevas muestras en otras áreas de las Rías Baixas, realizar una revisión bibliográfica más detallada y centrar la investigación en obtener relaciones que arrojen luz sobre los parámetros que afectan a la concentración de radón en el agua de consumo.

1.4 Objetivos

Continuando la línea de estudio anterior, el TFG actual se plantea como objetivo general el siguiente:

Evaluar y caracterizar la concentración de radón disuelto en aguas subterráneas de la Península del Morrazo, analizando su relación con los diferentes tipos de suelo y unidades litológicas presentes, así como identificar los factores hidrogeológicos, meteorológicos y fisicoquímicos que pueden condicionar su presencia y variabilidad espacial.

En particular, en este trabajo se pretende:

- 1) A partir de una revisión bibliográfica, analizar los factores que afectan a la concentración de radón en el agua, incluyendo factores geológicos, hidrogeológicos y fisicoquímicos.
- 2) Ampliar el TFG de Sánchez Ferragut en términos de muestras analizadas en la Península de Morrazo, contrastando la evolución de la concentración de radón en las muestras que se han repetido para tener un mejor conocimiento de la presencia del radón en agua de la zona.
- 3) Llevar a cabo un análisis experimental en fuentes concretas para determinar con mayor precisión la posible relación entre la concentración de radón en agua y los diferentes parámetros fisicoquímicos y ambientales.

1.5 Metodología general

El presente Trabajo de Fin de Grado ha sido desarrollado siguiendo una estructura metodológica sistemática y coherente, con el objetivo de abordar el fenómeno del radón disuelto en agua desde una perspectiva integral que combina revisión bibliográfica, estudio normativo, y análisis experimental en campo y laboratorio.

En primer lugar, se realiza una introducción que contextualiza el problema del radón como agente radiológico de interés sanitario, exponiendo su origen, rutas de exposición y riesgos asociados. Se justifica la elección del área de estudio —la región gallega de las Rías Baixas— por su especial vulnerabilidad geológica al radón, y se presentan los objetivos específicos del trabajo.

A continuación, el apartado de estado del arte ofrece una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica existente sobre el radón en aguas de consumo. Se analizan los factores geológicos, hidrogeológicos y fisicoquímicos que afectan a su concentración, así como las metodologías de medición empleadas a nivel nacional e internacional, tanto activas como pasivas. También se recoge el marco normativo actualizado, con especial atención al Real Decreto 3/2023, que regula los valores paramétricos de radiactividad en agua de consumo.

En el capítulo de metodología experimental, se describe el procedimiento seguido para la recolección de muestras, la medición de radón con el equipo RTM 1688-2 y el análisis complementario de parámetros fisicoquímicos como el pH, temperatura, turbidez y concentración de fosfatos. Se detallan los principios físicos y matemáticos que sustentan la estimación de la concentración de radón en fase acuosa mediante equilibrio aire-agua.

El apartado de resultados presenta, en primer lugar, los datos obtenidos en una muestra amplia de fuentes de la Península del Morrazo, y posteriormente se centra en el análisis intensivo de dos fuentes seleccionadas por su elevada concentración de radón. Se incorporan representaciones gráficas para explorar posibles correlaciones con los factores estudiados.

Finalmente, se recogen las conclusiones derivadas del análisis, valorando el cumplimiento de los objetivos planteados y proponiendo líneas futuras de investigación, tanto para la mejora del conocimiento científico como para la aplicación práctica de estrategias de mitigación del radón en aguas de consumo.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se realiza una investigación sobre la normativa de aguas de consumo en España, los factores que afectan a la concentración de radón en el agua, llevando a cabo un estudio de la literatura científica publicada, los diferentes tipos de acuíferos y separando los factores en geológicos, hidrogeológicos y físicoquímicos. Por último, una revisión de los diferentes métodos de medida de radón en el agua.

2.1 Normativa de aguas de consumo

Las aguas de consumo se refieren al agua destinada al uso humano, incluyendo el agua potable utilizada para beber, cocinar, preparar alimentos y otros usos domésticos. También abarca el agua empleada en la producción de alimentos y bebidas, donde su calidad puede afectar la salud pública. En España, la regulación de estas aguas está sujeta a normativas estrictas que garantizan su salubridad y seguridad.

La regulación del agua de consumo en España ha evolucionado significativamente en las últimas décadas con el objetivo de garantizar la calidad del agua y proteger la salud pública. La legislación vigente se basa en normativas nacionales e internacionales que establecen criterios microbiológicos, químicos y radiactivos para su control. En este contexto, el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, representa la normativa más actual y relevante, estableciendo los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro [5].

Este decreto deroga el Real Decreto 140/2003, actualizando sus disposiciones de acuerdo con las exigencias de la Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo. Entre los aspectos más destacados de esta nueva normativa se incluyen la introducción de nuevos parámetros de calidad, el refuerzo del enfoque basado en la evaluación de riesgos y la mejora en la accesibilidad a información sobre la calidad del agua.

El marco normativo español en materia de agua de consumo ha experimentado diversas modificaciones a lo largo de los años, con el objetivo de adaptarse a los avances científicos. Algunos de los hitos normativos más importantes han sido la Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad, que estableció la base para la regulación del agua de consumo humano, asignando competencias a las administraciones públicas para su control y vigilancia; el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, que fue la primera norma específica que estableció los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo, transponiendo la Directiva 98/83/CE; el Real Decreto 314/2016 y el Real Decreto 902/2018, que modificaron la normativa de 2003, introduciendo mejoras en los métodos de análisis y control; y finalmente, el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, que supone la actualización más reciente y relevante, incorporando un enfoque más preventivo.

El Real Decreto 3/2023 introduce modificaciones clave en la regulación del agua de consumo, con el fin de mejorar su calidad y garantizar el acceso equitativo a este recurso. Algunas de las novedades más importantes incluyen el refuerzo del enfoque basado en la evaluación y gestión del riesgo, con medidas para evaluar los riesgos en todas las etapas del suministro de agua, desde la captación hasta el consumo final; la incorporación de nuevos parámetros de control, añadiendo contaminantes emergentes a la lista de vigilancia, incluyendo el Bisfenol A, los compuestos PFAS y los ácidos haloacéticos; la mayor transparencia y acceso a la información, exigiendo que los operadores publiquen datos sobre la calidad del agua en plataformas accesibles al público; y mejoras en el control del radón en agua, con límites paramétricos y medidas específicas para la gestión de este gas radiactivo en aguas subterráneas.

Uno de los pilares del Real Decreto 3/2023 es el establecimiento de valores paramétricos para diferentes contaminantes, garantizando que el agua suministrada sea segura para el consumo. Estos valores se dividen en parámetros microbiológicos, que incluyen la ausencia de *Escherichia coli*, enterococos intestinales y *Clostridium perfringens*; parámetros químicos, que establecen límites para

metales pesados como plomo, arsénico y mercurio, así como para compuestos orgánicos; y parámetros radiactivos, que regulan valores para la actividad alfa total, actividad beta total y radón en agua.

El Real Decreto 3/2023 establece un valor paramétrico de 500 Bq/L para el radón en agua de consumo, en línea con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En caso de que se superen estos niveles, las autoridades deben realizar una evaluación del riesgo radiológico y si se superan los 1000 Bq/l, llevar a cabo medidas correctoras como la aireación o el tratamiento del agua antes de su distribución. Además, la normativa exige que las administraciones sanitarias actualicen periódicamente la caracterización de las masas de agua subterráneas, identificando aquellas con mayores concentraciones de radón y estableciendo estrategias de mitigación adecuadas.

2.2 Factores que afectan a la concentración de radón en el agua

2.2.1 Tipos de acuíferos

Un acuífero se define como una formación geológica o conjunto de formaciones que poseen la capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades suficientes para ser aprovechadas. La circulación del agua subterránea en un acuífero depende de la porosidad y la permeabilidad del medio, lo que determina la capacidad de almacenamiento (capacidad de retención de agua) y la transmisividad (capacidad de conducción del flujo).

El agua almacenada en los acuíferos constituye una de las principales reservas hídricas disponibles para consumo humano, riego, usos industriales y recreativos. Además, cumple funciones ecológicas fundamentales, ya que sostiene caudales base en ríos y mantiene humedales y ecosistemas asociados.

Los acuíferos pueden clasificarse según distintos criterios, principalmente atendiendo a la presión hidrostática, al tipo de material geológico que los constituye, y a su ubicación geográfica.

Según la presión hidrostática:

Acuíferos libres o freáticos: También denominados no confinados, están en contacto directo con la atmósfera a través de una superficie libre (nivel freático). El agua se encuentra a presión atmosférica y la recarga se produce directamente por infiltración de precipitación o escorrentía superficial. Son los más comunes y vulnerables a la contaminación superficial.

Acuíferos confinados o artesianos: Están limitados superior e inferiormente por estratos impermeables o semipermeables. El agua subterránea se encuentra sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa completamente los poros o fracturas del medio. Cuando se perfora un pozo, el agua puede ascender por encima de la parte superior del acuífero, e incluso brotar en superficie si la presión es suficiente.

Acuíferos semiconfinados: Poseen una capa superior de baja permeabilidad (aquitardo) que permite una recarga limitada. Presentan características intermedias entre los libres y los confinados.

Según el tipo de material geológico:

Acuíferos porosos: Se desarrollan en formaciones sedimentarias no consolidadas o débilmente consolidadas (arenas, gravas, conglomerados, aluviones). El almacenamiento y flujo del agua ocurren a través de poros intergranulares. Son frecuentes en valles fluviales y llanuras aluviales.

Acuíferos fisurados: Ocurren en rocas consolidadas (granitos, cuarcitas, basaltos, pizarras, etc.) donde la circulación del agua depende de fracturas, diaclasas y fisuras. La porosidad primaria es generalmente nula, por lo que toda la permeabilidad está controlada por la estructura tectónica y la red de fracturas.

Acuíferos kársticos: Se desarrollan en rocas carbonatadas (calizas, dolomías) afectadas por procesos de disolución química (karstificación), creando redes de conductos, oquedades y

cavernas. Son sistemas altamente heterogéneos, con elevada transmisividad y gran vulnerabilidad a la contaminación.

Según la ubicación geográfica:

Acuíferos costeros: Son aquellos en contacto hidráulico con el mar, y en parte invadidos por agua salina. Presentan el riesgo de intrusión salina si se produce una sobreexplotación, afectando la calidad del recurso.

Acuíferos continentales o interiores: Situados en el interior continental, sin relación directa con el mar. Pueden estar conectados hidráulicamente con ríos, lagos o humedales.

2.2.2 Revisión de la literatura

En lugares muy diversos del mundo se ha llevado a cabo la investigación acerca de la concentración de radón en agua, empleando diferentes técnicas, métodos y llegando a resultados ampliamente diferentes. Esto se debe principalmente a las particulares condiciones de cada lugar en el que se hizo el estudio, que van desde zonas más exóticas como la India hasta la Ría de Vigo.

TFG Jaime Nicolás Sánchez-Ferragut Guitart

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) fue desarrollado por Jaime Nicolás Sánchez-Ferragut Guitart en el Centro Universitario de la Defensa (CUD), dentro de la Escuela Naval Militar de Marín, como parte del Grado en Ingeniería Mecánica con Intensificación en Tecnología Naval. Su principal objetivo fue determinar la concentración de radón en aguas de consumo en la Escuela Naval Militar de Marín y la Península del Morrazo, analizando los factores que influyen en su presencia y evaluando métodos de reducción.

Se realizaron muestreos de agua en diferentes puntos de la Escuela Naval Militar y en diversas fuentes y manantiales de la Península del Morrazo. Para la medición del radón se utilizó el dispositivo RTM 1688-2 SARAD, mientras que otros parámetros como pH, conductividad y temperatura fueron registrados para evaluar su influencia en la concentración del gas. Además, se estudiaron dos métodos para reducir la concentración de radón en el agua: el efecto del tiempo de espera, analizando cómo disminuye la concentración de radón con el paso del tiempo, y la agitación del agua, evaluando su impacto en la eliminación del gas.

Los resultados mostraron que el agua de la Escuela Naval Militar presentó concentraciones de radón muy bajas, dentro de los límites seguros. Se encontró una relación entre el pH y la concentración de radón, con valores más elevados en aguas más ácidas. También se observó correlación positiva con la conductividad eléctrica.

El tiempo de espera redujo la concentración de radón en aproximadamente 1.5% por hora en recipientes cerrados y 2% por hora en recipientes abiertos. La agitación del agua fue el método más eficaz, logrando reducir la concentración de radón en un 50% en 5 minutos y por debajo de los 100 Bq/L tras 10 minutos de agitación.

El estudio confirmó la presencia de radón en aguas de consumo en Galicia, con variaciones según la fuente y la geología local. Se demostró que tanto el tiempo como la agitación son métodos efectivos para reducir el radón en el agua, lo que podría ser útil para disminuir la exposición en zonas con alta concentración.

Se recomienda un monitoreo continuo del radón en aguas subterráneas en Galicia. También se propone la implementación de medidas correctoras, como la aireación del agua en fuentes con niveles elevados, la ampliación del estudio a otras zonas con mayor riesgo geológico y la realización de investigaciones adicionales sobre la relación entre el radón y otros parámetros fisicoquímicos del agua.

Ría de Vigo, Galicia

En el estudio realizado en la Ría de Vigo, se evaluó la concentración de radón en distintas fuentes de agua en la región, considerando su relación con la geología local. Se recolectaron muestras de agua de diferentes fuentes, incluyendo pozos, manantiales y aguas de red, utilizando espectrometría alfa para medir las concentraciones de radón. Los resultados mostraron niveles significativamente más altos en aguas subterráneas en comparación con aguas superficiales. Se observó una clara correlación entre la litología del terreno y la concentración de radón [6].

Además de la geología, se identificaron otros factores que influyen en la concentración de radón en el agua, como la profundidad del acuífero, la tasa de recarga hídrica y la temperatura del agua. Se detectó una variabilidad estacional notable, con concentraciones más altas durante la época seca debido a una menor dilución del radón en el agua. También se evidenció que la velocidad de flujo del agua en los acuíferos puede afectar la acumulación del gas, ya que en sistemas de flujo lento el radón tiende a acumularse en mayor cantidad. La composición química del agua, particularmente la presencia de minerales como el uranio y el radio también juega un papel crucial en la disolución y liberación del radón.

Se recomendó implementar estrategias de monitoreo y ventilación en las fuentes de agua con concentraciones elevadas, así como estudiar con mayor profundidad la interacción entre la composición química del agua y la liberación del radón en diferentes condiciones ambientales. También se propuso analizar cómo la presión atmosférica y las variaciones en la actividad tectónica pueden influir en la concentración de radón en los acuíferos de la región.

Estudio general de Galicia

La Universidad de Santiago de Compostela, desde su departamento de física de partículas, llevó a cabo un estudio en Galicia, que como ya se comentó anteriormente, es una de las regiones con más presencia de radón en la Península Ibérica.

Se realizaron mediciones de ^{222}Rn (radón), actividad alfa y beta total, y radionucleidos como ^{226}Ra y ^{224}Ra , en una amplia gama de fuentes de agua: manantiales tradicionales, aguas de balnearios y pozos de plantas embotelladoras. Además, se llevó a cabo un estudio estacional en cinco redes de abastecimiento urbano de las principales ciudades de Galicia, concretamente de las ciudades de A Coruña, Vigo, Lugo, Ourense y Pontevedra con el fin de evaluar posibles variaciones temporales en los niveles de radiactividad del agua [7].

Los resultados revelaron que las aguas de las plantas embotelladoras presentaban valores radiológicos superiores a los límites establecidos por la Unión Europea, aunque estos son eliminados durante el proceso industrial antes de llegar al consumidor. Por otro lado, las aguas de las redes de suministro urbano no mostraron valores elevados ni variaciones significativas en función de la estación del año.

Se determinaron correlaciones estadísticas entre la radiactividad del agua y factores ambientales, confirmando que el tipo de sustrato geológico es un factor determinante en los niveles de radón y otros radionucleidos en el agua subterránea. Se encontró que las zonas con formaciones graníticas y metamórficas presentan concentraciones más altas de radón, mientras que los niveles en aguas superficiales son significativamente menores.

La Garrotxa, Gerona

En 2014, el Grup de Física de les Radiacions y la Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia del Departament de Física y Geología de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), analiza los

niveles de radón en aguas subterráneas y la radiactividad natural en suelos de la región volcánica de La Garrotxa [8].

Se midieron concentraciones de radón en pozos y manantiales, junto con la actividad radiactiva en suelos de diferentes formaciones geológicas. Los resultados indicaron que los niveles de radón en aguas subterráneas fueron generalmente bajos, con valores inferiores a 30 Bq/L, lo que sugiere que los acuíferos de La Garrotxa no presentan una acumulación significativa de radón disuelto.

También se analizaron las concentraciones de radionucleidos en distintos tipos de suelos, encontrando que los depósitos sedimentarios cuaternarios presentan los valores más altos de potasio-40 (^{40}K), radio-226 (^{226}Ra) y torio-232 (^{232}Th). Además, se midieron las dosis de radiación absorbida en el aire, tanto en exteriores como en interiores, revelando una relación entre la radiación gamma y la geología del terreno.

Balneario Caldas de Besaya, Cantabria

El Trabajo de Fin de Carrera de Daniel Rábago Gómez, realizado en la Universidad de Cantabria en 2013, se centra en la aplicación de un sistema de monitorización para la concentración de gas radón en el agua de una instalación termal.

El estudio analizó los niveles de radón en el agua y en el aire del balneario Las Caldas de Besaya durante aproximadamente un año. Se emplearon distintos dispositivos, como el RTM 2100, el Radon Scout y la espectrometría gamma, para determinar el factor de transferencia del gas en los tubos de silicona utilizados en la instalación experimental.

Los resultados del estudio indican que los valores de radón en el agua y en el aire dentro del balneario fueron elevados, con una media anual de 559 Bq/L en el agua y 2850 Bq/m³ en el aire, señalando que el agua es la principal fuente de radón en el ambiente. A partir de estos valores, se calcularon las dosis de radiación recibidas por pacientes y trabajadores del balneario. Se concluyó que la dosis recibida por los pacientes tras una semana de tratamiento es insignificante, pero los trabajadores están expuestos a niveles casi ocho veces superiores a la media mundial de radiación ionizante de origen natural.

El estudio también reveló que los procesos termales pueden influir en el comportamiento del radón y que su movilidad está afectada por diversos parámetros físico-químicos, como el pH y el potencial redox, encontrándose correlaciones significativas con ambos factores.

Transilvania, Rumanía

En un estudio llevado a cabo en 2008 se analizan las concentraciones de radón en diferentes fuentes de agua en la región de Transilvania, Rumania. Se llevaron a cabo mediciones en 1511 muestras de agua provenientes de fuentes superficiales, pozos y manantiales, con el objetivo de evaluar la radiación natural presente en estos entornos [9].

Para la medición del radón, se utilizó el sistema LUK-VR, que emplea la técnica de extracción por desgasificación, en la cual el gas radón es liberado de la muestra de agua y capturado en un volumen de aire en equilibrio, permitiendo su posterior análisis con una celda Lucas. Debido a la gran cantidad de muestras recolectadas, se realizó un proceso de medición en estado de no-equilibrio, lo que permitió una rápida evaluación de los niveles de radón sin esperar la estabilización completa con sus productos de desintegración.

Los resultados muestran una amplia variabilidad en las concentraciones de radón, con valores que van desde 0,5 Bq/l hasta 129,3 Bq/l con un promedio de 15,4 Bq/l en todas las muestras. Se observó que las concentraciones más bajas se encuentran en aguas superficiales (lagos y ríos), con un promedio de 2.6 Bq/l, mientras que las aguas de pozo presentan valores significativamente mayores, con un promedio

de 15.8 Bq/l³ y un máximo de 112,6 Bq/l. Las aguas de manantial registraron las concentraciones más elevadas, con una media de 21,5 Bq/l y picos de hasta 129,3 Bq/l.

El análisis también sugiere una correlación entre los niveles de radón y la geología del área, particularmente en regiones con formaciones graníticas y actividad volcánica pasada. Se destaca la importancia del monitoreo del radón en el agua debido a su potencial impacto en la calidad del aire interior cuando el gas se libera en espacios cerrados a través del uso doméstico del agua.

Noroeste de Rumanía

Este estudio, desarrollado en la región de Transilvania Noroccidental, Rumanía, tuvo como objetivo medir las concentraciones de radón en aguas destinadas al consumo humano y en aire interior de viviendas, con el fin de evaluar el riesgo radiológico y su relación con la geología de la zona. El área de estudio abarcó cuatro condados (Satu Mare, Maramureş, Sălaj y Bihor), caracterizados geológicamente por la presencia de zonas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, con un relieve dominado por depresiones tectónicas rodeadas por la cadena alpina de los Cárpatos [10].

Se analizaron 81 muestras de agua (66 de consumo humano de pozos, manantiales y red de abastecimiento y 15 de aguas superficiales). Las concentraciones de radón oscilaron entre 0.9 y 68.9 Bq/L, con un promedio general de 11.4 Bq/L. Las aguas de manantial presentaron los niveles más altos (hasta 68.9 Bq/L), seguidas por las de pozo (hasta 35.2 Bq/L), mientras que las aguas de grifo y superficiales registraron valores bajos, todos por debajo del límite de 11.1 Bq/L recomendado por la EPA. Las dosis efectivas anuales por ingestión se estimaron en 177.3 µSv/año para aguas de pozo y 218.2 µSv/año para aguas de manantial.

En cuanto al análisis de factores condicionantes, el estudio identifica varios elementos relevantes. En primer lugar, la geología local es clave, dado que las mayores concentraciones se hallaron en zonas con presencia de formaciones volcánicas y metamórficas, lo cual sugiere una influencia directa de la litología sobre la liberación de radón. En segundo lugar, el tipo de fuente de agua es determinante: las aguas profundas (pozos y manantiales) mostraron valores superiores a los de aguas superficiales o tratadas. Por último, la utilización doméstica del agua (especialmente en actividades como duchas o lavado) se reconoce como una vía de liberación secundaria de radón al aire interior, aunque su contribución es limitada en comparación con la emanación directa desde el suelo.

En paralelo, se realizaron mediciones en aire interior de 12 viviendas, con concentraciones que oscilaron entre 26 y 415 Bq/m³. En tres localizaciones se superó el umbral de referencia de 300 Bq/m³ establecido por la ICRP. No se encontraron correlaciones directas entre los niveles de radón en el agua y en el aire interior, lo que indica que las fuentes de exposición pueden tener orígenes independientes.

Băița-Ștei, Rumanía

Este estudio se llevó a cabo en el área minera de Băița-Ștei, en el condado de Bihor (Rumanía), una región históricamente expuesta a radiación natural debido a la cercanía de antiguas minas de uranio. El objetivo principal fue determinar la concentración de radón (²²²Rn) en el agua potable procedente de pozos, manantiales y sistemas de abastecimiento urbano, así como evaluar la dosis efectiva anual por ingestión e inhalación derivada del uso doméstico del [11].

Se analizaron 166 muestras de agua durante el año 2012, utilizando el sistema LUK-VR con celdas Lucas, aplicando una metodología que garantiza la mínima pérdida de radón en el proceso de muestreo. Los resultados revelaron una amplia variabilidad de concentraciones: desde 1.9 hasta 134.3 Bq/L, con medias de 35.5 Bq/L para aguas de pozo, 18.5 Bq/L para manantiales y 6.9 Bq/L para aguas de grifo.

El análisis identificó varios factores condicionantes de la concentración de radón en agua:

- Geología del subsuelo: la región se encuentra sobre un batolito granítico con mineralización hidrotermal de uranio y otras intrusiones magmáticas como dacitas y riolitas, lo que justifica la elevada concentración de radón disuelto, especialmente en aguas subterráneas.
- Tipo de fuente de agua: las aguas de pozo, al estar en contacto directo con formaciones uraníferas, presentaron las concentraciones más elevadas. En cambio, las aguas de red, probablemente tratadas o más expuestas a ventilación, mostraron valores significativamente menores.
- Factores fisicoquímicos y meteorológicos: aunque no se midieron directamente parámetros como pH, conductividad o dureza del agua, sí se tomó en cuenta la temperatura del agua y del aire durante la recolección (entre 8–18 °C para el agua y hasta 16 °C en el ambiente), y se evitaron muestreos tras episodios de lluvia. Se reconoce que la temperatura afecta la solubilidad del radón, aunque no se realizó un análisis específico de esta variable.

El estudio concluye que la geología rica en uranio, el tipo de captación del agua y en menor medida la temperatura ambiental son factores clave que determinan la concentración de radón en las aguas del área de Băița-Ștei.

Noreste de Hungría

Este estudio, desarrollado en la región de Mátraderecske, al noreste de Hungría, tuvo como objetivo evaluar las concentraciones de radón en aguas subterráneas, analizando tanto su variabilidad espacial como temporal, y los factores físicos y geológicos que influyen en dicha variación. La zona se caracteriza por una geología compleja compuesta por andesitas, tobas volcánicas, calizas triásicas y arcillas con niveles de uranio que alcanzan hasta 100 ppm, unas 30 veces por encima del promedio mundial, lo que proporciona un entorno ideal para el estudio del comportamiento del radón [12].

Se realizaron mediciones regulares en 15 pozos domésticos entre 1994 y 1996, con una frecuencia de dos semanas. Las concentraciones de radón variaron entre 20 y 350 Bq/L, con fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo y del espacio. En pozos adyacentes, separados por menos de 30 metros, se observaron diferencias de hasta un factor 10, y en algunos casos individuales, variaciones de un factor de 3 a 6 a lo largo del año.

El estudio identificó varios factores que influyen en estas concentraciones. En primer lugar, se observó que la posición del nivel freático en relación con capas ricas en uranio era determinante: cuanto menor la distancia entre el agua subterránea y dichas capas, mayor la concentración de radón. En segundo lugar, se encontró una correlación significativa entre la presión atmosférica y la concentración de radón en el gas del suelo, con un coeficiente de correlación de $k = -0.84$, indicando que descensos en la presión favorecen la emanación de radón desde el subsuelo. En tercer lugar, se comprobó que la geología local, especialmente en laderas, influía en la distribución vertical del uranio, afectando la cantidad de radón disuelto en el agua en función de la topografía y la profundidad del acuífero.

El estudio también detectó variaciones diarias en la concentración de radón en algunos pozos, con máximos al mediodía y mínimos en la madrugada, aunque estos patrones no siempre fueron consistentes. Estos hallazgos destacan la necesidad de realizar mediciones continuas y no esporádicas para obtener una evaluación radiológica representativa.

Valle de Kłodzko (Sudetes sudoccidentales), Polonia

Este estudio se desarrolló en el sector suroccidental del Valle de Kłodzko, en los Montes Bystrzyckie (Sudetes, Polonia), una región de potencial medio de radón caracterizada por afloramientos de rocas cristalinas como gneises, esquistos micáceos y anfibolitas, pertenecientes al complejo metamórfico Orlica-Bystrzyca. El objetivo principal fue analizar la variabilidad espacial y temporal de la

concentración de radón (^{222}Rn) en aguas subterráneas, así como los factores geológicos, hidroquímicos y ambientales que determinan dicha variabilidad [13].

Se tomaron mediciones periódicas en seis manantiales entre 2007 y 2016. Las concentraciones de radón disuelto oscilaron entre 35.3 y 272.0 Bq/L, con una media de 107.6 Bq/L y una mediana de 67.0 Bq/L, valores que se sitúan dentro del rango de fondo geoquímico de la zona (10–317 Bq/L).

El estudio identificó varios factores que influyen en la concentración de radón, entre ellos:

- Factores geológicos: Aunque la litología (gneis, esquisto) tiene una influencia secundaria, se observó que la presencia de deformaciones tectónicas frágiles cerca de los manantiales tiene un impacto directo sobre la liberación de radón al agua subterránea, funcionando como zonas preferentes de emisión.
- Factores fisicoquímicos del agua: Se realizó un análisis detallado de variables como pH (entre 5.0 y 7.1), conductividad eléctrica (20–120 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperatura del agua (6.1–9.7 °C). Se encontró una correlación inversa estadísticamente significativa entre la temperatura del agua y la concentración de radón, lo cual concuerda con la ley de Henry: a menor temperatura, mayor solubilidad de gases como el radón. También se observó que en aguas con mayor pH y mineralización (zona más baja del valle), el contenido de radón tiende a disminuir.
- Condiciones hidrogeológicas y meteorológicas: Se evidenció una correlación positiva entre el caudal del manantial y la concentración de radón, lo cual sugiere que un mayor flujo subterráneo favorece el arrastre de radón desde zonas más profundas antes de que este decaiga. Además, se discutió la posibilidad de que las lluvias frescas desplazan aguas saturadas de radón, lo que también influye en la variabilidad temporal de las concentraciones observadas.

El estudio concluye que, en regiones de potencial medio de radón con rocas cristalinas, es común encontrar aguas subterráneas con concentraciones elevadas de radón, por lo que deberían someterse a monitoreo obligatorio antes de su uso doméstico.

Suecia (Regiones de Östergötland y Kalmar)

Esta tesis doctoral, realizada en Suecia (Universidad de Linköping), constituye un estudio exhaustivo sobre la presencia de radón (^{222}Rn) en aguas naturales, abordando tanto aspectos analíticos como la influencia de parámetros fisicoquímicos, geológicos y ambientales. El trabajo se centra en aguas subterráneas de 328 pozos perforados en regiones con litologías graníticas del sur de Suecia, combinando análisis radiométricos, químicos, estadísticos y espaciales mediante sistemas de información geográfica (GIS) [14].

Las concentraciones de radón en agua oscilaron entre 5 Bq/L y valores extremos de hasta 8105 Bq/L, siendo los valores más elevados asociados a acuíferos en contacto con granitos uraníferos. Los resultados mostraron una elevada variabilidad espacial, y solo un 13% de los pozos presentaron equilibrio radiactivo entre los radionucleidos de la serie del uranio (^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po).

El estudio destaca de forma muy clara la influencia de los parámetros fisicoquímicos del agua sobre la concentración de radón, con especial atención a:

- pH: Se observaron diferencias en el comportamiento del radón a pH bajos frente a valores neutros o alcalinos. En medios ácidos, la movilidad del radón se ve favorecida.
- Fluoruros: Se detectó una fuerte correlación entre la concentración de fluoruro y la retención de radón en el agua. A mayor contenido en fluoruro, especialmente a pH bajo, menor es la liberación de radón al aire, probablemente por formación de microburbujas o estructuras tipo clatrato que retienen el gas.

- Carbonatos, conductividad, nitratos, sulfatos, alcalinidad, cesio, plomo y manganeso también mostraron correlaciones con el radón, evaluadas mediante modelos de regresión multivariante (PLS).
- Temperatura: Se demostró experimentalmente que la transferencia de radón del agua al aire aumenta exponencialmente con la temperatura del agua, alcanzando el 100% de liberación a más de 42 °C.

En cuanto a condiciones meteorológicas, aunque no se estudian directamente parámetros como presión o humedad, sí se incluye un análisis de la transferencia del radón al aire en ambientes interiores, así como su contribución relativa a la dosis total recibida por inhalación frente a la ingestión.

La tesis concluye que los factores fisicoquímicos, especialmente el contenido en fluoruro, el pH y la temperatura, son decisivos para comprender la movilidad del radón en aguas subterráneas. Además, se subraya que la distribución del radón en aguas no se puede explicar únicamente por la geología del sustrato, siendo necesarias aproximaciones multivariantes y geoespaciales para modelar su comportamiento.

Konya, Turquía

Este estudio, realizado en el centro urbano de Konya (Turquía), tuvo como objetivo determinar las concentraciones de radón (^{222}Rn) en aguas de pozo empleadas para el consumo humano y evaluar los riesgos radiológicos asociados. Se recolectaron muestras de 16 pozos profundos ubicados en tres distritos (Selçuklu, Meram y Karatay), pertenecientes principalmente a los acuíferos de las formaciones geológicas Topraklı y Yürükler, caracterizadas por sedimentos aluviales, conglomerados, areniscas y calizas [15].

Las mediciones se realizaron durante la primavera y el verano de 2012, empleando el detector AlphaGUARD PQ 2000PRO con sistema AquaKIT, mediante un circuito cerrado de degasificación. Las concentraciones de radón registradas oscilaron entre 1.44 ± 0.18 y 27.45 ± 1.25 Bq/L.

El estudio identificó varios factores que afectan la concentración de radón:

- Profundidad del pozo: Se observó una correlación positiva moderada entre la profundidad del pozo y la concentración de radón, con los valores más altos registrados en pozos de hasta 300 metros de profundidad.
- Litología del acuífero: La presencia de formaciones ricas en arcillas, conglomerado y sedimentos finos favorece la retención de radón y su acumulación en las aguas confinadas.
- Condiciones meteorológicas (temperatura del agua y del aire): Aunque no se analizaron directamente variables atmosféricas como la presión o la humedad, sí se menciona la influencia de la temperatura ambiental, al compararse las mediciones entre primavera (6.8 a 25.9 °C) y verano (13.1 a 35 °C). Se observó que las concentraciones de radón fueron ligeramente menores en verano, lo cual se relaciona con la menor solubilidad del gas a mayor temperatura.

Además, se calcularon las dosis efectivas anuales por ingestión de agua, encontrándose un rango entre 0.29 y 5.49 mSv/año, siendo estas dosis mayores en pozos profundos y con mayor concentración de radón.

Tokat, Turquía

Este estudio constituye la primera medición sistemática de radón disuelto en aguas naturales en la región de Tokat, en el centro-norte de Turquía. Su objetivo fue cuantificar las concentraciones de radón (^{222}Rn) en aguas de consumo humano, procedentes de grifos, manantiales y del río Yesilirmak, que atraviesa el núcleo urbano. Las muestras se recogieron entre junio de 2009 y enero de 2010 y se

analizaron en el laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Afyon Kocatepe, utilizando un sistema comercial de desgasificación al vacío y un monitor de radiación AB-5R [16].

Las concentraciones de radón halladas fueron relativamente bajas en comparación con otras regiones del país y con los límites internacionales, con valores entre:

- 0.48 – 1.30 Bq/L en agua de grifo
- 0.13 – 1.20 Bq/L en agua de manantial
- 0.09 – 0.83 Bq/L en agua del río Yesilirmak

Aunque el objetivo principal del estudio fue de carácter cuantitativo, los autores identificaron que los factores geológicos locales, en una zona carente de formaciones uraníferas significativas, podría ser el principal motivo de los bajos niveles de radón detectados en las aguas subterráneas y superficiales de la zona.

Erbil, Irak

En la ciudad de Erbil, Irak, se analizó la relación entre la concentración de radón en aguas subterráneas y diversos parámetros fisicoquímicos del agua, como el pH, los sólidos disueltos totales (TDS), la dureza del agua y la concentración de sulfatos y magnesio. Para llevar a cabo este análisis, se recolectaron 24 muestras de agua de pozos profundos en cinco zonas distintas de la ciudad durante febrero de 2019 [17].

La medición del radón se realizó con el detector electrónico RAD-7, mientras que las pruebas fisicoquímicas fueron realizadas en laboratorio mediante técnicas estándar. Los resultados mostraron que los niveles de radón en las muestras analizadas variaban entre 2.1 Bq/l y 30.8 Bq/l, con un valor promedio de 11.9 Bq/l.

A pesar de que no se encontró una correlación significativa entre la concentración de radón y el pH o la dureza del agua, sí se observó una relación positiva con los niveles de sulfatos y magnesio, lo que sugiere que ciertos minerales presentes en el agua pueden favorecer la solubilidad del radón. Aunque la mayoría de los valores se encontraban dentro de los límites de seguridad establecidos por la EPA de EE. UU. (11.1 Bq/l), algunos pozos superaban el límite.

Thirthahalli Taluk, Karnataka, India

En India, un estudio llevado a cabo en la región de Thirthahalli Taluk, Karnataka, investigó la concentración de radón en el agua potable con el propósito de calcular la dosis efectiva anual recibida por la población y analizar su variabilidad estacional [18].

Se tomaron muestras de agua de distintos acuíferos en una zona caracterizada por suelos graníticos, que son conocidos por su alto contenido en uranio, lo que podría favorecer la liberación de radón en el agua subterránea. Para la medición del gas se utilizó la técnica de Scintillation Radon Monitoring System (SRM), que permite detectar concentraciones de radón en muestras líquidas con gran precisión. Los resultados obtenidos revelaron que la concentración de radón en el agua potable fluctuaba entre 0.37 Bq/L y 87.02 Bq/l, con un valor promedio de 15.3 Bq/l.

Se observó que en algunas muestras la concentración de radón era mayor durante el verano y menor en la temporada de lluvias, posiblemente debido a la recarga de los acuíferos con agua superficial menos contaminada.

En cuanto a la exposición a la radiación, la dosis efectiva anual calculada para la población osciló entre 1.01 mSv/año y 237.56 mSv/año, lo que indica que en ciertas zonas los valores de exposición al radón superaban ampliamente el límite recomendado por la OMS (0.1 mSv/año). Este hallazgo sugiere

que la población podría estar expuesta a niveles peligrosos de radiación, por lo que se recomienda la implementación de sistemas de aireación en los suministros de agua para reducir la concentración de radón antes de su consumo.

Ramanagara y Tumkur, Katarnaka, India

El estudio realizado en los distritos de Ramanagara y Tumkur en Karnataka, India, analiza la concentración de radón en el agua subterránea, junto con varios parámetros físico-químicos, para evaluar los posibles riesgos para la salud asociados con su consumo. Se recolectaron muestras de agua de pozos y bombas manuales y se analizaron mediante el método de emanación y sistema de centelleo. Los resultados mostraron una variabilidad considerable en la concentración de radón, con valores que oscilaron entre 2.96 ± 0.89 Bq/L y 299.06 ± 6.98 Bq/L, con un promedio de 54.53 ± 3.12 Bq/L. Al comparar estos valores con los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se encontró que el 36 % de las muestras tenían concentraciones de radón por debajo del nivel máximo permitido de 11 Bq/L, mientras que el restante 64 % superaba este límite [19].

El estudio también abordó la relación entre el radón y otros parámetros químicos del agua. Se observó una correlación positiva entre las concentraciones de radón y fluoruro, lo que sugiere que la presencia de fluoruro en el agua puede estar asociada con niveles elevados de radón, probablemente debido a la presencia de minerales uraníferos en las formaciones geológicas de la región. Por otro lado, se identificó una correlación negativa débil entre el radón y los niveles de cloruros y sulfatos.

El estudio concluye que los niveles elevados de radón en el agua subterránea de la región están directamente relacionados con la geología local, especialmente en áreas con granitos rosados ricos en radionucleidos. La presencia de fallas y fracturas en la estructura geológica también facilita la migración del radón desde los minerales de uranio subyacentes hacia los acuíferos. Además, la contaminación química del agua subterránea por flúor, nitratos y sulfatos plantea riesgos adicionales para la salud de los habitantes de la zona.

Bosso, Nigeria

En la comunidad de Bosso, estado de Níger, Nigeria, se analizaron muestras de agua subterránea de pozos excavados a mano y perforaciones profundas para determinar la concentración de radón (^{222}Rn) y los riesgos radiológicos asociados a su [20].

Se recolectaron 20 muestras durante la temporada de lluvias, cuando la recarga de los acuíferos es alta. Utilizando detectores RAD-7 acoplados con RAD-H₂O, se encontraron concentraciones promedio de 9.81 Bq/l en pozos excavados y 24.78 Bq/L en perforaciones profundas, con valores máximos de 42.5 Bq/l.

La mayor concentración en perforaciones profundas se atribuye a su mayor profundidad y menor ventilación, junto con la geología local rica en uranio, compuesta por rocas graníticas y metamórficas. La dosis efectiva anual estimada fue de 0.026 mSv/año en pozos excavados y 0.067 mSv/año en perforaciones profundas, valores inferiores al límite de 0.1 mSv/año de la Unión Europea, lo que sugiere un riesgo bajo a corto plazo.

Sin embargo, el estudio advierte que la exposición prolongada podría suponer un riesgo sanitario, especialmente debido a la liberación de radón en espacios cerrados durante el uso del agua en actividades domésticas.

Jazan, Arabia Saudi

Este estudio, realizado por el Departamento de Física de la Universidad de Jazan (Arabia Saudita) en colaboración con el Laboratorio de Metrología de Radiación Ionizante del Instituto Nacional de Estándares de Egipto, analiza los niveles de radón en el agua potable y subterránea de la región de Jazan, ubicada en el suroeste de Arabia Saudita. Su objetivo es determinar la concentración de radón en agua y evaluar los riesgos para la salud pública asociados con su ingestión e inhalación [21].

Se recolectaron 110 muestras de agua de 11 ubicaciones distintas dentro de Jazan, abarcando agua potable (desalinizada) y agua subterránea (de pozos y manantiales utilizados en el hogar y la agricultura). Se aplicó la técnica de copa sellada con detectores CR-39, un método pasivo confiable para medir la actividad del radón en el agua.

Los resultados mostraron que la concentración media ponderada de radón en el agua potable fue de 2.47 ± 0.14 Bq/L, mientras que en el agua subterránea alcanzó 2.95 ± 0.22 Bq/L. Estos valores están muy por debajo del límite máximo de 11 Bq/L establecido por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA, 1999) y dentro de los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Unión Europea (UE).

Se calcularon las dosis efectivas anuales de exposición al radón, considerando tanto la ingestión como la inhalación. Los valores obtenidos fueron de 24.25 ± 1.33 μ Sv/año para el agua potable y 28.99 ± 2.12 μ Sv/año para el agua subterránea, cifras significativamente inferiores al límite de 0.1 mSv/año recomendado por la OMS y la UE.

Baños de Agua Santa, Tungurahua, Ecuador

Este estudio, realizado en la Universidad de Las Américas (UDLA, Ecuador), evalúa la concentración de radón disuelto (^{222}Rn) en las aguas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua. El análisis se llevó a cabo en tres balnearios: El Salado, La Virgen y Santa Ana, considerando su relación con la geología de la zona y los posibles efectos en la salud por inhalación del gas.

Las mediciones se realizaron utilizando el detector RAD7 con accesorio H₂O durante los meses de agosto y septiembre de 2018, siguiendo protocolos establecidos para garantizar la precisión de los datos. Se tomaron muestras de las piscinas de cada balneario y se complementó el estudio con espectrometría gamma con un detector de germanio hiperpuro (GeHP) en el laboratorio de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares [22].

Los resultados indicaron concentraciones promedio de radón de 0.3 Bq/l en El Salado, 0.8 Bq/L en La Virgen y 0.9 Bq/l en Santa Ana.

Imbabura y Pichincha, Ecuador

Este estudio fue realizado en la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Central del Ecuador. Su objetivo fue cuantificar la concentración de radón (Rn-222) en fuentes termales de las provincias de Imbabura y Pichincha, zonas con alta actividad volcánica en Ecuador, y evaluar los posibles riesgos asociados a la exposición prolongada a este gas radiactivo.

Se recolectaron muestras en 13 balnearios (9 en Pichincha y 4 en Imbabura), utilizando un detector Pylon modelo RM-1003, basado en un detector de sulfuro de zinc activado con plata. Las muestras se tomaron en recipientes sellados para evitar la pérdida de radón y se midió tanto el radón disuelto en el agua como el gas liberado en el aire en espacios cerrados. También se registraron parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, caudal y altitud para determinar su influencia en la variabilidad del radón.

Los resultados mostraron que los balnearios de Pichincha presentaban mayores concentraciones de radón que los de Imbabura, lo que se atribuye a su proximidad a cerros y volcanes activos, como el

Guagua Pichincha. Las fuentes subterráneas presentaban mayores concentraciones de radón que las piscinas, debido a la liberación del gas cuando el agua entra en contacto con el aire. Los valores más altos se encontraron en los balnearios de Tesalia (1325,24 Bq/m³), Cununyacu (1145,40 Bq/m³) y Sillunchi (885,56 Bq/m³) en Pichincha. En Imbabura, las concentraciones más altas se registraron en La Salud (516,98 Bq/m³) y Las Lagartijas (482,38 Bq/m³).

El estudio concluye que el radón en aguas termales de Ecuador puede representar un riesgo radiológico, especialmente en zonas cercanas a fallas geológicas activas.

Arequipa y Moquegua, Perú

Este estudio fue realizado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), dentro de la Facultad de Ciencias Naturales y Formales.

La investigación tuvo como propósito evaluar la concentración de radón (Rn-222) en aguas subterráneas de los geiseres y baños termales en Arequipa y Coalaque (Moquegua, Perú), con el objetivo de caracterizar la radiactividad natural presente en estas fuentes hídricas y determinar los posibles riesgos sanitarios asociados a su uso.

Se recolectaron muestras de agua en 38 puntos de muestreo ubicados en las provincias de La Unión, Caylloma, Arequipa y Sánchez Cerro (Moquegua). Se emplearon técnicas de medición con detectores pasivos LR 115 II, centelleo líquido (LSC) y Botella de Muestreo (Sample Bottle), analizando la actividad del radón en laboratorios del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y el laboratorio DOSIRAD en Francia.

Los resultados indicaron que las concentraciones de Rn-222 oscilaban entre 6.173 Bq/L y 10.112 Bq/L, con los valores más altos registrados en la provincia de Arequipa y Moquegua, y los más bajos en La Unión. Se observó que la geología y la tasa de ventilación del ambiente eran factores clave en la concentración de radón, ya que, en zonas con una ventilación menor, la acumulación de gas era significativamente mayor [23].

Covilhã, Portugal

Este estudio, realizado en el municipio de Covilhã (Portugal), tuvo como objetivo evaluar la concentración de radón en fuentes de agua subterránea destinadas al consumo humano. La zona de estudio se caracteriza por una geología dominada por rocas graníticas ricas en uranio, así como formaciones metamórficas como esquistos y grauvacas, lo que incrementa el potencial de liberación de radionucleidos naturales, especialmente ²²²Rn, hacia los acuíferos.

Se recolectaron 33 muestras de agua subterránea de pozos de distinta tipología y profundidad durante los meses de otoño e invierno de 2015. Las mediciones se realizaron utilizando el sistema RAD7 con el accesorio RAD H2O. Los resultados mostraron una amplia variabilidad en la concentración de radón, con valores entre 2 Bq/L y 1690 Bq/L.

Se identificaron varios factores que influyen en la concentración de radón en las aguas analizadas. En primer lugar, la litología de la zona juega un papel fundamental, observándose mayores concentraciones en áreas de terreno granítico en comparación con zonas metamórficas. En segundo lugar, el tipo y la profundidad de los acuíferos condicionan la acumulación del gas, siendo los más profundos y menos ventilados más propensos a contener altas concentraciones. Por último, también se reconoce la influencia del sistema de captación y distribución del agua, ya que el trayecto desde la fuente hasta el punto de consumo puede modificar los niveles de radón debido a fenómenos de desgasificación o ventilación parcial.

La dosis efectiva anual por ingestión se calculó para adultos y niños, considerando un consumo de 2 litros de agua al día. El valor medio estimado fue de 2.575 mSv/año para adultos y 5.151 mSv/año para niños, cifras muy por encima del límite recomendado por la OMS (0.1 mSv/año) y el valor guía de UNSCEAR (0.002 mSv/año). El estudio concluye que muchas de las fuentes analizadas no son seguras para el consumo directo y recomienda hervir el agua antes de su uso o aplicar medidas de mitigación para reducir la exposición al radón disuelto [24].

Estudio en diferentes zonas de EE. UU.

Este estudio se llevó a cabo en quince de los principales sistemas acuíferos de los Estados Unidos, abarcando una amplia variedad de regiones hidrogeológicas distribuidas por todo el país. Entre las áreas evaluadas se incluyen el Medio Oeste, donde se analizaron acuíferos sedimentarios como el Cambrian-Ordovician, caracterizados por formaciones carbonatadas, y el sureste del país, donde se encuentra el acuífero Floridano, una unidad hidrogeológica clave compuesta principalmente por calizas y dolomías. También se estudió la región del Atlántico costero, representada por el sistema del Atlántico costero superior, formado por sedimentos clásticos poco consolidados, así como el Valle Central de California, cuyos sistemas acuíferos están ligados a depósitos aluviales. Asimismo, se incluyeron acuíferos del suroeste y de las Grandes Llanuras, con una notable variedad de matrices geológicas que van desde rocas ígneas hasta formaciones evaporíticas.

La diversidad litológica y geoquímica de los acuíferos seleccionados permitió identificar los principales factores naturales que controlan la presencia de radio en el agua subterránea, tales como el tipo de mineral portador, la química del agua (incluyendo parámetros como el pH, el potencial redox, y la presencia de bario o sulfatos) y el régimen de flujo subterráneo.

Se señala como una de las conclusiones que interesan para el presente estudio que, en ambientes reductores, donde hay reducción de hierro o sulfato, el radio puede liberarse de fases minerales que anteriormente lo retenían. La litología de los acuíferos, en especial aquellos con formaciones ricas en uranio y torio, también desempeña un papel crucial en los niveles detectados de radiactividad natural [25].

2.2.3 Factores geológicos

La principal fuente de radón en el agua es la desintegración radiactiva del radio (^{226}Ra), que se encuentra en minerales con alto contenido de uranio y torio. Las rocas ígneas, especialmente los granitos, son conocidas por su alta capacidad de emitir radón debido a su elevado contenido de minerales uraníferos. Este gas se libera desde los minerales accesorios ricos en uranio, como el circón, la titanita (esfena) y, en menor medida, las micas (biotita y moscovita). Estas fases pueden contener concentraciones significativas de uranio (hasta varios miles de ppm en el caso del circón) y contribuyen de manera decisiva a la generación de radón.

La estructura mineralógica, la presencia de fracturas y la distribución del tamaño de poros son factores fundamentales. Como se observa en estudios previos en el CUD [26] el granito con mayor contenido de minerales accesorios y mayor fracturación (GS en su estudio) presenta concentraciones de radón significativamente superiores, tanto en estado intacto como tras procesos de degradación.

Estudios en España [8] han demostrado que, en zonas con sustratos altamente fracturados y ricos en uranio, la concentración de radón en las aguas subterráneas es significativamente mayor. En algunos estudios en Galicia [6], los valores de radón en aguas subterráneas han alcanzado hasta 2737 Bq/L en ciertos acuíferos, lo que representa un nivel peligrosamente alto para el consumo sin tratamiento.

Además, la presencia de minerales fosfatados también puede contribuir a la liberación de radón en el agua, ya que estos minerales pueden contener trazas de uranio que, al desintegrarse, liberan radón hacia las aguas subterráneas [26].

Por otra parte, las características físicas del terreno donde se encuentran los acuíferos tienen un papel clave en la acumulación y movilidad del radón. La porosidad del suelo determina la cantidad de agua que puede retenerse en un determinado volumen de roca, mientras que la permeabilidad regula la facilidad con la que el agua (y los gases disueltos en ella) pueden moverse a través de los poros y fracturas de la roca.

La porosidad accesible al mercurio y la distribución porosimétrica son parámetros que controlan la capacidad de una roca para permitir el transporte y liberación del radón. Las rocas con porosidad más elevada y fracturas interconectadas facilitan la migración del gas desde el interior de la matriz hacia el exterior, aumentando la probabilidad de que entre en contacto con el aire o se disuelva en el agua subterránea.

Otro factor para tener en cuenta son las fallas geológicas y fracturas en el subsuelo, que facilitan el transporte del radón desde las formaciones profundas hasta los acuíferos. En áreas con intensa actividad tectónica, las grietas y fracturas permiten la migración del radón, aumentando significativamente su presencia en el agua subterránea.

En este aspecto, estudios ya tratados llevados a cabo en Ecuador, en la región de Pichincha hallaron que las concentraciones de radón de las muestras tomadas en esta área eran superiores a otras, por tratarse de una zona de importante actividad volcánica. También otros estudios en Bosso, Nigeria han revelado que los acuíferos ubicados en zonas con alta actividad sísmica presentan concentraciones de radón hasta cinco veces mayores que los de regiones geológicamente estables.

Por otra parte, la meteorización química y física aumenta la porosidad superficial y puede contribuir a liberar radón confinado en la matriz mineral. En condiciones húmedas, la infiltración de agua facilita el transporte del radón disuelto, y en épocas secas puede aumentar la difusión gaseosa hacia el aire.

2.2.4 Factores hidrogeológicos

La profundidad del acuífero es un factor determinante en la concentración de radón. Los acuíferos más profundos suelen contener niveles más altos de radón debido a la menor ventilación y la mayor presión, que reduce la liberación del gas a la atmósfera. En cambio, los acuíferos más superficiales suelen perder el radón con mayor facilidad por difusión.

En estudios investigados se encontró que las aguas de pozos profundos contienen hasta diez veces más radón que las aguas superficiales, lo que confirma la importancia de la profundidad en la acumulación de este [6].

El tiempo de residencia en el que el agua permanece en contacto con las rocas del acuífero influye directamente en la cantidad de radón que puede acumularse en ella. Cuanto mayor sea el tiempo de residencia del agua en el acuífero, mayor será la cantidad de radón disuelto. Por ejemplo, en acuíferos confinados, donde el agua se mueve lentamente y permanece atrapada durante largos períodos, las concentraciones de radón suelen ser significativamente más altas que en acuíferos libres, donde la renovación del agua es más rápida.

El contacto entre aguas subterráneas y superficiales también afecta la concentración de radón. En zonas donde los acuíferos se mezclan con aguas superficiales (como ríos o lagos), el radón tiende a disiparse rápidamente, reduciendo su concentración en el agua potable. Este fenómeno es particularmente importante en regiones con alta recarga estacional, donde las lluvias intensas pueden diluir las concentraciones de radón en los acuíferos poco profundos.

2.2.5 Factores fisicoquímicos del agua

pH

El pH del agua, que indica su acidez o alcalinidad, juega un papel crucial en la movilidad de los radionúclidos y, por ende, en la concentración de radón disuelto. La solubilidad del radón en el agua no se ve directamente afectada por el pH, dado que es un gas noble y químicamente inerte. Sin embargo, el pH sí influye en la disolución y movilidad del uranio y el radio, los precursores del radón, lo que puede modificar su concentración en los cuerpos de agua subterráneos y de superficie [27].

En aguas con pH ácido (inferior a 6), la solubilidad de ciertos minerales que contienen uranio y radio aumenta, lo que puede favorecer su liberación al agua y, en consecuencia, una mayor producción de radón. Se ha observado que, en sistemas hidrogeológicos con aguas ácidas, la concentración de radón tiende a ser más alta, dado que el uranio se mantiene en formas más solubles y móviles. Además, la acidez puede favorecer procesos de lixiviación de uranio desde las formaciones geológicas circundantes, lo que a su vez incrementa la presencia de radón disuelto [28].

Por el contrario, en aguas alcalinas (pH superior a 7), el uranio y el radio tienden a precipitar en forma de carbonatos o hidróxidos, lo que reduce su disponibilidad en la fase acuosa y limita la producción de radón. En estudios realizados en manantiales y acuíferos, se ha encontrado que los niveles de radón disminuyen en aguas con pH más alto, lo que sugiere que la alcalinidad juega un papel en la retención de estos elementos en los sedimentos [13].

El efecto del pH en la concentración de radón también está influenciado por la interacción con otros parámetros químicos del agua, como la presencia de bicarbonatos y fosfatos, que serán tratados independientemente. Estos compuestos pueden formar complejos solubles con el uranio, aumentando su movilidad en el agua. En sistemas donde hay un equilibrio entre estos compuestos, la variación del pH puede cambiar la dinámica de solubilidad y precipitación, afectando indirectamente la producción de radón [27] [28].

Otro aspecto importante es la relación entre el pH y la oxidación-reducción. En ambientes más reductores, el uranio se encuentra en su forma U^{4+} , que es poco soluble, mientras que en condiciones oxidantes (pH más alto), el uranio se presenta como U^{6+} , que es más soluble y puede aumentar la producción de radón si no hay mecanismos de precipitación que lo retengan [27].

Sulfatos

Los sulfatos (SO_4^{2-}) desempeñan un papel crucial en la movilidad del uranio y el radio en los sistemas acuáticos, lo que indirectamente influye en la concentración de radón disuelto en el agua. La presencia de altas concentraciones de sulfatos puede tanto aumentar como disminuir la disponibilidad de los precursores del radón, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del medio.

Uno de los principales efectos de los sulfatos es su capacidad para favorecer la movilidad del radio (^{226}Ra) en aguas subterráneas. Se ha observado que la solubilidad del radio aumenta en presencia de sulfatos debido a la formación de complejos solubles de $RaSO_4$, lo que incrementa su disponibilidad en la fase acuosa. Dado que el radón es un producto de desintegración del radio, una mayor movilidad de este último puede resultar en mayores concentraciones de radón en el [1].

Sin embargo, en condiciones donde la saturación de sulfatos es elevada, puede ocurrir el fenómeno contrario. El radio puede precipitar en forma de sulfato de radio ($RaSO_4$), un compuesto poco soluble, lo que reduce su movilidad y, por ende, la producción de radón. Este comportamiento ha sido documentado en estudios de acuíferos donde las concentraciones de radón disminuyen en presencia de altos niveles de sulfatos, particularmente en sistemas con aguas [27].

El impacto de los sulfatos en la concentración de radón también depende de la interacción con otros iones en el agua. La presencia de calcio (Ca^{2+}) y bario (Ba^{2+}) puede favorecer la precipitación de sulfatos,

lo que influye en la dinámica del radio y, por ende, en la producción de radón. En aguas con altos niveles de calcio y sulfatos, la formación de sulfato de calcio (CaSO_4) puede reducir la disponibilidad del radio y disminuir la concentración de radón disuelto. Por otro lado, en aguas con baja concentración de calcio, los sulfatos pueden mantener el radio en solución, facilitando la generación de radón [28].

Fosfatos

Los fosfatos en el agua pueden influir en la movilidad del uranio y, por consiguiente, en la concentración de radón disuelto. Los fosfatos tienen una alta afinidad por el uranio y pueden formar complejos solubles con este elemento, lo que influye directamente en su disponibilidad en el medio acuático. Dependiendo de la concentración de fosfatos y las condiciones químicas del agua, su presencia puede aumentar o reducir la cantidad de uranio en solución, afectando así la cantidad de radón que puede generarse.

Cuando los fosfatos están presentes en concentraciones elevadas, pueden favorecer la precipitación del uranio en forma de fosfato de uranio ($\text{UO}_2(\text{PO}_4)_2$), un compuesto insoluble. Esto reduce la cantidad de uranio disuelto en el agua, lo que a su vez puede limitar la producción de radón, ya que este gas se origina en la cadena de desintegración del uranio-238[29].

Sin embargo, en ciertos casos, los fosfatos pueden aumentar la movilidad del uranio al formar complejos solubles con U^{6+} , lo que facilita su transporte en los acuíferos y puede incrementar la cantidad de radón disponible [30].

El impacto de los fosfatos en la concentración de radón también puede estar condicionado por otros factores fisicoquímicos del agua. Por ejemplo, el pH y el potencial de óxido-reducción pueden determinar si los fosfatos actuarán como agentes de inmovilización o si, por el contrario, favorecerán la solubilización del uranio. En aguas con pH neutro a alcalino, los fosfatos tienden a formar precipitados insolubles con el uranio, reduciendo la generación de radón. En cambio, en medios ácidos, ciertos complejos fosfato-uranio pueden mantenerse en solución, permitiendo que el uranio permanezca disponible para su posterior descomposición radiactiva y liberación de radón [31].

Otro factor relevante es la interacción entre fosfatos y otras especies químicas presentes en el agua. La presencia de iones como calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) puede influir en la estabilidad de los compuestos de fosfato de uranio, ya que estos cationes pueden competir con el uranio por la formación de complejos con los fosfatos. Asimismo, en aguas ricas en sulfatos (SO_4^{2-}), la formación de precipitados de uranio-sulfato puede reducir aún más la solubilidad del uranio, afectando indirectamente la producción de radón [31].

Las rocas fosfáticas pueden contener concentraciones de uranio. Cuando estas rocas entran en contacto con aguas subterráneas, si las condiciones geoquímicas favorecen la disolución de los minerales de fosfato, el uranio puede liberarse al agua y por tanto, afectar a la liberación de radón al [26].

Compuestos orgánicos

La presencia de compuestos orgánicos en el agua puede formar complejos solubles con el uranio, facilitando su movilidad y aumentando la producción de radón. Además, la descomposición de materia orgánica puede liberar dióxido de carbono (CO_2), que acidifica el agua y afecta la solubilidad de minerales radiactivos.

Fuerza iónica

La fuerza iónica del agua, que depende de la concentración total de iones disueltos, puede influir en la actividad química de los iones presentes. Una alta fuerza iónica puede aumentar la solubilidad de ciertos minerales que contienen uranio, afectando la concentración de radón en el agua [28].

Temperatura

La temperatura es un factor crítico en la concentración de radón en agua, ya que afecta directamente su solubilidad y la tasa de escape de este gas al ambiente. De acuerdo con la ley de Henry, la solubilidad de un gas en un líquido es inversamente proporcional a la temperatura. Esto significa que, a menores temperaturas, la solubilidad del radón en el agua aumenta, lo que se traduce en mayores concentraciones disueltas. En contraste, cuando la temperatura del agua se incrementa, la solubilidad del radón disminuye, favoreciendo su desorción y liberación hacia la atmósfera. [28]

El impacto de la temperatura en la solubilidad del radón puede modelarse utilizando el coeficiente de Ostwald, que describe la relación entre la concentración de radón en el agua y en el aire en condiciones de equilibrio. Este coeficiente decrece con el aumento de la temperatura del agua, lo que significa que una mayor temperatura reduce la retención de radón en el medio acuático y facilita su transferencia al aire. Se ha determinado experimentalmente que el coeficiente de Ostwald para el radón sigue la ecuación:

$$K_{Ostwald} = 0,425e^{-0,05T} + 0,1$$

Donde T es la temperatura en grados Celsius.

Como se observa en los estudios experimentales, a 0°C el coeficiente es significativamente mayor, indicando una alta solubilidad del radón en el agua fría. Sin embargo, a temperaturas superiores a 40°C, la solubilidad se reduce drásticamente. [28]

Los efectos de la temperatura en la concentración de radón en el agua han sido estudiados en distintos entornos acuáticos. En acuíferos y aguas subterráneas, donde la temperatura tiende a ser más baja y estable, las concentraciones de radón pueden alcanzar niveles elevados, a menudo superando los 50 Bq/l en aguas confinadas y hasta 50000 Bq/l en sistemas de rocas cristalinas. Por el contrario, en aguas superficiales, ríos y lagos, donde la temperatura fluctúa considerablemente y el agua está en contacto con la atmósfera, las concentraciones de radón son más bajas debido a una mayor tasa de escape.

En el caso de aguas termales y sistemas geotérmicos, la alta temperatura del agua reduce la capacidad del medio acuático para retener radón, lo que genera concentraciones relativamente bajas en solución y un mayor flujo de radón hacia el aire. Este efecto ha sido documentado en estudios de balnearios termales, donde se observa una disminución significativa de la concentración de radón disuelto a medida que la temperatura del agua aumenta [27].

Además del impacto en la solubilidad, la temperatura puede influir en la dinámica del transporte del radón dentro de los acuíferos. Un aumento en la temperatura del agua subterránea puede alterar la presión y la densidad del fluido, modificando la tasa de difusión del gas a través de las rocas y sedimentos. Asimismo, en entornos donde el agua caliente se mezcla con aguas más frías, se pueden producir variaciones abruptas en la concentración de radón, lo que ha sido observado en estudios de aguas de infiltración donde la temperatura del agua se correlaciona con cambios en la conductividad y la concentración de radón .

Gases disueltos

La coexistencia de otros gases disueltos, como el metano (CH_4) o el dióxido de carbono (CO_2), puede influir en la solubilidad y movilidad del radón en el agua. Estos gases pueden alterar la presión parcial y la dinámica de disolución del radón, afectando su concentración.

Óxido-reducción

Las condiciones de óxido-reducción del agua determinan la especiación química del uranio y otros radionúclidos. En ambientes reductores, el uranio puede estar en formas más solubles, aumentando la disponibilidad de radón. Por el contrario, en condiciones oxidantes, el uranio puede precipitar, reduciendo la producción de radón.

2.2.6 *Recapitulación y discusión de los principales factores*

La presencia de radón en el agua está condicionada por un conjunto complejo de factores geológicos, hidrogeológicos y fisicoquímicos que interactúan entre sí y determinan su concentración final.

Desde el punto de vista geológico, la litología del sustrato es el principal determinante. Rocas ígneas como los granitos y granodioritas biotíticos presentan un elevado contenido en uranio y radio, elementos precursores del radón. La estructura mineralógica, la presencia de minerales accesorios (circón, titanita) y el grado de fracturación influyen decisivamente en la capacidad de liberar radón al agua. Zonas con actividad tectónica intensa o con procesos de meteorización avanzada presentan una mayor conectividad entre las fracturas y una mayor permeabilidad secundaria, facilitando la migración del gas desde la roca matriz hacia los acuíferos.

Los factores hidrogeológicos también son clave. La profundidad del acuífero determina el grado de acumulación de radón: los acuíferos profundos, debido a su escasa ventilación y tiempos de residencia prolongados, tienden a concentrar mayores cantidades de radón disuelto. Asimismo, el tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado) condiciona la renovación del agua y la posibilidad de liberación del gas. Los acuíferos fisurados, típicos de zonas graníticas y metamórficas, se caracterizan por una elevada heterogeneidad y permiten un transporte preferencial del radón. La interacción entre aguas subterráneas y superficiales, especialmente en zonas de recarga rápida, puede reducir la concentración de radón por dilución y ventilación.

En cuanto a los factores fisicoquímicos, variables como el pH, la temperatura, la fuerza iónica, la presencia de sulfatos, fosfatos y compuestos orgánicos juegan un papel fundamental. El pH ácido favorece la solubilidad y movilidad de los precursores del radón, mientras que condiciones alcalinas tienden a precipitar uranio y radio, disminuyendo la generación de radón. La temperatura influye en la solubilidad: aguas frías retienen más radón, mientras que en aguas calientes el gas tiende a liberarse hacia la atmósfera. Los sulfatos pueden movilizar o inmovilizar el radio dependiendo de la composición iónica, y los fosfatos pueden actuar como agentes de precipitación del uranio, reduciendo la producción de radón en condiciones específicas.

Estudios en distintas regiones del mundo, como Galicia, Transilvania, Hungría o la India, muestran que el radón en el agua refleja fielmente la interacción entre estos factores. En Galicia, por ejemplo, los acuíferos graníticos presentan concentraciones significativamente superiores a los 100 Bq/l, normalmente por debajo de los 500 Bq/l, mientras que en zonas volcánicas de Hungría y en los acuíferos profundos de Rumanía se observan valores elevados vinculados a formaciones uraníferas y procesos tectónicos.

Podremos concluir de este apartado que la concentración de radón en el agua resulta de la combinación de la litología del sustrato, la dinámica hidrogeológica y las condiciones fisicoquímicas del

medio, sugiriendo que el resultado final será variable dependiendo de cómo interactúen entre sí todas estas condiciones. Es decir, que por ejemplo en zonas ricas en uranio, si las condiciones litológicas oportunas para que se filtre no se dan, podríamos llegar a tener menores concentraciones de radón que en otras zonas menos uraníferas.

2.3 Métodos de medida de radón en agua

2.3.1 Métodos activos

Los métodos activos para el análisis de radón en agua son aquellos que requieren energía, instrumentación electrónica y procesamiento inmediato para detectar y cuantificar la concentración de radón en una muestra de agua. A diferencia de los métodos pasivos, que dependen de la acumulación del radón en un material detector a lo largo del tiempo, los métodos activos permiten una medición instantánea o en tiempo real. Dentro de los métodos activos, distinguimos entre dos grupos fundamentales: monitoreo continuo de radón en agua y análisis puntual de radón en agua.

Cámaras de ionización

Las cámaras de ionización son dispositivos diseñados para la detección y cuantificación de la radiación ionizante, especialmente útiles en la medición de radón en aire y agua. Su funcionamiento se basa en la ionización del gas contenido en la cámara cuando es impactado por partículas alfa emitidas por el radón y sus productos de desintegración.

Para la medición del radón en agua, el gas radón disuelto se extrae mediante un proceso de desgasificación o burbujeo, trasladándolo a la cámara de ionización donde interactúa con el gas de detección.

La ionización generada produce pares de iones (electrones e iones positivos) que son separados por un campo eléctrico aplicado dentro de la cámara, lo que genera una corriente de ionización proporcional a la concentración de radón presente en la muestra. Esta corriente es detectada y amplificada, permitiendo determinar con precisión la concentración de radón en el agua. En cuanto a ventajas, destacan por su alta sensibilidad, rapidez en la obtención de resultados y capacidad de medición en un amplio rango de concentraciones. Son utilizados en estudios hidrogeológicos, monitoreo ambiental y control de calidad del agua potable, especialmente en áreas con alta actividad radiactiva natural, como zonas con formaciones graníticas o regiones con actividad sísmica.

Partículas alfa

La espectrometría alfa es una técnica de detección utilizada para identificar y cuantificar radionucleidos emisores de partículas alfa, como el radón-222 (Rn-222) y sus productos de desintegración (polonio-218 y polonio-214). Se basa en la medición de la energía específica de las partículas alfa emitidas durante la desintegración radiactiva, lo que permite no solo determinar la presencia de radón en una muestra, sino también diferenciar entre los distintos isótopos radiactivos involucrados.

Este método es ampliamente utilizado debido a su alta precisión y selectividad, ya que cada radionucleido emite partículas alfa con energías características. Esto permite que, al analizar una muestra, se pueda obtener un espectro energético que revela exactamente qué elementos radiactivos están presentes y en qué cantidad. A diferencia de otros métodos como la espectrometría gamma, que detecta fotones gamma sin distinguir su origen de manera precisa, la espectrometría alfa proporciona una identificación mucho más específica de los isótopos en la muestra.

El funcionamiento de la espectrometría alfa se divide en varias etapas. En primer lugar, si el radón está presente en una muestra de agua, este debe ser extraído a la fase gaseosa mediante burbujeo o degasificación. Después, el gas se transfiere a una cámara de detección, donde se desintegra y emite partículas alfa. Estas partículas impactan en un detector de estado sólido, como los utilizados en dispositivos como el RAD7 (Figura 2-1), generando una señal eléctrica proporcional a la energía de la partícula alfa emitida. A continuación, la señal es procesada por un analizador multicanal, que clasifica las partículas alfa según su energía, generando un espectro que permite la identificación de los radionucleidos presentes. Finalmente, se cuantifica la concentración de radón en la muestra a partir del número de partículas alfa registradas en el detector.



Figura 2-1 RAD-7

Partículas gamma

La medición de radón en agua mediante espectrometría gamma se basa en la detección de los fotones gamma emitidos por los productos de desintegración del radón-222 ($Rn-222$). Cuando el radón decae, genera isótopos como plomo-214 ($Pb-214$) y bismuto-214 ($Bi-214$), que emiten radiación gamma con energías características. Este método es ampliamente utilizado debido a que no requiere la extracción del radón del agua, lo que minimiza el riesgo de pérdida de gas y permite mediciones directas y precisas.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizan detectores de germanio de alta pureza ($HpGe$) y de yoduro de sodio activado con talio ($NaI(Tl)$), capaces de registrar las energías específicas de los fotones gamma emitidos por los productos de desintegración del radón. Las muestras de agua se almacenan en recipientes sellados y se dejan en reposo durante un tiempo determinado para permitir que se alcance el equilibrio secular entre el radón y sus descendientes. Posteriormente, la muestra se introduce en el detector, donde se mide la radiación gamma y se genera un espectro con picos característicos que permiten identificar y cuantificar la concentración de radón en el agua.

El método de espectrometría gamma presenta varias ventajas, entre ellas su alta precisión, la posibilidad de analizar grandes volúmenes de agua y la eliminación de la necesidad de degasificación. Sin embargo, también tiene ciertas limitaciones, como la espera necesaria para alcanzar el equilibrio secular y el alto costo de los detectores $HpGe$, que requieren enfriamiento criogénico para operar con la máxima resolución.

Centelleo líquido (LSC)

El centelleo líquido es una técnica de detección y cuantificación de radiación basada en la emisión de fotones de luz cuando una partícula radiactiva interactúa con un líquido centellador. Se utiliza principalmente en la detección de partículas alfa, beta y gamma, siendo una de las metodologías más sensibles y precisas para el análisis de radionucleidos en muestras líquidas, incluyendo el radón en agua.

El proceso de centelleo líquido comienza con la incorporación de una muestra radiactiva en un cóctel centellador, compuesto por un solvente orgánico y compuestos fluorescentes llamados fluoruros. Cuando las partículas radiactivas emitidas por los radionucleidos de la muestra interactúan con el cóctel, transfieren su energía a las moléculas fluorescentes, provocando la emisión de fotones de luz en la región del espectro ultravioleta-visible. Estos destellos de luz son captados por fotomultiplicadores, que amplifican la señal y la convierten en impulsos eléctricos que pueden ser analizados cuantitativamente. La cantidad de luz emitida y su energía permiten identificar el tipo y la cantidad de radiación presente en la muestra.

Entre sus ventajas, el centelleo líquido permite la detección de baja actividad, una alta eficiencia de conteo y la capacidad de diferenciar entre distintos tipos de radiación. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, como la necesidad de utilizar solventes químicos potencialmente tóxicos, la degradación del cóctel centellador con el tiempo y la posibilidad de interferencias químicas en la muestra. Además, los equipos de conteo de centelleo líquido requieren calibración y un control riguroso de calidad para garantizar la precisión de los resultados.

Célula Lucas

Las células de Lucas son dispositivos de centelleo diseñados para la medición de la concentración de radón en el aire y en sistemas cerrados, como muestras de agua o gases en ambientes controlados. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de la radiación alfa emitida por el radón y sus productos de desintegración, proporcionando una forma eficiente de cuantificar su presencia en diversas matrices ambientales.

Una célula de Lucas consiste en un cilindro de plexiglás revestido en su interior con una capa de sulfuro de zinc activado con plata (ZnS(Ag)). Este material es un centellador eficiente para partículas alfa, lo que significa que emite pulsos de luz cuando es impactado por la radiación emitida durante la desintegración del radón y sus descendientes radiactivos. Para realizar una medición, se toma una muestra de aire que contiene radón y se introduce en la célula a través de una válvula situada en la parte superior del cilindro. Es recomendable llenar la célula de forma gradual, abriendo y cerrando la válvula repetidamente para minimizar la pérdida de radón y asegurar una distribución homogénea en su interior.

Tras permitir que el radón alcance el equilibrio con sus descendientes de vida corta, como el polonio-218 (^{218}Po), el plomo-214 (^{214}Pb) y el bismuto-214 (^{214}Bi), la célula de Lucas se coloca sobre un tubo fotomultiplicador en un sistema de medición hermético. La radiación alfa emitida por estos isótopos impacta el recubrimiento de ZnS(Ag), generando destellos de luz que son amplificados por el fotomultiplicador y registrados por un contador alfa. La cantidad de pulsos detectados se correlaciona con la concentración de radón en la muestra original, permitiendo así la cuantificación de su actividad.

Las células de Lucas presentan diversas ventajas, como su alta sensibilidad a la radiación alfa, lo que permite la detección de concentraciones bajas de radón. Además, al ser un método pasivo, no requieren alimentación eléctrica durante el proceso de muestreo, lo que las hace ideales para estudios de campo en ubicaciones remotas. Sin embargo, presentan algunas limitaciones, como la necesidad de un equipo de laboratorio para el análisis y la dependencia del tiempo de equilibrio radiactivo para obtener mediciones precisas.

En términos de aplicación, las células de Lucas se utilizan en monitoreo ambiental, mediciones en minas y cuevas, análisis de radón en agua mediante la transferencia de fase gas-líquido, y en estudios epidemiológicos sobre la exposición al radón en interiores. Su uso combinado con otros métodos, como

la espectrometría alfa o la detección por centelleo líquido, permite obtener mediciones precisas y complementar estudios de radón en diversos entornos.

Membrana de silicona

El método de membrana de silicona es una técnica utilizada para la medición del radón en agua, basada en la capacidad selectiva de la membrana de silicona para permitir el paso del gas radón mientras bloquea otros componentes del líquido. Este método es ampliamente empleado en estudios hidrogeológicos, monitoreo ambiental y análisis de calidad del agua potable, debido a su capacidad para realizar mediciones continuas y no invasivas sin alterar significativamente la composición de la muestra.

El principio de funcionamiento del método se basa en la difusión del radón a través de una membrana de silicona. Cuando una muestra de agua con radón en disolución entra en contacto con la membrana, el gas radón atraviesa la barrera de silicona debido a su alta permeabilidad en comparación con otros gases presentes en el agua. Una vez que el radón ha atravesado la membrana, se acumula en un volumen de aire controlado, donde puede ser detectado y cuantificado utilizando un detector de radón en aire, como el Radon Scout o el RTM 2100.

Uno de los principales beneficios de este método es que no requiere la manipulación directa del agua, lo que minimiza las pérdidas de radón por volatilización y permite mediciones más representativas de la concentración real en la muestra. Además, permite la medición en continuo, ya que el radón se difunde constantemente a través de la membrana, proporcionando datos en tiempo real sobre la variación de la concentración de radón en el agua. Esta característica es particularmente útil en estudios de acuíferos y fuentes subterráneas, donde los niveles de radón pueden fluctuar con el tiempo debido a cambios en las condiciones geológicas o hidrodinámicas.

Otra ventaja importante del método de membrana de silicona es su capacidad para evitar la interferencia de otros compuestos presentes en el agua, como partículas en suspensión, sólidos disueltos o sustancias químicas que podrían afectar la medición en otros métodos. Sin embargo, el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio entre la concentración de radón en el agua y en el aire de medición puede variar dependiendo del espesor y la permeabilidad de la membrana, así como de la temperatura del agua, lo que puede influir en la sensibilidad y la precisión del análisis.

2.3.2 Métodos pasivos

Detectores de trazas nucleares en estado sólido (SSNTD)

Los detectores de trazas nucleares en estado sólido (SSNTD, Solid State Nuclear Track Detectors) se basan en la capacidad de ciertos materiales poliméricos para registrar el paso de partículas alfa emitidas durante la desintegración del radón-222 (^{222}Rn) y sus productos de decaimiento. Al impactar sobre la superficie del detector, estas partículas generan daños estructurales microscópicos en la red del material, formando lo que se conoce como "trazas latentes". Dichas trazas pueden ser reveladas mediante un ataque químico con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) o ácido acético, lo que permite su observación y cuantificación bajo un microscopio óptico.

El procedimiento de medición con SSNTD en agua generalmente implica el uso de una técnica de equilibrio de fase gas-líquido. Para ello, una muestra de agua se introduce en un recipiente hermético junto con un detector, como el polímero CR-39 o LR-115. Durante un periodo de exposición, el radón disuelto en el agua se difunde en el espacio de aire dentro del recipiente hasta alcanzar un equilibrio. A medida que el radón se desintegra, sus productos emiten partículas alfa que impactan el detector, dejando huellas visibles tras el revelado químico.

Entre las principales ventajas de los SSNTD destaca su capacidad para realizar mediciones a largo plazo, minimizando las fluctuaciones temporales en la concentración de radón. Además, estos detectores son altamente sensibles a la radiación alfa y no requieren alimentación eléctrica ni sistemas electrónicos

complejos, lo que los convierte en una alternativa económica y eficiente para estudios ambientales. Sin embargo, presentan ciertas limitaciones, como la necesidad de un procesamiento en laboratorio para el análisis de las trazas y la falta de información en tiempo real sobre la concentración de radón.

En términos de aplicaciones, los SSNTD se emplean en la vigilancia ambiental del radón en aguas subterráneas, pozos y fuentes termales, así como en estudios epidemiológicos. También son utilizados en investigaciones geológicas para evaluar la dinámica del gas en diferentes tipos de acuíferos y su posible impacto en la calidad del agua potable [32].

Botella de muestreo

El método de la botella de muestreo (Sampling Bottle) es una de las técnicas pasivas utilizadas para la medición de radón en agua. Su principio se basa en el equilibrio de fase gas-líquido, permitiendo la transferencia del radón disuelto en el agua hacia un volumen de aire dentro de un recipiente hermético. Este método es utilizado en estudios ambientales y en la monitorización de radón en fuentes de agua subterráneas, pozos y aguas termales.

El procedimiento comienza con la recolección de una muestra de agua en un frasco sellado, que contiene en su interior un detector pasivo, como una película de trazas nucleares (CR-39 o LR-115) o un cartucho de carbón activado. A medida que el radón-222 (^{222}Rn) presente en el agua se desintegra, emite partículas alfa que quedan registradas en el detector sólido o son adsorbidas en el material poroso del carbón activado. Con el tiempo, el sistema alcanza un estado de equilibrio entre la concentración de radón en el agua y en el aire del frasco, permitiendo su cuantificación posterior mediante técnicas de espectrometría alfa o revelado químico de las trazas nucleares.

Este método presenta varias ventajas. La primera de ellas es que permite la medición de radón en diferentes tipos de muestras de agua sin necesidad de equipos electrónicos complejos en el punto de muestreo, facilitando su aplicación en estudios de campo. Además, minimiza las pérdidas de radón que pueden ocurrir en métodos de muestreo abiertos, ya que el frasco se sella inmediatamente después de la recolección. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es que requiere un análisis posterior en laboratorio, lo que puede retrasar la obtención de los resultados en comparación con técnicas activas en tiempo real.

El método de la botella de muestreo se emplea en una variedad de aplicaciones científicas y ambientales. Es utilizado en evaluaciones de la calidad del agua potable, estudios geológicos sobre radón en acuíferos y análisis de exposición radiológica en aguas termales. También es una herramienta valiosa en la investigación de la movilidad del radón en el agua subterránea y su impacto en la radiactividad ambiental [32].

Método de carbón activado

El método de carbón activado es una técnica pasiva utilizada para la detección y cuantificación de radón en agua, basada en la adsorción de este gas en un material altamente poroso. Su principio de funcionamiento se basa en la capacidad del carbón activado para retener el radón disuelto en el agua, permitiendo su posterior análisis mediante espectrometría gamma. Dado que el radón-222 (^{222}Rn) es un gas noble que se genera por la desintegración del radio-226 (^{226}Ra) en la cadena de decaimiento del uranio-238, su presencia en el agua subterránea puede ser un indicador de procesos geológicos y una fuente potencial de exposición radiológica. Este método se ha convertido en una herramienta esencial en estudios ambientales y en la evaluación de la calidad del agua potable, ya que permite medir la concentración de radón sin necesidad de equipos sofisticados en el lugar de muestreo.

El procedimiento del método de carbón activado comienza con la preparación del material adsorbente, asegurando que esté seco y libre de contaminantes. Posteriormente, el carbón activado se expone a la muestra de agua en un sistema cerrado, permitiendo que el radón presente en el líquido se transfiera a la fase gaseosa y sea retenido en los poros del carbón. Esta fase de adsorción puede durar

desde unas pocas horas hasta varios días, dependiendo de la concentración esperada de radón y las condiciones ambientales. Una vez finalizado el periodo de exposición, el cartucho de carbón activado se sella herméticamente y se transporta al laboratorio para su análisis. En este punto, la muestra es examinada mediante espectrometría gamma, donde se detecta la actividad de los productos de desintegración del radón, principalmente plomo-214 (^{214}Pb) y bismuto-214 (^{214}Bi), los cuales emiten radiación gamma que permite inferir la concentración inicial de radón en el agua analizada.

Una de las principales ventajas del método de carbón activado es su sencillez y bajo costo, lo que facilita su aplicación en estudios a gran escala sin requerir equipos electrónicos en el campo. Además, permite la integración de la concentración de radón a lo largo del tiempo, minimizando las fluctuaciones momentáneas que pueden afectar otras técnicas de medición. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, como la necesidad de realizar el análisis en laboratorio, lo que implica un tiempo de espera para la obtención de resultados. Asimismo, factores ambientales como la temperatura y la humedad pueden influir en la eficiencia de adsorción del radón en el carbón, introduciendo posibles variaciones en la medición si no se controlan adecuadamente. Otra desventaja es que no proporciona información en tiempo real, a diferencia de los métodos activos que permiten la detección inmediata del radón en la muestra.

El uso del método de carbón activado se ha extendido a diversas aplicaciones científicas y ambientales. En el ámbito de la calidad del agua potable, se emplea para determinar si las concentraciones de radón en el agua de consumo humano cumplen con los límites establecidos por organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). En estudios hidrogeológicos, permite evaluar la presencia de radón en aguas subterráneas y establecer correlaciones con la geología local, ayudando a identificar áreas con alto contenido de uranio en el subsuelo. También se ha utilizado en la caracterización de fuentes termales y sistemas de aguas subterráneas, proporcionando información valiosa sobre la dinámica del radón en diferentes tipos de acuíferos y su movilidad a través de fisuras y fracturas geológicas.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este punto se expondrá el proceso experimental que se ha llevado a cabo durante la realización del trabajo, tratando de explicar de manera detallada los pasos seguidos, la metodología empleada, el uso del RTM 1688-2 y más instrumentos que se han utilizado para la medición de los parámetros que han sido objeto de estudio, tal y como se recoge en el siguiente esquema (Figura 3-1).

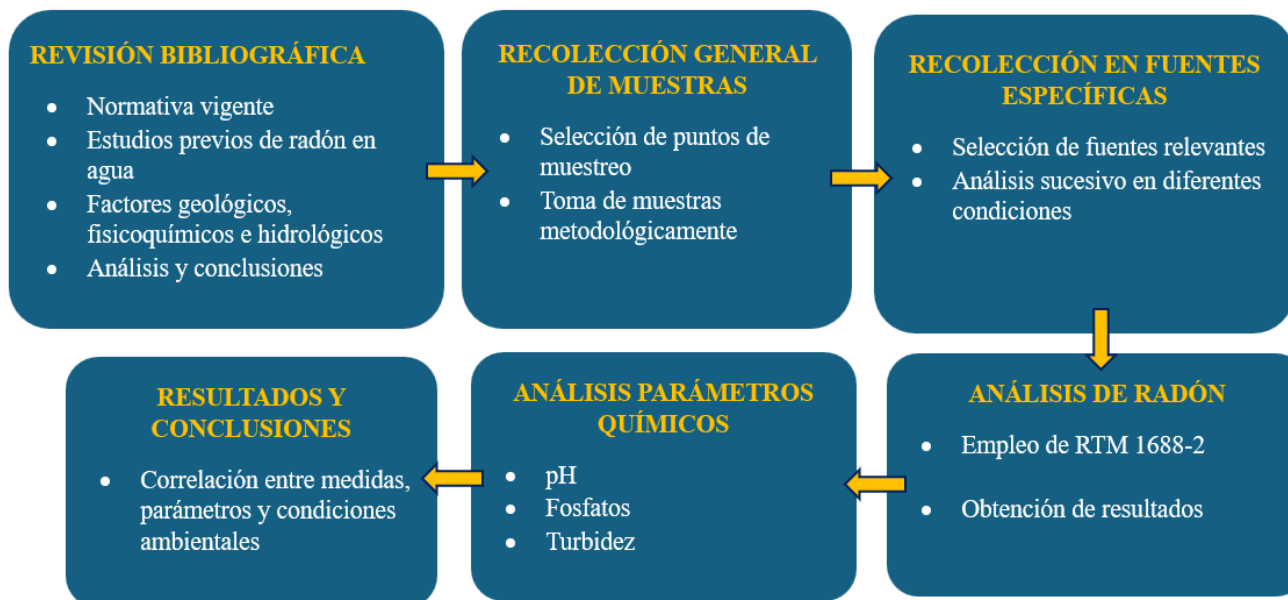


Figura 3-1 Esquema general del TFG (Elaboración propia)

La primera etapa se centra en la revisión bibliográfica exhaustiva, cuyo objetivo es sentar las bases conceptuales y normativas del estudio. En esta fase se analiza la normativa vigente, se revisan estudios previos sobre la presencia de radón en agua y se profundiza en los factores geológicos, fisicoquímicos e hidrológicos que pueden influir en la concentración de radón. Esta revisión permite identificar las lagunas de conocimiento y definir el contexto científico y técnico en el que se enmarca el trabajo. Finalmente, se extraen conclusiones preliminares que pueden orientar a la hora de comenzar la fase experimental.

La segunda etapa implica la recolección general de muestras. Se seleccionan de forma estratégica los puntos de muestreo, considerando criterios de accesibilidad y de análisis previo en otros estudios. La toma de muestras se realiza siguiendo procedimientos metodológicos explicados posteriormente para asegurar la representatividad y la fiabilidad de los resultados.

Una vez finalizada la fase general, se realiza la recolección en fuentes específicas, donde se seleccionan aquellas fuentes de agua que se consideran especialmente relevantes por sus características geológicas o por presentar concentraciones preliminares elevadas de radón. En esta etapa se lleva a cabo un análisis sucesivo en diferentes condiciones (variaciones meteorológicas o diferentes caudales), lo que permite estudiar la dinámica temporal del radón y su relación con factores ambientales.

Tras la recogida individual de cada muestra, se realiza el análisis de radón en las muestras obtenidas. Para ello, se emplea el equipo RTM 1688-2, un monitor específico para la detección y cuantificación de radón en agua. Este instrumento permite obtener resultados precisos y fiables, fundamentales para evaluar la calidad del agua y estimar el potencial riesgo radiológico asociado. Los datos obtenidos se registran de forma sistemática para su posterior análisis comparativo.

En paralelo, se efectúa un análisis de parámetros químicos en las muestras de agua. Entre los parámetros analizados se incluyen el pH, la concentración de fosfatos y la turbidez, para ver si pueden

influir en la movilidad y el comportamiento del radón en el agua. La caracterización fisicoquímica permite interpretar mejor los resultados del radón y comprender las interacciones que se producen en el medio subterráneo.

Finalmente, se integran y analizan todos los resultados obtenidos. Se estudian las posibles correlaciones entre la concentración de radón, los parámetros químicos medidos y las condiciones ambientales registradas. A partir de este análisis, se elaboran las conclusiones alcanzadas en base a los datos recogidos y a la bibliografía consultada.

3.1 Identificación y localización de mananciales

La obtención de muestras de agua se llevó a cabo siguiendo un protocolo diseñado para garantizar la representatividad, fiabilidad y trazabilidad de los resultados obtenidos. La primera campaña de muestreo tuvo lugar el 15 de febrero de 2025, marcando el inicio de la fase de trabajo de campo. En total, se seleccionaron 28 fuentes distribuidas en los municipios de Marín y Moaña (Figura 3-2), utilizando como referencia los mapas oficiales de localización de fuentes disponibles para ambos municipios, lo que permitió una adecuada cobertura geográfica del área de estudio



Figura 3-2 Mapa de fuentes analizadas (Elaboración propia)

Para localizar las fuentes, se hizo uso del Mapa de Fuentes de Marín (Figura 3-3), publicado por el Ayuntamiento [34]. Supuso de gran ayuda para tener la localización de las fuentes a mano y de manera sencilla, permitiendo importar el mapa a la aplicación Google Maps para dispositivos móviles.



Figura 3-3 Mapa de fuentes de Marín [34]

Todas las muestras tomadas fueron numeradas, para facilitar la trazabilidad de estas, según la numeración mostrada en la siguiente tabla:

Nº	Nombre	Nº	Nombre
1	FONTE ZAPAL	15	FONTE DAS PATAS
2	FONTE DA MOREIRA	16	FONTE DA QUEIXEIRA
3	FINCA DE BRIZ	17	FONTE FONTÁN
4	FONTE DA COSTA	18	FONTE CORAIDOS
5	FONTE DO CASAL	19	FONTE DE VISTA ALEGRE
6	FONTE DO CADRO/EIDÓN	20	FONTE MACENLLE
7	FONTE DE CRUXEIRAS	21	FONTE PARDACUÑA
8	FONTE DE MOGOR	22	FONTE ROZAS
9	FUENTE NEIBÓ (MARÍN)	23	FONTE ARRABALDE
10	FONTE DA PORTA DO SOL	24	FONTE IGREXAIRO
11	FONTE DO XASTRE	25	FONTE DA GRELA
12	FONTE DO FRANCO	26	FONTE PONTIÑA
13	MOAÑA CENTRO	27	FONTE OUTEIRO
14	FONTE DA MO	28	FONTE DA PRESA

Tabla 3-1 Numeración de Fuentes (Elaboración propia)

El proceso de selección inicial de estas fuentes respondió a diversos criterios de interés. En primer lugar, se priorizó la accesibilidad de los puntos de muestreo, eligiendo aquellos que permitiesen un acceso fácil y seguro, tanto para el transporte del material como para la realización de las mediciones en campo. Asimismo, se procuró que las fuentes seleccionadas ofreciesen una distribución equilibrada entre distintas zonas del territorio, de modo que el estudio pudiera reflejar con mayor exactitud la variabilidad espacial en la concentración de radón en el agua.

Otro criterio importante fue la combinación de fuentes ya estudiadas y fuentes nuevas. De las 28 fuentes seleccionadas, 8 habían sido previamente analizadas en el Trabajo de Fin de Grado de Sánchez-Ferragut, mientras que las 20 fuentes restantes no figuraban en dicho estudio. Esta combinación permitió no solo ampliar la base de datos existente, sino también validar y comparar los resultados con los obtenidos en investigaciones previas, aportando así un contexto adicional para interpretar los datos y permitiendo observar posibles cambios temporales en la radiactividad de estas fuentes.

El primer paso es acceder a la fuente y tomar la muestra de agua utilizando un tipo de botella específica proporcionada para el estudio, las cuales fueron diseñadas para garantizar una total hermeticidad y estanqueidad, con el objetivo de evitar cualquier pérdida de radón por desgasificación durante el transporte o almacenamiento. Por ello, se puso especial atención en el llenado y cierre de cada botella, haciendo que en la caída del agua hacia el interior del recipiente no se produjese un burbujeo excesivo.

En cada una de las tomas de muestra se procedió al registro de dos parámetros básicos. Se midió la temperatura del agua in situ mediante un termómetro digital, considerando que la temperatura es un factor que afecta a la solubilidad del radón y, por tanto, puede influir en su concentración en el agua. Además, se calculó el caudal de cada fuente utilizando un método sencillo: mediante una garrafa de 5 litros y un cronómetro, se midió el tiempo necesario para llenar el recipiente, obteniendo así el caudal en litros por segundo. Estos datos se complementaron con el registro detallado de la hora exacta y la fecha de la toma de muestra, para asegurar la trazabilidad de cada medición.

Tras la primera fase de análisis, se identificaron dos fuentes en el municipio de Marín que destacaron por presentar las concentraciones más elevadas de radón: la Fonte do Igrexario y la Fonte Arrabalde. Ambas fuentes están situadas en la zona de Xan Xián de Marín, una zona que, además de mostrar niveles de radón notablemente altos en comparación con otras medidas tomadas, cuenta con características adicionales que incrementan su interés para el estudio.

En primer lugar, ambas fuentes son fácilmente accesibles, lo que facilitó la logística para llevar a cabo un monitoreo más detallado. Sin embargo, el factor más relevante que motivó la selección de estas fuentes para un análisis más exhaustivo es que se trata de puntos de agua que son utilizados habitualmente por los lugareños para el consumo directo. Es frecuente que vecinos de la zona acudan a la Fonte do Igrexario y la Fonte Arrabalde para abastecerse de agua, dado que son fuentes tradicionales con un uso histórico y social consolidado. Esta práctica convierte el estudio de la calidad radiológica del agua en una cuestión de interés sanitario y público, ya que la exposición al radón a través del consumo de agua puede tener implicaciones para la salud de la población local si los niveles superan ciertos umbrales.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de estas fuentes, se llevó a cabo un monitoreo más específico en ambas. Este seguimiento incluyó la evaluación de las concentraciones de radón en diferentes días, cubriendo tanto jornadas consecutivas como no consecutivas, para detectar posibles variaciones diarias. Además, se realizaron mediciones en diferentes tramos horarios (mañana, tarde y ocasionalmente noche) para determinar si existían fluctuaciones asociadas a la temperatura ambiental o a la actividad diaria en la zona. Asimismo, se registraron las condiciones meteorológicas en cada toma (temperatura ambiente, presión, precipitaciones y humedad relativa), con el objetivo de analizar la influencia de factores climáticos en la variabilidad de la concentración de radón.

Este enfoque permitió obtener una visión dinámica y detallada del comportamiento del radón en estas dos fuentes específicas, permitiendo establecer patrones temporales y ambientales que pudieran incidir en la concentración de radón en el agua.

3.2 Determinación experimental de la concentración de radón en agua

Una vez que se han tomado las muestras, se procedió a realizar la medición de la concentración de radón de cada una de las muestras en el laboratorio de investigación del CUD, dejando el menor tiempo posible desde que se toma la muestra hasta que se analiza.

Se ha utilizado el medidor RTM 1668-2 (Figura 3-4) de la marca SARAD [35] con el montaje que se describe a continuación. Las características técnicas y principios de medición del aparato se detallan en el Anexo III de la memoria.



Figura 3-4 RTM 1668-2 [35]

Montaje para análisis

El primer componente fundamental del sistema es el frasco burbujeador (Figura 3-5), encargado de contener la muestra de agua a analizar. Este frasco dispone de dos conexiones superiores: una entrada para el aire que proviene del monitor y una salida que retorna el aire enriquecido en radón de nuevo al sistema. Internamente, el frasco incorpora un difusor que distribuye el aire en forma de pequeñas burbujas al pasar a través del agua. Este diseño busca maximizar la superficie de contacto entre el aire y el agua, facilitando así la liberación del radón disuelto y su incorporación a la fase gaseosa [35].

Conectados al frasco burbujeador y al monitor mediante tubos flexibles y estancos, se encuentran los conductos que dirigen el flujo de aire. Estos tubos están fabricados en materiales resistentes a la humedad y a posibles contaminantes, asegurando que el radón transferido no se adsorba ni se pierda a través de las paredes del conducto. La estanqueidad de las conexiones es crucial para mantener la integridad del circuito y evitar cualquier fuga de radón al ambiente exterior.

Adicionalmente, entre el frasco burbujeador y la entrada del monitor puede instalarse un frasco de protección contra entrada de agua (Figura 3-6), cuya función es prevenir el ingreso accidental de líquido hacia el monitor. Este componente es especialmente importante para preservar la seguridad y el correcto funcionamiento de los sensores internos. Está equipado con un sistema de flotador que detecta la presencia de agua en su interior. En caso de acumulación de líquido, el flotador activa un interruptor que corta automáticamente el flujo de aire, interrumpiendo así la operación y evitando daños en la bomba o en los detectores.

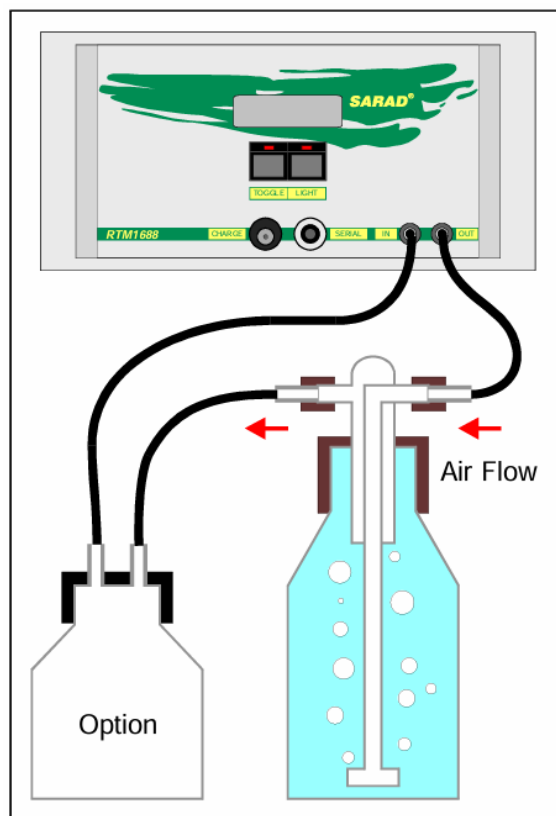


Figura 3-5 Montaje experimental [35]



Figura 3-6 Frasco de protección contra la entrada de agua [35]

Además de estos elementos esenciales, el montaje puede ser complementado con accesorios opcionales que amplían sus capacidades. Uno de ellos es la unidad de exhalación, utilizada para acoplar materiales sólidos o suelos a fin de estudiar la emanación de radón desde su superficie. También pueden añadirse adaptadores específicos para la conexión a sondas de medición de gases del suelo, facilitando así la adaptabilidad del sistema para diversas aplicaciones.

El RTM 1688-2 permite igualmente la integración de una impresora térmica portátil. Este periférico se conecta a través de las interfaces de comunicación disponibles y permite la impresión inmediata de los resultados de las mediciones in situ, sin necesidad de emplear ordenadores adicionales. Este accesorio resulta particularmente útil en campañas de campo donde la generación de reportes rápidos es esencial.

Por otro lado, el sistema puede complementarse con un router VPN 4G para la transmisión remota de datos en tiempo real. Esta opción es útil para instalaciones permanentes o monitoreo continuo en áreas de difícil acceso, ya que posibilita el envío automático de la información registrada a servidores remotos o centros de control.

Cabe destacar que, para el análisis experimental, el único periférico que se empleó fue el frasco de protección, dejando el montaje tal y como se muestra en la figura.

Antes de proceder a la medición, hay que realizar una correcta preparación del sistema. Para ello, se debe purgar el monitor RTM 1688-2, junto con los tubos de conexión y el frasco burbujeador, mediante la circulación de aire fresco durante al menos 15 minutos. Este paso tiene como objetivo eliminar cualquier traza residual de radón que pueda haber quedado en el circuito de mediciones anteriores, garantizando así que la medición refleje únicamente la concentración presente en la nueva muestra.

Si la concentración de radón que muestra el monitor es relativamente baja, se puede introducir la muestra para analizar, siempre y cuando se tenga en cuenta hacer la diferencia entre concentración inicial y final que se muestre en pantalla.

Una vez completada la purga, se procede al llenado del frasco burbujeador. La muestra de agua debe introducirse cuidadosamente, procurando minimizar la formación de burbujas excesivas durante el vertido. Este cuidado es necesario para evitar que el radón disuelto escape prematuramente antes de que el sistema se cierre herméticamente y se inicie la medición.

Posteriormente, hay que permitir que la muestra alcance la temperatura ambiente del monitor. Este ajuste térmico es necesario debido a que el coeficiente de Oswald, utilizado para calcular la concentración de radón en agua, depende directamente de la temperatura. Si la muestra está significativamente más fría o caliente que el ambiente, se recomienda dejarla aclimatarse hasta alcanzar una temperatura homogénea con la del equipo antes de comenzar el burbujeo. En todas las muestras recogidas, el tiempo de ajuste térmico fue prácticamente despreciable, pues el agua se encontraba ya a temperaturas similares a la del monitor.

Una vez la temperatura es adecuada, se procede a la conexión del frasco burbujeador al aparato, asegurando un cierre hermético del sistema. En este momento, se activa la bomba interna del monitor, la cual inicia la circulación del aire a través del circuito cerrado. A medida que el aire burbujea dentro del frasco, el radón disuelto en el agua se transfiere progresivamente a la fase gaseosa.

Con el sistema en funcionamiento, se deja circular el aire durante un período de 25 minutos. Este tiempo es necesario para que las concentraciones de radón en ambas fases agua y aire se estabilicen y alcancen el equilibrio termodinámico. Solo una vez alcanzado dicho equilibrio, la medición será representativa de la concentración real de radón disuelto. Se llegó a la conclusión de que la quinta medida ofrecida por el monitor es la más acertada, por lo que es la seleccionada como concentración de radón en cada muestra.

Finalizado el tiempo de equilibrio, el monitor procede a medir la concentración de radón en la fase gaseosa. Simultáneamente, se registra la temperatura del sistema, ya que este dato es indispensable para

aplicar correctamente el coeficiente de Oswald. Utilizando estos valores y la fórmula correspondiente, se determina la concentración original de radón en la muestra de agua.

Durante todo este proceso, es fundamental tener en cuenta la posibilidad de condensación de vapor de agua dentro del monitor. La presencia de humedad puede afectar las lecturas, por lo que se recomienda que la temperatura del agua y del monitor sean lo más similares posible. En casos necesarios, es aconsejable enfriar ligeramente la muestra antes de iniciar el procedimiento para minimizar este riesgo.

Adicionalmente, para evitar la entrada accidental de agua al interior del monitor, lo cual podría causar daños en la bomba o en los detectores, es recomendable utilizar un accesorio de protección contra entrada de agua. Este dispositivo consta de un contenedor de acero inoxidable equipado con un interruptor flotante. En caso de detectar presencia de líquido, interrumpe automáticamente la operación, protegiendo así los componentes internos del equipo.

Para facilitar el cálculo de la concentración de radón en agua, SARAD proporciona el software “Radon in Water Calculator” (Figura 3-7). Esta herramienta permite introducir los datos de volumen, temperatura y lectura obtenida del monitor, automatizando el proceso de cálculo. Además, el software incluye factores de corrección que permiten ajustar el resultado final teniendo en cuenta posibles pérdidas de radón durante la manipulación de la muestra o su absorción en las paredes del sistema.

Figura 3-7 Software Radon in Water Calculation [35]

El último paso es analizar cómo el paso del tiempo ha afectado a cada muestra desde que se tomó, calculando la concentración de radón inicial en cada una de ellas. Para ello, se empleó un método correspondiente al TFG de Jaime Sánchez Ferragut [4], que da como resultado la siguiente tabla:

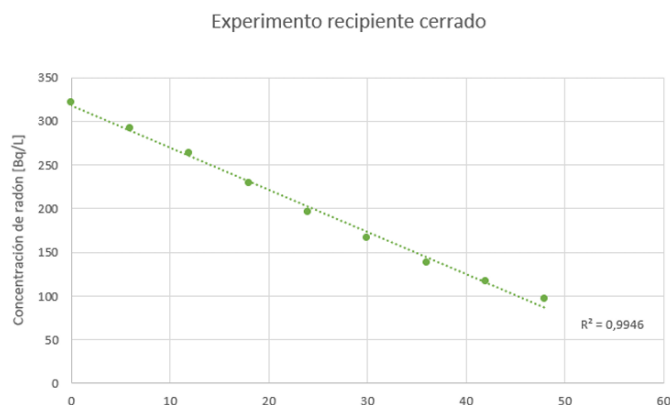


Figura 3-8 Pérdida de radón frente al tiempo [4]

Como se aprecia en la tabla, la concentración de radón en el agua disminuye con el paso de las horas, siguiendo la siguiente ecuación:

$$C_{original} = \frac{C_{medida}}{0,9855^n}$$

Donde *C_{original}* es la concentración original (la incógnita), *C_{medida}* es la concentración de radón proporcionada por el software Radon in Water Calculator tras ser analizada la muestra en el RTM 1688-2 y *n* es el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y su análisis en horas. De esta manera, obtenemos la concentración de radón que había en esa agua a la hora exacta de su recogida.

3.3 Medición de parámetros fisicoquímicos

Medición de pH

La elección del pH como uno de los parámetros a analizar en este estudio se fundamenta en su relevancia dentro de los procesos fisicoquímicos que afectan la presencia y el comportamiento del radón en aguas subterráneas, además de la facilidad de medición que supone para el presente estudio. Diversas investigaciones desarrolladas en contextos geológicos variados han evidenciado una correlación entre los valores de pH y la concentración de radón disuelto en el agua, apuntando a que este parámetro influye en su solubilidad, en la movilidad y en la interacción con otros componentes químicos del medio acuático [7].

Para analizar el pH de las muestras recogidas se hizo uso del medidor de pH modelo HI98103, diseñado para la medición precisa del pH en soluciones líquidas. Antes de su primer uso, es fundamental preparar correctamente el equipo para garantizar su buen funcionamiento y prolongar la vida útil del electrodo. Para ello, se recomienda enjuagar la sonda con agua destilada y añadir varias gotas de solución de almacenamiento (HI70300) en la tapa protectora para mantener el electrodo hidratado. En caso de no contar con dicha solución, es posible emplear como alternativa la solución tampón de pH 4 [34].

Una correcta calibración es esencial para asegurar la precisión de las mediciones. Este proceso debe realizarse utilizando soluciones tampón específicas, disponibles en sobres individuales, con valores de pH conocidos (normalmente pH 4.01, pH 7.01 y pH 10.01). Lo más recomendable es efectuar una calibración en al menos dos puntos, seleccionando tampones por encima y por debajo del valor de pH esperado en las muestras a analizar. El procedimiento consiste en encender el medidor, enjuagar el electrodo con agua destilada y sumergirlo en la solución tampón correspondiente. Una vez estabilizada la lectura, se ajusta el valor mostrado a la referencia del tampón. Este proceso se repite con un segundo tampón para mayor exactitud, asegurando siempre enjuagar el electrodo entre cada solución para evitar contaminaciones cruzadas.

Una vez calibrado, el instrumento está listo para realizar mediciones. Para ello, se lava el electrodo nuevamente con agua destilada y sumergirlo en la muestra de agua. Es importante esperar a que la lectura se estabilice antes de registrar el valor de pH. Una vez se ha realizado una medida, se vuelve a lavar el electrodo con agua destilada y vuelve a estar disponible para tomar una nueva muestra.

Medición de fosfatos

La elección de los fosfatos como parámetro de análisis en este estudio se justifica por su relevancia como indicador de actividad biogeoquímica y antrópica en sistemas acuáticos, así como por su posible relación con la movilidad del radón en el medio acuoso. Diversos estudios consultados destacan que los fosfatos, al igual que otros aniones presentes en el agua, pueden estar vinculados a procesos naturales como la meteorización de minerales, pero también a la influencia humana, especialmente en zonas rurales o urbanizadas donde existe presión agrícola o presencia de vertidos domésticos o industriales.

Para la medición de fosfatos en las muestras obtenidas, se hizo uso del fotómetro multiparamétrico HI83399, de la marca HANNA [35]. Se trata de un equipo avanzado diseñado para la medición multiparamétrica en agua, combinando tecnología de fotometría con la capacidad de medición de pH

mediante un electrodo digital. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la absorbancia de la luz a través de una muestra líquida, siguiendo la Ley de Beer-Lambert.

El sistema óptico del HI83399 está compuesto por una fuente de luz LED con filtros de paso de banda de 8 nm, un detector de fotodiodo de silicio y cubetas de medición de 16 mm o 24.6 mm de diámetro. La precisión del equipo se mantiene gracias a la función CAL Check, que valida la exactitud mediante cubetas certificadas.

La medición se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Se selecciona el parámetro deseado en el menú (en este caso, fosfatos).
- Se añade un reactivo específico a la muestra
- El fotómetro mide la absorbancia de la solución a una longitud de onda determinada.
- La concentración de fosfato se calcula automáticamente, basada en una curva de calibración preprogramada.

El procedimiento consistió en llenar unas probetas con 5 ml de agua y mezclarla con el agente reactivo de fosfato LR. Posteriormente se introducen las probetas en el agitador durante 30 minutos. Tras este tiempo, se introduce la mezcla en el vial de análisis y se pulsa el botón “CLOCK” y se inicia el análisis durante un periodo de 3 minutos. Por último, al pasar los 3 minutos, se mostrará en la pantalla la concentración de fosfato en mg/l.

Cabe destacar que, al haber un solo vial para el análisis, se procede entre muestra y muestra al enjuagado del mismo haciendo uso de agua desionizada.

Medición de turbidez

El funcionamiento del turbidímetro LW-TN3024, tal como se describe en el manual, se basa en el principio de medición nefelométrica de la turbidez, cumpliendo con la norma ISO 7027 [36].

Este instrumento utiliza un sistema óptico compuesto por una fuente de luz LED con una longitud de onda de 850 nm y un fotodiodo como detector. El dispositivo mide la cantidad de luz que es dispersada por las partículas presentes en la muestra de agua, registrando la turbidez en unidades NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Los valores medidos pueden oscilar entre 0.01 NTU y 1000 NTU, con una resolución de 0.01 NTU en los rangos más bajos y de 1 NTU en los más altos.

Primero se lleva a cabo una calibración mediante los viales que vienen en el maletín, uno de 0 NTU y otro de 100 NTU. Tras la calibración, el instrumento se encuentra disponible para la medición.

El proceso de medición es sencillo. Primero, se llena un vial con 10 ml de la muestra de agua. Es crucial asegurarse de que el vial esté limpio, seco y libre de burbujas o polvo para no alterar la precisión de la lectura. Una vez colocado el vial en el compartimento designado del turbidímetro y alineadas las marcas blancas, se cierra la tapa y se enciende el aparato. Al pulsar el botón “TEST”, el equipo realizará la medición y mostrará el valor de turbidez en la pantalla después de unos 10 segundos.

Además, el equipo posee funciones adicionales como la retención de datos en pantalla (botón “HOLD”), registro de valores máximos y mínimos (botón “REC”), y calibración manual. La calibración se efectúa utilizando dos soluciones estándar: una de 0 NTU y otra de 100 NTU. Se introduce primero la solución de 0 NTU y se ajusta el valor con el botón “CAL” hasta que el equipo indique cero. Posteriormente, se repite el proceso con la solución de 100 NTU para completar la calibración.

Finalmente, el turbidímetro incluye funciones prácticas como apagado automático para ahorrar batería, memoria interna para registros, y es portátil gracias a su funcionamiento con pilas AAA, ideal para mediciones en campo. También dispone de accesorios como viales estándar, paño de limpieza y maletín de transporte para facilitar su uso.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este punto se tratan los resultados de las mediciones realizadas, primero de la fase general de recogida de muestras, una comparación de resultados de fuentes analizadas tanto en 2024 como en 2025, seguido del análisis desde un punto de vista geológico y finalizando con el análisis de resultados de la recolección repetitiva de muestras en las dos fuentes seleccionadas para ello.

4.1 Muestras generales

En este apartado se presentan los resultados obtenidos relativos a las muestras generales de agua tomadas en 28 fuentes de la Península de Morrazo, analizando los resultados obtenidos en los diferentes parámetros que se han medido posteriormente en el laboratorio.

4.1.1 Resultados concentración de radón

Esta primera tabla (Tabla 4-1) muestra los valores obtenidos de concentración de radón en las fuentes que se han analizado, indicando el nombre de la fuente, el municipio al que pertenecen y el número de muestra.

Nº fuente	Concentración radón (Bq/l)	Caudal (l/min)	Tº agua (°C)	pH	Turbidez (NTU)	Fosfatos (mg/l)
1	34,71	2,0	13,5	5,8	0,15	0,09
2	295,11	20,0	14,6	6,1	0,09	0,26
3	155,87	2,5	14,7	6	0,14	0,07
4	8,43	7,5	15,2	6,3	0,33	0,32
5	326,34	14,5	14,9	5,3	0,17	0,26
6	314,07	17,0	14,7	5,3	0,25	0,24
7	312,89	15,5	15	5,2	0,87	0,17
8	247,53	15,0	15,8	5,7	0,58	0,17
9	324,66	8,5	-	5,2	0,85	0,11
10	133,38	7,5	-	6	0,2	0,15
11	412,27	6	-	5	0,49	0,12
12	221,40	11,5	-	5,3	0,53	0,14
13	347,43	16,5	-	6	0,34	0,1
14	241,17	21	-	5,7	0,48	0,09
15	129,35	18	-	5,5	0,23	0,12
16	190,13	25	-	5,6	1,53	0,18
17	170,70	23	-	5,9	0,44	0,11
18	94,35	1,5	14,8	7,3	0,67	0,04

19	42,69	15	13,5	7,3	0,37	0,12
20	203,73	20	13,2	5,9	1,55	0,24
21	86,14	13,5	13,4	6,1	0,13	0,19
22	340,79	10	14	5,8	0,35	0,43
23	490,73	16	15,3	5,7	1,26	0,51
24	401,41	25	14,3	5,8	1,08	0,39
25	119,58	10	13,8	6,2	0,74	0,27
26	275,33	15	15,3	5,9	0,96	0,2
27	286,29	15	14,9	5,6	0,78	0,31
28	228,23	11	14,2	5,5	0,24	0,19

Tabla 4-1 Tabla general de resultados de concentración de radón y otros parámetros (Elaboración propia)

Las concentraciones más elevadas se registran en la muestra 23 (Fonte do Arrabalde), con 490,73 Bq/l, seguida de la 24 (Fonte do Igrexairo) con 401,41 Bq/l. También presentan valores elevados las muestras 11 (412,27 Bq/l), 5 (326,34 Bq/l) y 6 (314,07 Bq/l), lo que sugiere una influencia del sustrato geológico, posiblemente con contenidos significativos de uranio y radio, así como condiciones hidrogeológicas más favorables a la acumulación de radón.

En el extremo opuesto, se observa que la muestra 4 (Fonte da Costa) presenta la concentración más baja, con tan solo 8,43 Bq/L, muy por debajo de cualquier umbral de riesgo. Le siguen la muestra 19 (Fonte de Vista Alegre) con 42,69 Bq/l y la 18 (Fonte Coraidos) con 94,35 Bq/l, todas ellas dentro de niveles considerados seguros.

Existe un a contraste entre los valores máximos y mínimos que refleja una gran heterogeneidad espacial en la distribución del radón en aguas subterráneas.

Del total de fuentes analizadas, se observa (Figura 4-1) que un 82,14 % presentan concentraciones superiores a 100 Bq/l, mientras que solo un 17,86 % se encuentran por debajo de dicho límite.

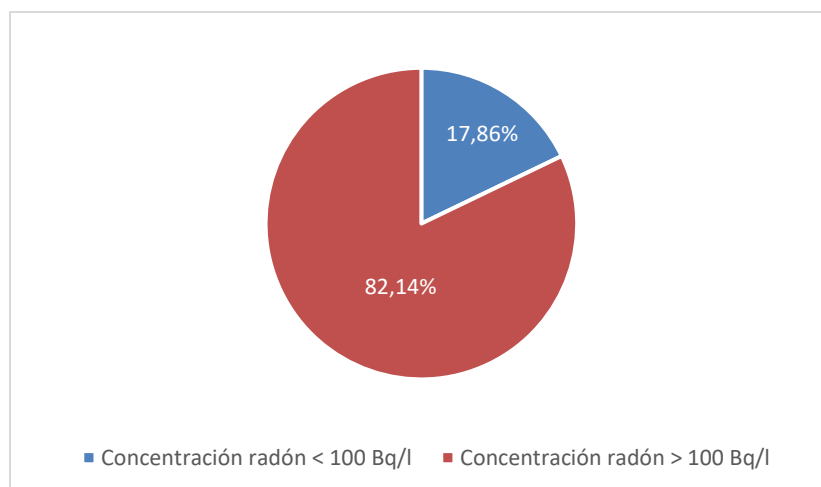


Figura 4-1 Gráfico porcentual de concentración de radón superior a 100 Bq/l (Elaboración propia)

En el siguiente diagrama (Figura 4-2) se muestran los resultados obtenidos diferenciados en 3 rangos: Concentración de radón < 100 Bq/l, 100 Bq/l < Concentración de radón < 300 Bq/l y Concentración de radón > 300 Bq/l.

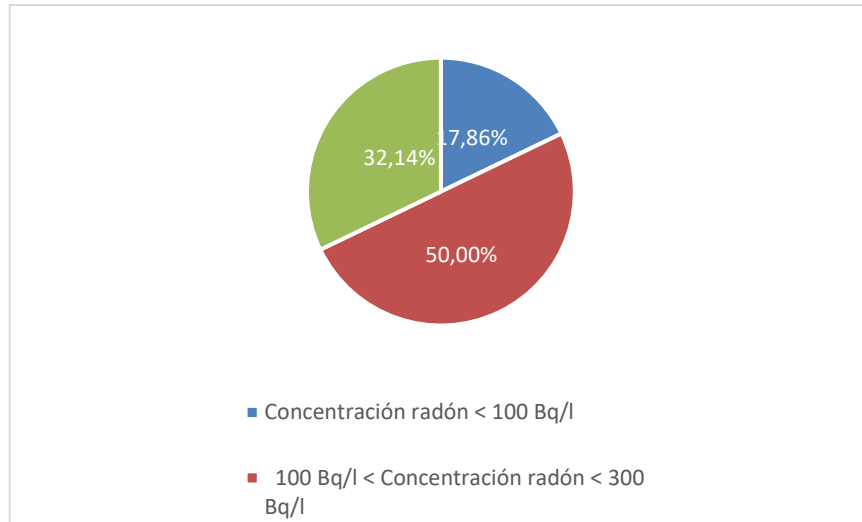


Figura 4-2 Gráfico porcentual de concentración de radón por rangos (Elaboración propia)

4.1.2 Análisis paramétrico

CAUDAL

En siguiente diagrama (Figura 4-3) se presenta la concentración de radón en agua, expresada en Bq/l, con el caudal de las muestras, medido en litros por minuto (L/min). La concentración de radón abarca un rango amplio, desde valores bajos, cercanos a 0 Bq/l, hasta aproximadamente 500 Bq/l, mientras que los valores de caudal oscilan entre 2 y 27 L/min.

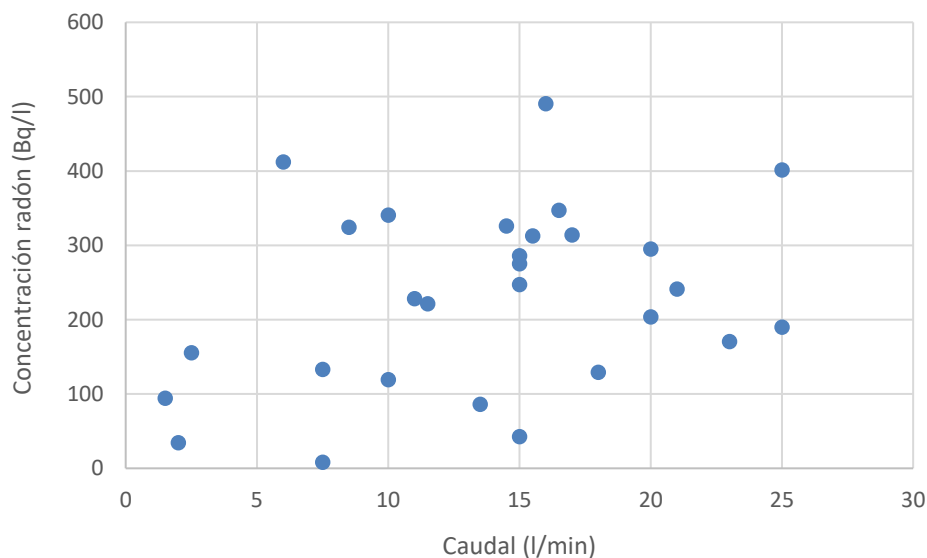


Figura 4-3 Concentración de radón-caudal (Elaboración propia)

No se aprecia una correlación lineal clara y directa entre la concentración de radón y el caudal. Sin embargo, al observar la gráfica, pueden identificarse ciertos patrones:

- A bajas concentraciones de radón (<100 Bq/l): Los valores de caudal muestran una alta dispersión, abarcando desde caudales bajos (alrededor de 3-5 L/min) hasta valores cercanos a 15 L/min.
- En el rango intermedio (150-300 Bq/l): La mayoría de los datos de caudal se concentran entre 10 y 20 L/min, aunque existen puntos con valores algo superiores y otros con caudales más bajos.
- Para concentraciones elevadas de radón (superiores a 400 Bq/l): La dispersión es más acusada, con caudales que varían desde valores mínimos de aproximadamente 5 L/min hasta máximos cercanos a 25 L/min.

TEMPERATURA DEL AGUA

La gráfica (Figura 4-4) muestra un diagrama de dispersión en el que se representa la relación entre la concentración de radón en agua (Bq/l) y la temperatura del agua (°C) correspondiente a las muestras analizadas. La concentración de radón abarca un intervalo amplio, con valores que van desde niveles bajos, cercanos a 0 Bq/l, hasta alcanzar aproximadamente los 500 Bq/l. Por su parte, la temperatura del agua varía en un rango comprendido entre 13.5°C y 15.8°C.

Es importante destacar que el número de datos disponibles en esta gráfica es inferior al de otros parámetros estudiados, debido a que en los análisis realizados fuera del municipio de Marín no se dispuso de termómetro para registrar la temperatura del agua. Por tanto, los datos corresponden únicamente a las muestras en las que fue posible medir este parámetro in situ.

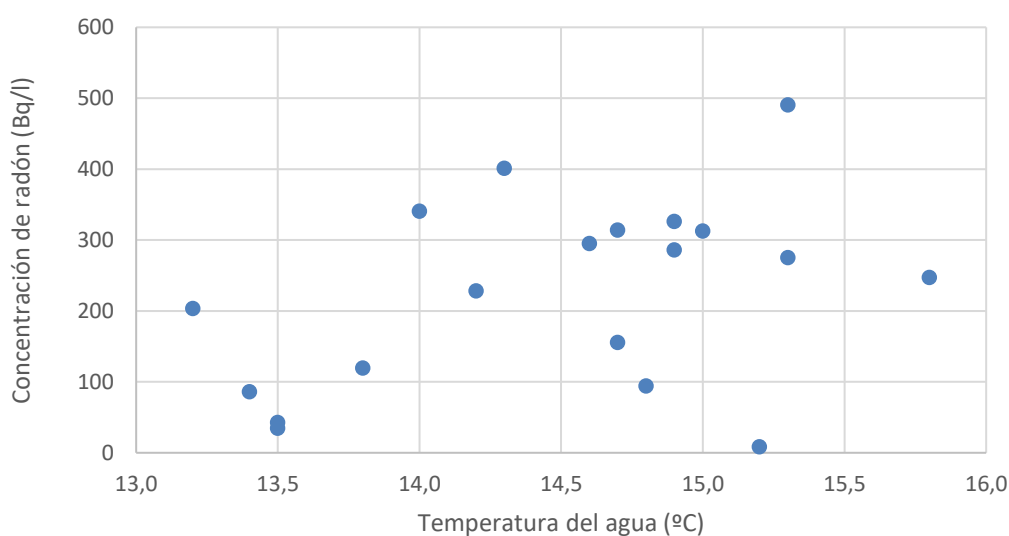


Figura 4-4 Concentración de radón-Temperatura del agua (Elaboración propia)

No se aprecia una correlación lineal clara entre la concentración de radón y la temperatura del agua. Sin embargo, es posible identificar ciertos comportamientos generales:

A bajas concentraciones de radón (<100 Bq/l): La temperatura del agua tiende a situarse entre 13.5°C y 14.0°C, sin gran variabilidad.

En el rango intermedio (150-350 Bq/l): Los valores de temperatura muestran mayor dispersión, registrándose tanto temperaturas moderadas (alrededor de 14.5°C) como algunas más elevadas, alcanzando valores próximos a 15.8°C.

A concentraciones elevadas de radón (superiores a 400 Bq/l): Las temperaturas registradas se sitúan alrededor de 15.2°C a 15.4°C, aunque el número de datos en este rango es limitado.

pH

La siguiente gráfica (Figura 4-5) representa un diagrama de dispersión en el que se relaciona la concentración de radón en agua, expresada en Bq/l, con los valores de pH medidos en las diferentes muestras.

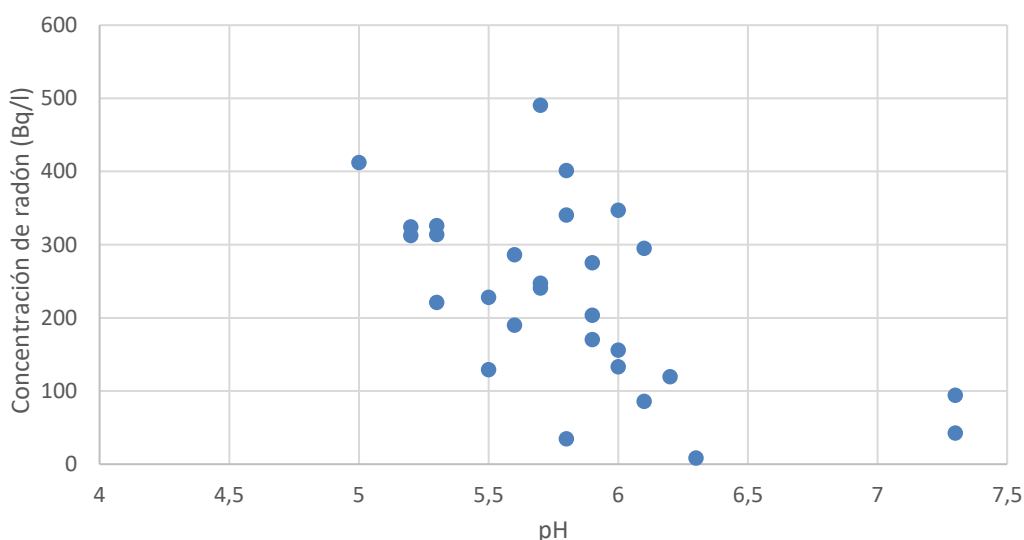


Figura 4-5 Concentración de radón-pH (Elaboración propia)

La concentración de radón abarca un intervalo amplio, con valores que oscilan desde concentraciones bajas, próximas a 0 Bq/l, hasta alcanzar aproximadamente los 500 Bq/l. Por otro lado, los valores de pH registrados se sitúan predominantemente entre 5.0 y 6.5, evidenciando un carácter ligeramente ácido en la mayoría de las muestras.

No obstante, se observan algunos puntos aislados que presentan valores superiores a 7.0, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas en determinados casos concretos. En el extremo inferior, también se detectan valores cercanos a 5.0, lo que refleja un ambiente notoriamente ácido en ciertas muestras.

En cuanto al comportamiento general de los datos, se aprecia una ligera tendencia descendente a medida que aumenta la concentración de radón. Es decir, a mayor concentración de radón en el agua, los valores de pH tienden a disminuir, aunque esta relación no sigue una dependencia estrictamente lineal, presentando una notable dispersión en algunos intervalos.

Analizando la gráfica con mayor detalle, se pueden identificar los siguientes patrones:

- Para bajas concentraciones de radón (<100 Bq/l): El pH presenta una notable variabilidad, con valores que se extienden desde 5.8 hasta 7.4. Esta dispersión refleja que, en este intervalo, coexisten muestras con características ácido-neutras y otras más alcalinas, lo cual podría estar relacionado con la diversidad de condiciones fisicoquímicas y mineralógicas del entorno.
- En el rango intermedio (150-300 Bq/l): Los valores de pH tienden a concentrarse en un intervalo más reducido, mayoritariamente entre 5.0 y 6.0, mostrando una menor dispersión respecto a los valores registrados en concentraciones más bajas. Esto sugiere una cierta estabilización de las condiciones ligeramente ácidas en este rango de concentración de radón.
- Para concentraciones elevadas de radón (superiores a 400 Bq/l): El pH parece mantenerse estable en torno a 5.0 - 5.5, evidenciando un ambiente claramente ácido. La escasa variabilidad en este

intervalo sugiere que, a medida que la concentración de radón alcanza niveles elevados, las condiciones fisicoquímicas del agua tienden a estabilizarse en un entorno ácido, sin registrar valores neutros o alcalinos.

TURBIDEZ

Esta gráfica (Figura 4-6) representa un diagrama de dispersión que muestra la relación entre la concentración de radón en agua (expresada en Bq/l) y la turbidez (medida en NTU).

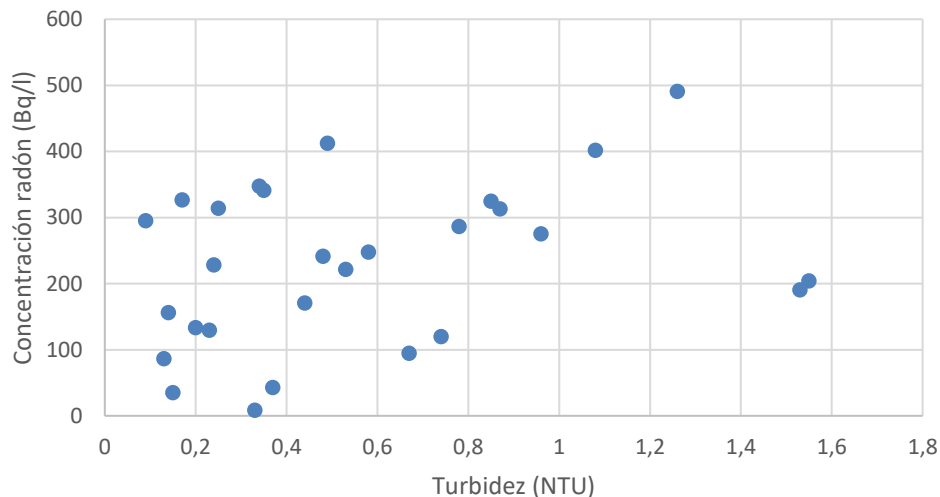


Figura 4-6 Concentración de radón-Turbidez (Elaboración propia)

Los datos abarcan concentraciones de radón desde valores cercanos a 0 hasta aproximadamente 500 Bq/l, mientras que los valores de turbidez oscilan entre 0 y 1,6 NTU.

La mayoría de los valores de turbidez se sitúan entre 0,1 y 0,8 NTU, observándose algunos puntos aislados con turbidez elevada, alcanzando hasta 1,6 NTU. La concentración de radón presenta una distribución amplia, con valores dispersos a lo largo del eje horizontal.

A simple vista, no se observa una correlación lineal clara y directa entre ambas variables. No obstante, es posible identificar ciertos patrones:

- A concentraciones bajas de radón (inferiores a 100 Bq/l), la turbidez tiende a mantenerse por debajo de 0,5 NTU, con poca dispersión.
- En el intervalo intermedio, comprendido entre 200 y 300 Bq/l, la turbidez muestra mayor variabilidad, observándose tanto valores bajos como elevados, alcanzando en algunos casos hasta 1,6 NTU.
- A concentraciones elevadas de radón (superiores a 400 Bq/l), aunque el número de puntos es reducido, se registran valores de turbidez por encima de 0,8 NTU.

La distribución de los datos no sugiere un comportamiento estrictamente lineal, evidenciándose una dispersión significativa de los puntos a lo largo de todo el rango de concentraciones de radón. A pesar de la ausencia de una tendencia claramente definida, se aprecia que, en determinados intervalos, la turbidez alcanza valores más elevados.

FOSFATOS

Este diagrama de dispersión corresponde a la concentración de fosfatos (mg/l) frente a la concentración de radón en el agua (Bq/l)

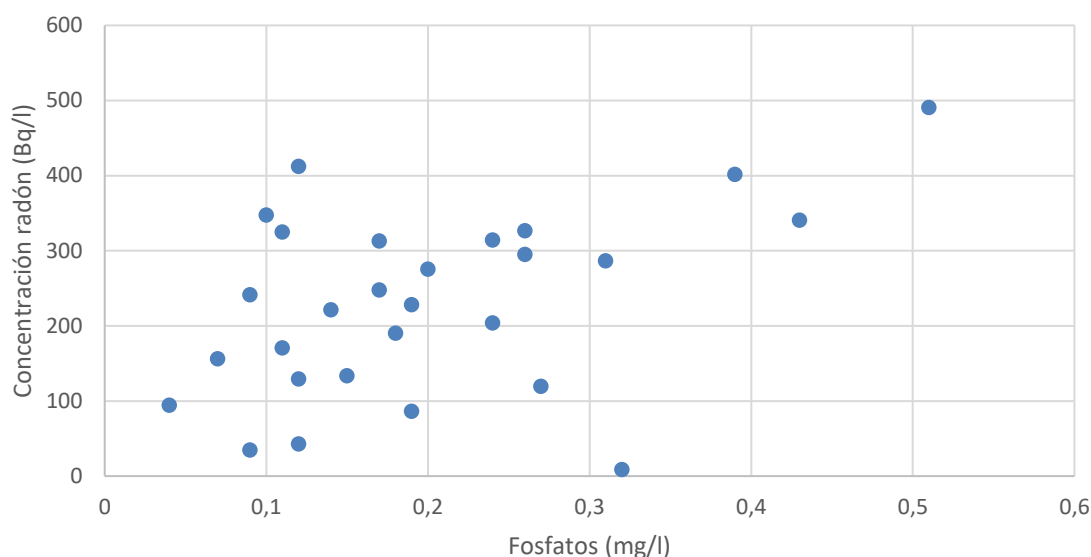


Figura 4-7 Concentración de radón-Fosfatos (Elaboración propia)

La gráfica muestra un diagrama de dispersión que relaciona la concentración de radón en agua (Bq/l) con la concentración de fosfatos (mg/l). La concentración de radón varía entre valores cercanos a 0 y aproximadamente 500 Bq/l, mientras que los fosfatos presentan valores comprendidos entre 0 y 0,5 mg/l.

La mayor parte de los valores de fosfatos se sitúan entre 0,1 y 0,3 mg/l, observándose algunos puntos con concentraciones superiores, alcanzando un máximo cercano a 0,52 mg/l. Los datos de radón presentan una distribución amplia, con una concentración creciente a lo largo del eje horizontal.

En cuanto a la tendencia aparente, no se identifica una correlación lineal clara y directa a simple vista. Sin embargo, es posible destacar ciertos comportamientos específicos:

- Para concentraciones bajas de radón (inferiores a 150 Bq/l), los fosfatos tienden a situarse por debajo de 0,2 mg/l, con baja dispersión.
- En el intervalo comprendido entre 150 y 300 Bq/l, los valores de fosfatos muestran una mayor variabilidad, distribuyéndose entre 0,1 y 0,3 mg/l.
- A concentraciones de radón superiores a 300 Bq/l, se observa una mayor dispersión en los fosfatos, incluyendo valores que superan los 0,4 mg/l, alcanzando el máximo en torno a 0,52 mg/l de radón.

El conjunto de datos no evidencia un patrón lineal homogéneo. No obstante, en el rango de concentraciones elevadas de radón, se advierte un incremento en la dispersión y en los valores máximos de fosfatos registrados.

4.2 Comparación resultados con el TFG de Sánchez Ferragut

En este apartado compararemos los resultados de las fuentes estudiadas tanto en el presente estudio como en el realizado en el TFG de Jaime Nicolás Sánchez Ferragut. La siguiente tabla muestra las fuentes que fueron analizadas para los dos Trabajos de Fin de Grado.

Nº	Nombre	Concentración radón 2025 (Bq/l)	Concentración de radón 2024 (Bq/l)
2	FONTE DA MOREIRA	295,11	321,1
3	FINCA DE BRIZ	155,87	65,1
5	FONTE DO CASAL	326,34	368,8
7	FONTE CRUXEIRA	312,89	229,7
11	FONTE DO XASTRE	412,27	250,5
16	FONTE QUEIXEIRA	190,13	129,5
17	FONTE FONTÁN	170,70	210,0
22	FONTE ROZAS	340,79	284,1

Tabla 4-2 Fuentes analizadas en 2024 y 2025 (Elaboración propia) [4]

Para una mejor apreciación visual de los valores comparados, se presenta la siguiente gráfica (Figura 4-8).

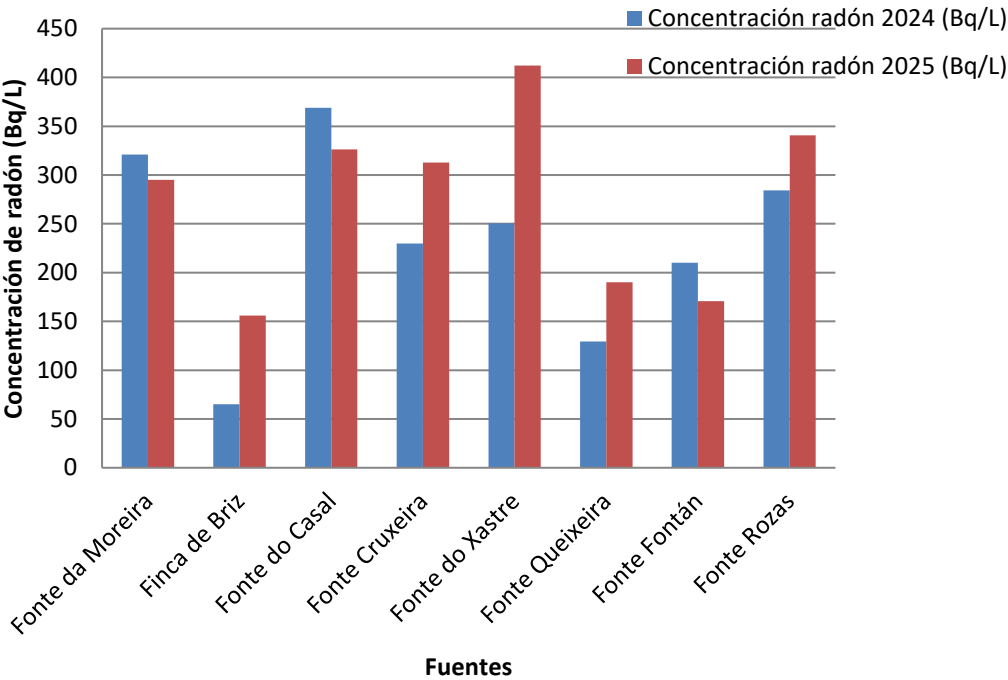


Figura 4-8 Comparación valores 2024 vs 2025 (Elaboración propia)

En la presente campaña se ha realizado un análisis detallado de las concentraciones de radón en diversas fuentes de la Península del Morrazo previamente estudiadas por Sánchez-Ferragut en 2024. La comparación directa de estos resultados permite evaluar la coherencia y la posible evolución temporal de las concentraciones.

La Fonte da Moreira (2) mostró en 2024 un valor de 321,1 Bq/L, mientras que en 2025 se ha registrado una concentración ligeramente inferior, de 295,11 Bq/L. La Finca de Briz (nº 3) pasó de 65,1 Bq/L en 2024 a 155,87 Bq/L en 2025, destacando por el incremento observado entre ambas campañas.

En el caso de la Fonte do Casal (5), se mantuvieron valores elevados en ambos años: 368,8 Bq/L en 2024 y 326,34 Bq/L en 2025. La Fonte Cruxeira (7) presentó un aumento, pasando de 229,7 Bq/L a 312,89 Bq/L.

La Fonte do Xastre (11) registró el valor más elevado de toda la serie en 2025, alcanzando 412,27 Bq/L frente a los 250,5 Bq/L de 2024. Por su parte, la Fonte Queixeira (16) también mostró un incremento, con 190,13 Bq/L en 2025 respecto a 129,5 Bq/L en el año anterior.

En contraste, la Fonte Fontán (17) fue la única que presentó una disminución, con 170,70 Bq/L en 2025 frente a 210,0 Bq/L en 2024. Finalmente, la Fonte Rozas (22) pasó de 284,1 Bq/L en 2024 a 340,79 Bq/L en 2025.

En general, los datos obtenidos en 2025 muestran una tendencia general al aumento en la mayoría de las fuentes analizadas, manteniéndose en los márgenes por debajo de 500 Bq/l.

La tendencia parece la misma, ya que, aunque el valor concreto de las concentraciones ha cambiado, el orden de mayor a menor concentración de radón en las fuentes se mantiene.

4.3 Relación geológica con la concentración de radón

Medidas tomadas en Marín

En este primer mapa (Figura 4-9) se encuentran las localizaciones de las fuentes de las que se tomaron muestras en el Concello Municipal de Marín desde un punto de vista geológico [40].

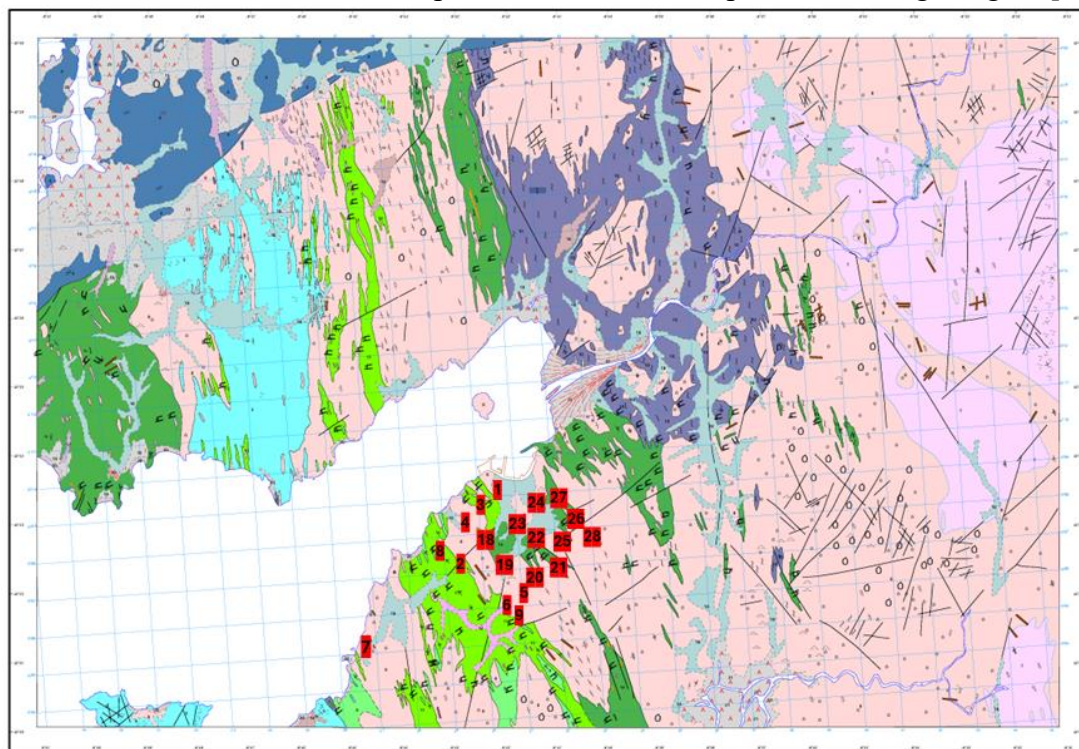


Figura 4-9 Mapa geológico Cara Norte de la Península del Morrazo [40].

En el mapa geológico, basado en la cartografía oficial del IGME, se identifican varias unidades litológicas principales que condicionan la presencia y el comportamiento del radón en el subsuelo. Por un lado, destacan los granitos y granodioritas biotíticos, representados en colores rosa claro y salmón, correspondientes a la unidad 7. Estas rocas, dominantes en la Península del Morrazo, presentan un alto

contenido en uranio y radio, lo que las convierte en las principales responsables de las emisiones más significativas de radón, especialmente en zonas con intensa fracturación o meteorización.

En segundo lugar, se identifican los gneises de biotita, caracterizados por tonalidades azul claro, que corresponden a las unidades 14 y 14a. Estas rocas metamórficas bandeadas presentan en general un menor contenido en uranio que los granitos, aunque localmente pueden contener minerales accesorios como circón y titanita, contribuyendo de manera secundaria a la generación de radón.

Por otra parte, aparecen las intercalaciones de anfibolitas, representadas en verde claro (unidad 17), que corresponden a zonas metamórficas básicas mezcladas con gneis y granito. Estas formaciones presentan un potencial moderado de radón, condicionado por la fracturación y la heterogeneidad litológica. Finalmente, las anfibolitas puras, representadas en verde oscuro (unidad 19), son rocas metamórficas básicas más homogéneas, con un contenido en uranio generalmente bajo y, por tanto, menor capacidad potencial para liberar radón.

En cuanto al análisis específico de las fuentes localizadas, las fuentes 1, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 17, 20, 21, 23, 24, 25 y 28 se encuentran principalmente sobre granito y granodiorita biotítico (rosa salmón). Estas fuentes están emplazadas en un entorno de roca plutónica intensamente fracturada y zonas de alteración superficial, lo que implica un alto potencial de radón disuelto, favorecido por la meteorización y la alta conectividad hidráulica.

Las fuentes 12 y 13 están situadas sobre gneis de biotita (azul claro), una litología con menor contenido en uranio, pero con fracturación significativa que puede facilitar la migración del radón. En consecuencia, estas fuentes presentan un potencial moderado.

Las fuentes 2, 3, 8, 10, 14, 15 y 16 se localizan en intercalaciones de anfibolitas (verde claro). Estas zonas, al estar asociadas a mezclas litológicas y fracturas, presentan un potencial moderado de radón, condicionado por la conectividad hidráulica y la heterogeneidad local.

Finalmente, las fuentes 18, 19, 22, 26 y 27 están emplazadas sobre anfibolitas puras (verde oscuro). En estas formaciones, el potencial de radón se considera bajo-moderado debido al menor contenido en uranio y la estructura generalmente más compacta de la roca, aunque la presencia de fracturación local puede incrementar puntualmente el riesgo.

Medidas realizadas en Moaña

En el siguiente mapa (Figura 4-10) se exponen el mapa geológico con aquellas mediciones realizadas en Moaña [41].

La fuente 10, situada en la zona central-este, se encuentra sobre anfibolitas intercaladas (verde claro), en una franja asociada a mezclas metamórficas. Este contexto litológico, combinado con la fracturación local, sugiere un potencial moderado de radón, especialmente en zonas donde el agua circula lentamente y la interacción con la roca es prolongada.

La fuente 12, ubicada ligeramente al norte, se emplaza sobre gneis de biotita (azul claro). Esta litología metamórfica, aunque presenta menor contenido en uranio que el granito, posee fracturación significativa que puede facilitar la liberación de radón. En este caso, se estima un potencial moderado de radón.

Por su parte, la fuente 13, localizada al suroeste y próxima a la costa, también se asienta sobre gneis de biotita (azul claro). Este entorno, con fracturación notable y contactos locales con granito, presenta un potencial moderado, aunque puede incrementarse puntualmente por la influencia de enclaves graníticos.

La fuente 14, situada en el sector centro-norte, se encuentra en una zona de anfibolitas intercaladas (verde claro), caracterizada por una estructura heterogénea y fracturación importante. Este entorno litológico indica un potencial moderado de radón, condicionado por la permeabilidad secundaria y la prolongada interacción agua-roca.

Las fuentes 15 y 16, próximas entre sí en el centro-este, también se localizan sobre anfibolitas intercaladas (verde claro). Esta litología, junto con la presencia de fracturas tectónicas y zonas alteradas, sugiere un potencial moderado de radón, que podría aumentar en puntos donde la circulación subterránea es más lenta.

Finalmente, la fuente 17, situada al noreste, se encuentra sobre granito biotítico (rosa salmón), relativamente homogéneo, pero con evidencia de alteración superficial y microfracturas asociadas a diaclasas regionales. En consecuencia, esta fuente podría presentar un potencial alto de radón, potenciado por la meteorización que incrementa la liberación de uranio y radio desde la roca matriz.

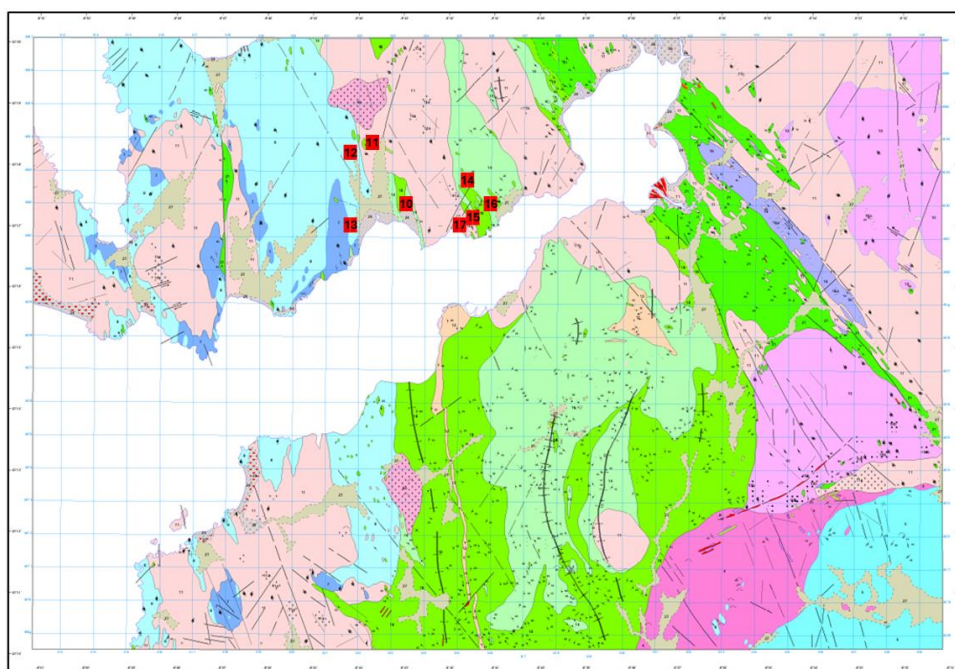


Figura 4-10 Mapa geológico Cara Sur Península de Morrazo [41].

La siguiente tabla resume cada tipo de suelo con cada fuente y su correspondiente color en el mapa

Tipo de suelo	Fuentes	Color mapa
Granito y granodiorita biotítico	1, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 17, 20, 21, 23, 24, 25, 28	Rosa salmón
Gneis de biotita	12, 13	Azul claro
Intercalaciones de anfibolitas	2, 3, 8, 10, 14, 15, 16	Verde claro
Anfibolitas puras	18, 19, 22, 26, 27	Verde oscuro

Tabla 4-3 Resumen de fuentes con su litología

La siguiente gráfica muestra cada fuente analizada numerada, con su correspondiente valor medido de concentración de radón, además de la identificación del tipo de suelo por colores.

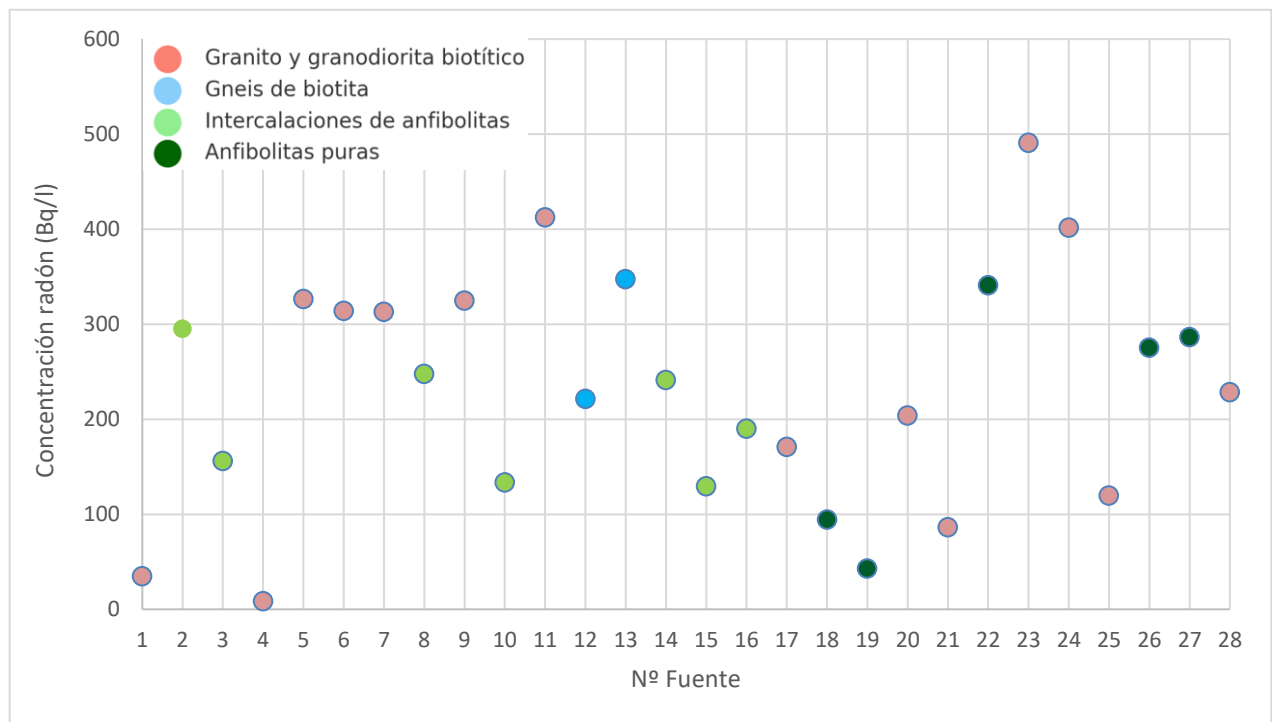


Figura 4-11 Gráfico análisis geológico (Elaboración propia)

Al ver la gráfica (Figura 4-11) no podemos encontrar ninguna correlación clara entre el tipo de suelo de donde se encuentra la ubicación de las fuentes analizadas. Sin embargo, también sería importante analizar el tipo de roca del subsuelo por la que transcurre el agua subterránea, ya que, tal y como se ha analizado en el Estado del Arte, la litología juega un papel importante en la concentración de radón en el agua.

4.4 Resultados fuentes específicas

4.4.1 Resultados de concentración de radón

Fonte do Arrabalde

Nº Fuente	Fecha	Hora	Concentración radón (Bq/l)	Nº Fuente	Fecha	Hora	Concentración radón (Bq/l)
1	14-mar	18:30	457,819	17	19-mar	22:10	501,752
2	14-mar	20:45	482,433	18	20-mar	16:15	482,443
3	14-mar	23:00	488,539	19	20-mar	19:00	479,459
4	15-mar	10:00	485,941	20	20-mar	22:00	489,906
5	15-mar	14:30	488,261	21	21-mar	10:00	471,327
6	15-mar	18:00	454,926	22	21-mar	13:00	461,468

7	15-mar	22:00	476,191	23	21-mar	18:00	491,738
8	16-mar	09:30	480,396	24	21-mar	22:00	465,500
9	16-mar	13:00	458,962	25	22-mar	10:00	489,253
10	16-mar	18:00	471,092	26	22-mar	13:00	483,233
11	16-mar	22:00	472,657	27	22-mar	18:00	472,049
12	17-mar	18:05	457,856	28	22-mar	22:00	479,098
13	17-mar	20:40	467,844	29	23-mar	10:00	442,682
14	17-mar	23:05	472,875	30	23-mar	13:00	458,381
15	19-mar	16:10	469,933	31	23-mar	18:00	445,943
16	19-mar	19:00	479,178	32	23-mar	22:00	466,594

Tabla 4-4 Valores concentración de radón de Fonte do Arrabalde (Elaboración propia)

Para una mejor visualización de los datos de la tabla, la siguiente gráfica presenta los resultados de las 32 muestras que fueron tomadas en la Fonte do Arrabalde, una de las dos fuentes elegidas para estudio intensivo debido a sus altas concentraciones de radón.

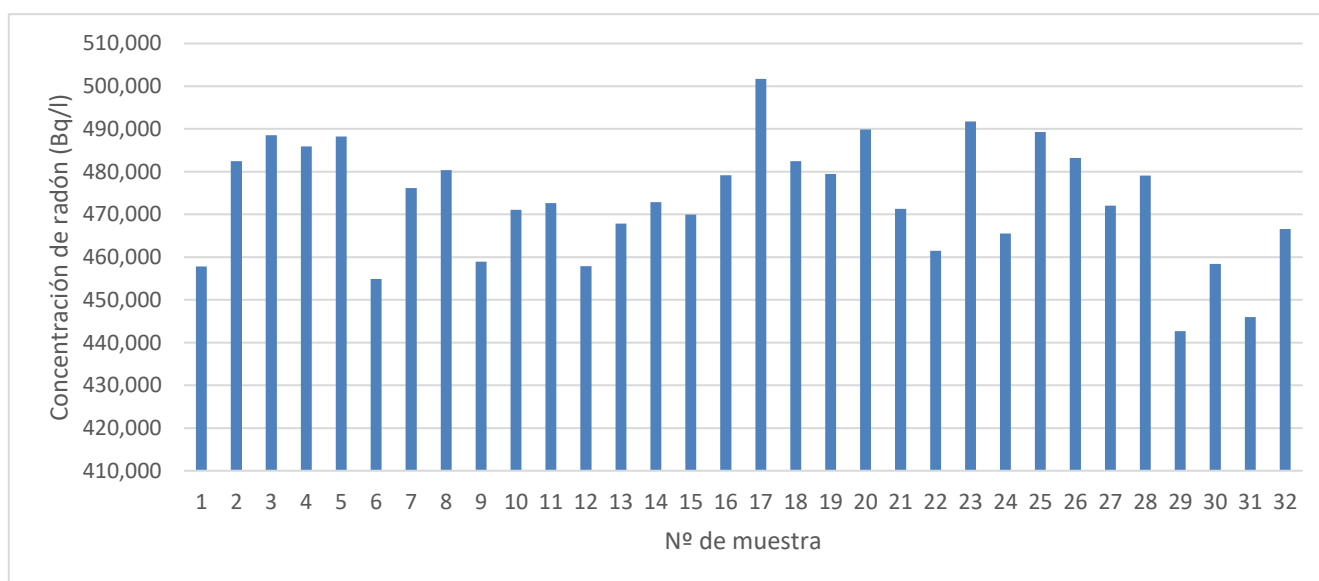


Figura 4-12 Valores de concentración de radón Fonte do Arrabalde (Elaboración propia)

- La mayoría de las muestras se sitúan en un rango entre 460 y 490 Bq/L, con ciertas fluctuaciones que reflejan una variabilidad moderada a lo largo del periodo de muestreo.
- En la Muestra 17, con una concentración ligeramente superior a 500 Bq/L, se encuentra el pico del conjunto. Este valor representa una concentración excepcionalmente alta para aguas naturales y además superando el límite marcado por la normativa española.
- El mínimo lo tenemos en la Muestra 29, con un valor cercano a los 440 Bq/L, que, aunque más bajo en comparación con el resto, sigue siendo muy elevado respecto a los valores de referencia.

Fonte do Igrexario							
Nº	Fecha	Hora	Concentración radón (Bq/l)	Nº	Fecha	Hora	Concentración radón (Bq/l)
1	14-mar	18:40	457,819	17	19-mar	22:20	501,752
2	14-mar	21:00	482,433	18	20-mar	16:25	482,443
3	14-mar	23:10	488,539	19	20-mar	19:10	479,459
4	15-mar	10:10	485,941	20	20-mar	22:10	489,906
5	15-mar	14:40	488,261	21	21-mar	10:10	471,327
6	15-mar	18:10	454,926	22	21-mar	13:10	461,468
7	15-mar	22:10	476,191	23	21-mar	18:10	491,738
8	16-mar	09:40	480,396	24	21-mar	22:10	465,500
9	16-mar	13:10	458,962	25	22-mar	10:10	489,253
10	16-mar	18:10	471,092	26	22-mar	13:10	483,233
11	16-mar	22:10	472,657	27	22-mar	18:10	472,049
12	17-mar	18:15	457,856	28	22-mar	22:10	479,098
13	17-mar	20:50	467,844	29	23-mar	10:10	442,682
14	17-mar	23:15	472,875	30	23-mar	13:10	458,381
15	19-mar	16:20	469,933	31	23-mar	18:10	445,943
16	19-mar	19:10	479,178	32	23-mar	22:10	466,594

Tabla 4-5 Valores concentración de radón en Fonte do Igrexario (Elaboración propia)

En este gráfico se disponen los datos de las 32 muestras correspondientes a la Fonte do Igrexario, la segunda de las fuentes escogidas para el muestreo intensivo.

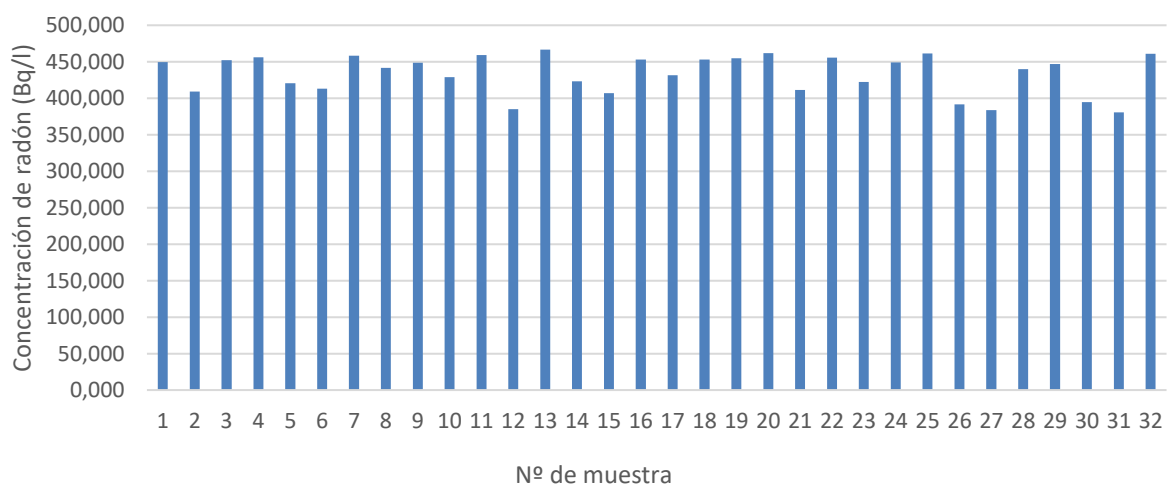


Figura 4-13 Valores de concentración de radón en Fonte do Igrexario (Elaboración propia)

- Las muestras no superan el valor límite de 500 Bq/l marcado por la normativa vigente española, aunque se quedan relativamente cerca.
- El intervalo de concentraciones se sitúa entre aproximadamente 385 y 460 Bq/l, lo que evidencia una estabilidad notablemente alta dentro de un rango elevado.
- Tenemos el máximo en la Muestra 14, con una concentración cercana a los 460 Bq/l, lo que marca el valor más alto registrado en esta serie y los mínimos en las muestras 13 y 31, con valores en torno a los 385 Bq/l, siendo los únicos registros que descienden ligeramente respecto al resto de la serie.
- A diferencia de Fonte do Arrabalde, aquí se observa una menor variabilidad interna, con la mayoría de las muestras agrupadas en torno a una media elevada y con fluctuaciones moderadas.

4.4.2 Resultados condiciones meteorológicas

Todos los datos meteorológicos incluidos en el estudio han sido consultados en el histórico diezminutal de MeteoGalicia de las respectivas estaciones meteorológicas de Marín y Moaña [37].

Temperatura ambiental

El gráfico (Figura 4-14) representa la relación entre la temperatura ambiental (°C) y la concentración de radón disuelto en agua (Bq/l), diferenciando los resultados obtenidos en la Fonte do Arrabalde (color azul) y la Fonte do Igrexario (color rojo).

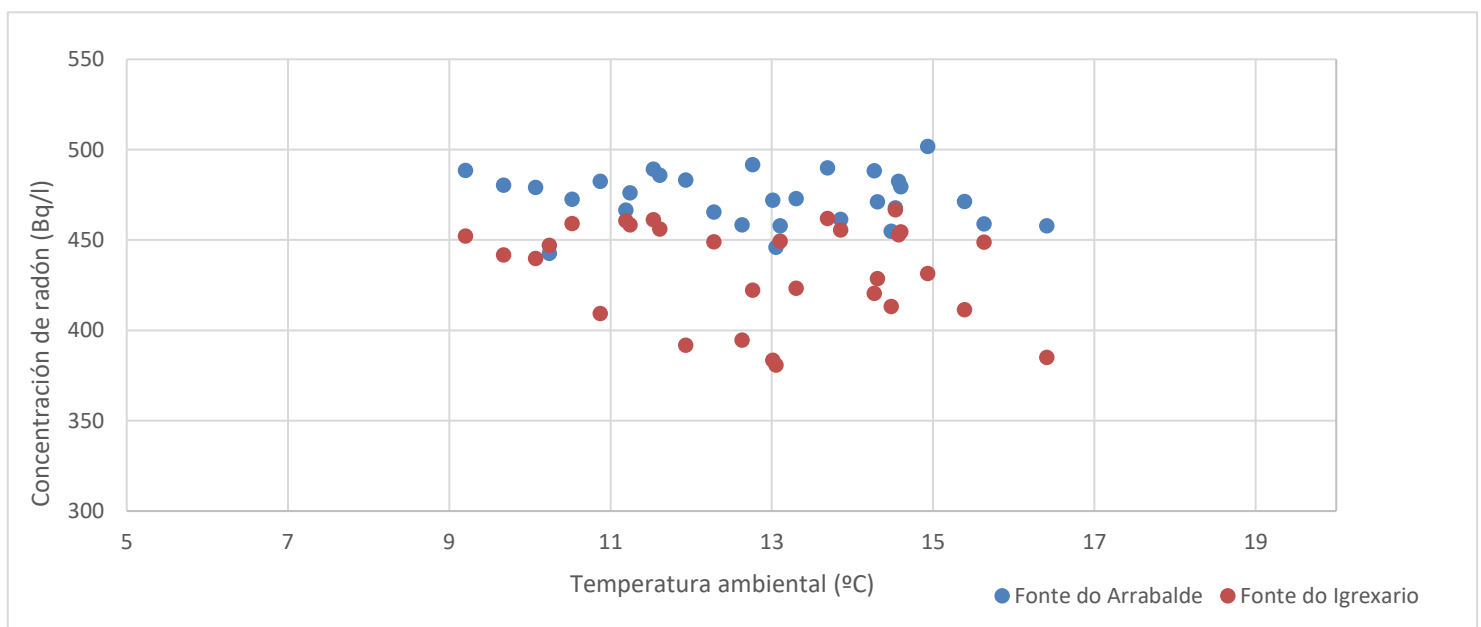


Figura 4-14 Concentración de radón-Temperatura ambiental (Elaboración propia)

En la Fonte do Arrabalde se observa una distribución térmica relativamente homogénea, con temperaturas del aire comprendidas principalmente entre 11 y 15 °C. A pesar de estas variaciones moderadas, las concentraciones de radón se mantienen de forma consistente en valores elevados, generalmente por encima de los 460 Bq/l, sin mostrar una tendencia clara en función de la temperatura.

Este patrón sugiere que, en esta fuente la temperatura ambiental no influye significativamente en la dinámica del radón disuelto, lo que podría estar relacionado con una captación más profunda o con un acuífero poco expuesto a las condiciones externas.

En contraste, la Fonte do Igrexario presenta una mayor variabilidad térmica, con registros que van desde los 10 hasta más de 21 °C. Sin embargo, esta amplitud no se traduce en un patrón claro respecto a las concentraciones de radón, que fluctúan entre 375 y 470 Bq/l sin una correlación aparente con la temperatura.

Esto indica que, al igual que en la Fonte do Arrabalde, la temperatura exterior tampoco condiciona significativamente el comportamiento del radón en esta fuente. La ausencia de una tendencia definida sugiere que otros factores podrían desempeñar un papel más relevante.

En conjunto, los resultados indican que no existe una relación directa entre la temperatura ambiental y la concentración de radón en agua para ninguna de las dos fuentes analizadas.

Presión atmosférica

El gráfico (Figura 4-15) compara los niveles de radón registrados en las muestras de agua con los valores de presión atmosférica medidos en el momento del muestreo. Se distinguen los datos correspondientes a la Fonte do Arrabalde (color azul) y la Fonte do Igrexario (color rojo).

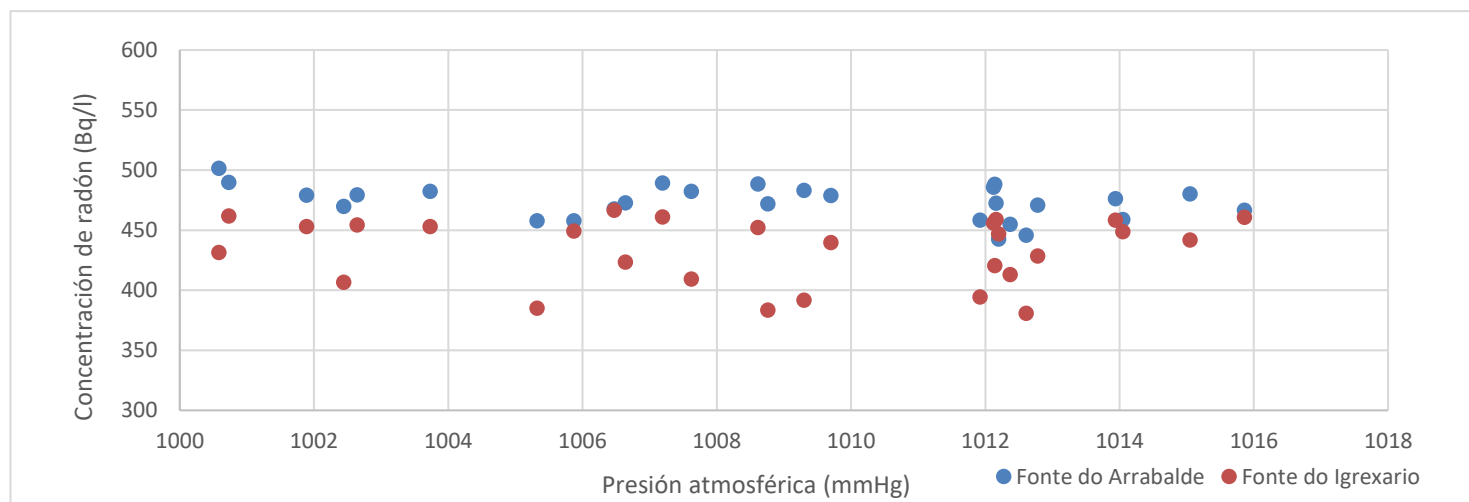


Figura 4-15 Concentración de radón-Presión atmosférica (Elaboración propia)

Los datos de esta fuente se agrupan principalmente en el intervalo de presión entre 1000 y 1016 mmHg, mostrando una ligera dispersión dentro de ese rango. Las concentraciones de radón, por su parte, se mantienen elevadas y relativamente estables, situándose en la mayoría de los casos por encima de los 460 Bq/l.

No se observa una correlación clara entre presión atmosférica y niveles de radón. Incluso en condiciones de presión relativamente baja (~998 mmHg), los valores de radón no presentan un descenso apreciable. Esta independencia relativa sugiere que, al menos en el corto plazo, la presión atmosférica no ejerce un efecto significativo sobre el equilibrio radón-agua en esta fuente, posiblemente debido a la configuración confinada o protegida del acuífero que la alimenta.

En el caso de esta fuente, los registros se distribuyen en un rango de presiones similar (aproximadamente 995 a 1016 mmHg), aunque con una concentración de radón algo más baja, generalmente entre 375 y 460 Bq/l. Al igual que en la Fonte do Arrabalde, no se aprecia una tendencia clara entre ambas variables: las concentraciones de radón permanecen variables tanto en condiciones de alta como de baja presión.

Sin embargo, en comparación con la otra fuente, aquí se percibe una ligera mayor dispersión de los datos, lo que podría estar relacionado con una mayor sensibilidad a las condiciones atmosféricas, derivada quizá de una menor profundidad o una mayor exposición del sistema acuífero.

En general, el análisis de los datos muestra que la presión atmosférica no presenta una relación aparente con la concentración de radón disuelto en ninguna de las dos fuentes analizadas. Este resultado es coherente con la naturaleza subterránea del radón, cuya presencia en el agua responde más a factores internos del terreno que a cambios de presión externa de corta duración.

Humedad relativa

Este gráfico (Figura 4-16) analiza la posible influencia de la humedad atmosférica sobre los niveles de radón disuelto, representando ambos parámetros para las dos fuentes estudiadas: Fonte do Arrabalde (azul) y Fonte do Igrexario (rojo).

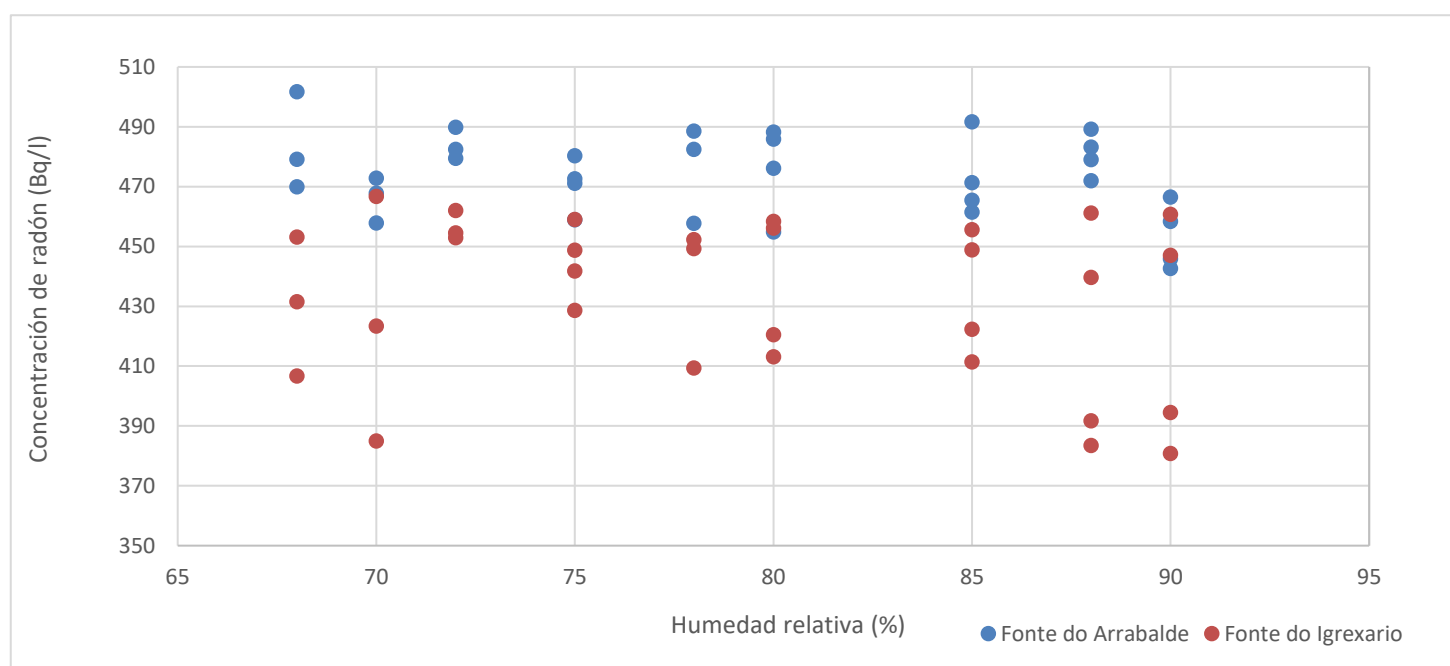


Figura 4-16 Concentración de radón-Humedad relativa (Elaboración propia)

Los registros de humedad se sitúan principalmente entre 68 % y 90 %, sin una tendencia clara en función de la concentración de radón. Los valores más altos de humedad coinciden tanto con concentraciones elevadas como moderadas de radón, que en todos los casos permanecen dentro del rango característico de esta fuente (460–500 Bq/l).

Este comportamiento sugiere que la humedad relativa del aire no ejerce un control directo sobre la presencia de radón en el agua subterránea. La estabilidad de los niveles de radón, incluso en condiciones atmosféricas muy húmedas, refuerza la hipótesis de que el radón disuelto en esta fuente procede de un sistema subterráneo poco afectado por las condiciones externas, posiblemente por su configuración más profunda o menos permeable.

Los valores de humedad en esta fuente también son altos, con la mayoría de los registros comprendidos entre 68 % y 90 %. A diferencia de la Fonte do Arrabalde, la concentración de radón aquí es más variable (375–470 Bq/l), pero no muestra una asociación visible con el porcentaje de humedad.

Aunque se aprecia una dispersión algo mayor, la distribución de los datos no sugiere una influencia significativa de la humedad relativa en la concentración de radón. Esto indica que, al igual que en la

fuelle anterior, este parámetro atmosférico no parece estar relacionado con los procesos de exhalación o disolución del gas en el sistema acuífero.

En ambas fuentes, según los datos obtenidos, no se obtiene una correlación entre humedad y concentración de radón.

Precipitaciones

Para el análisis de influencia de las precipitaciones en la concentración de radón se van a presentar tres gráficos en el que se presenten las precipitaciones acumuladas a partir de determinadas horas del día. En primer lugar, este diagrama (Figura 4-17) muestra la relación entre la concentración de radón en agua (Bq/L) y las precipitaciones acumuladas (mm) en el día de muestreo, desde las 00:00 hasta la hora de la toma de muestra para la Fonte do Arrabalde (puntos azules) y Fonte do Igrexario (puntos rojos).

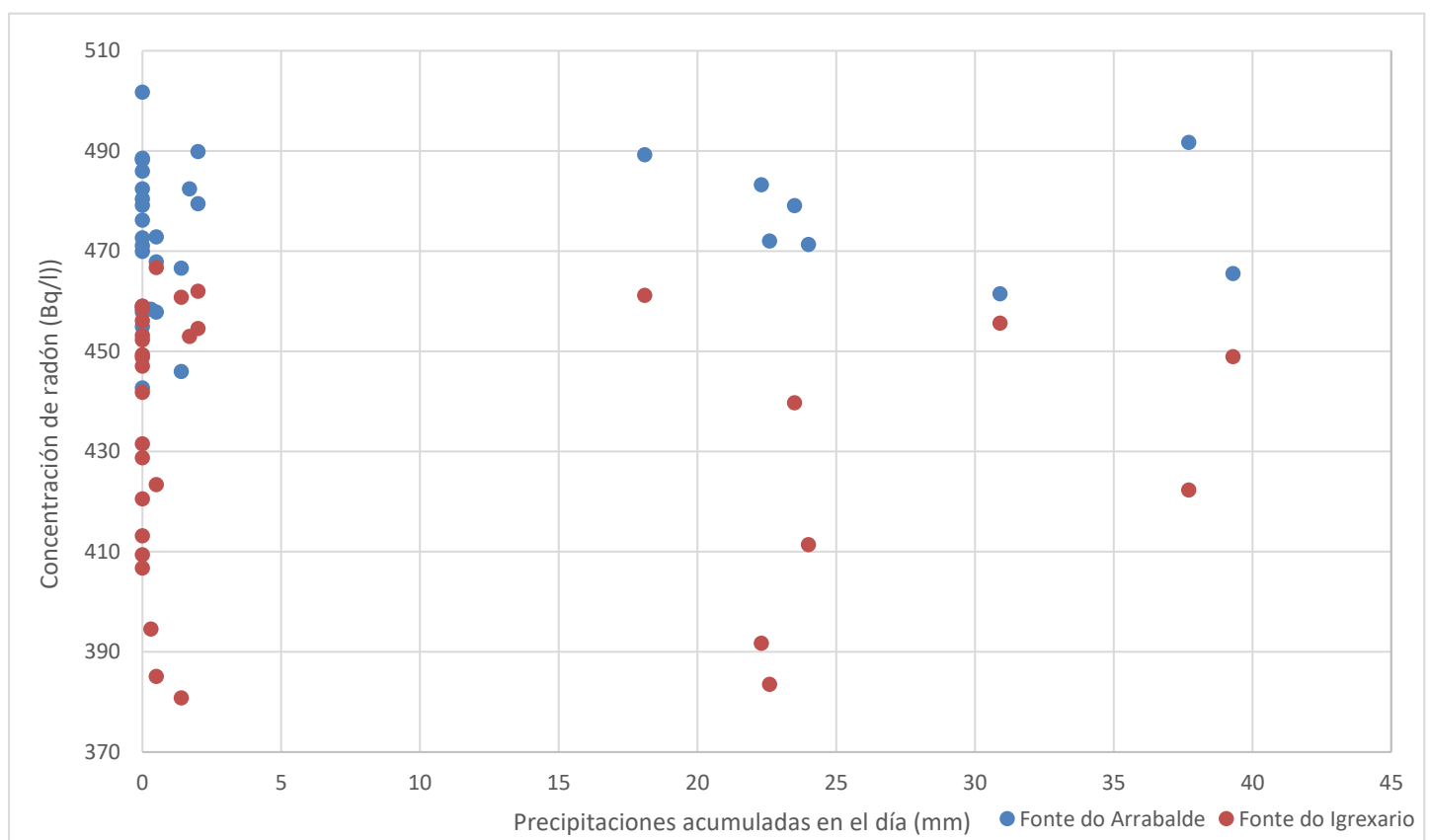


Figura 4-17 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas en el día (Elaboración propia)

Como observamos, en la Fonte do Arrabalde, se aprecia una tendencia positiva: las concentraciones más elevadas de radón (>470 Bq/L) tienden a coincidir con días en los que se han registrado precipitaciones abundantes, llegando en algunos casos a superar los 35 mm. Este comportamiento sugiere que el sistema acuífero responde a episodios de lluvia intensa, probablemente mediante mecanismos como la infiltración directa de agua superficial cargada de gases o la recarga rápida del acuífero desde capas superiores.

Por el contrario, en la Fonte do Igrexario, no se identifica una correlación entre la lluvia diaria y la concentración de radón. A pesar de que algunas muestras se obtuvieron tras precipitaciones importantes, los valores de radón se mantienen bajos o moderados (<450 Bq/L), con una dispersión notable que impide establecer una relación directa. Esto podría deberse a un mayor grado de confinamiento del

acuífero, a la ausencia de conectividad vertical o a un tiempo de residencia prolongado del agua que amortigua el efecto inmediato de las condiciones atmosféricas externas.

Este segundo gráfico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) restringe el análisis a las seis horas previas al momento exacto del muestreo, con el fin de explorar con mayor resolución temporal el posible efecto inmediato de las lluvias recientes sobre la concentración de radón.

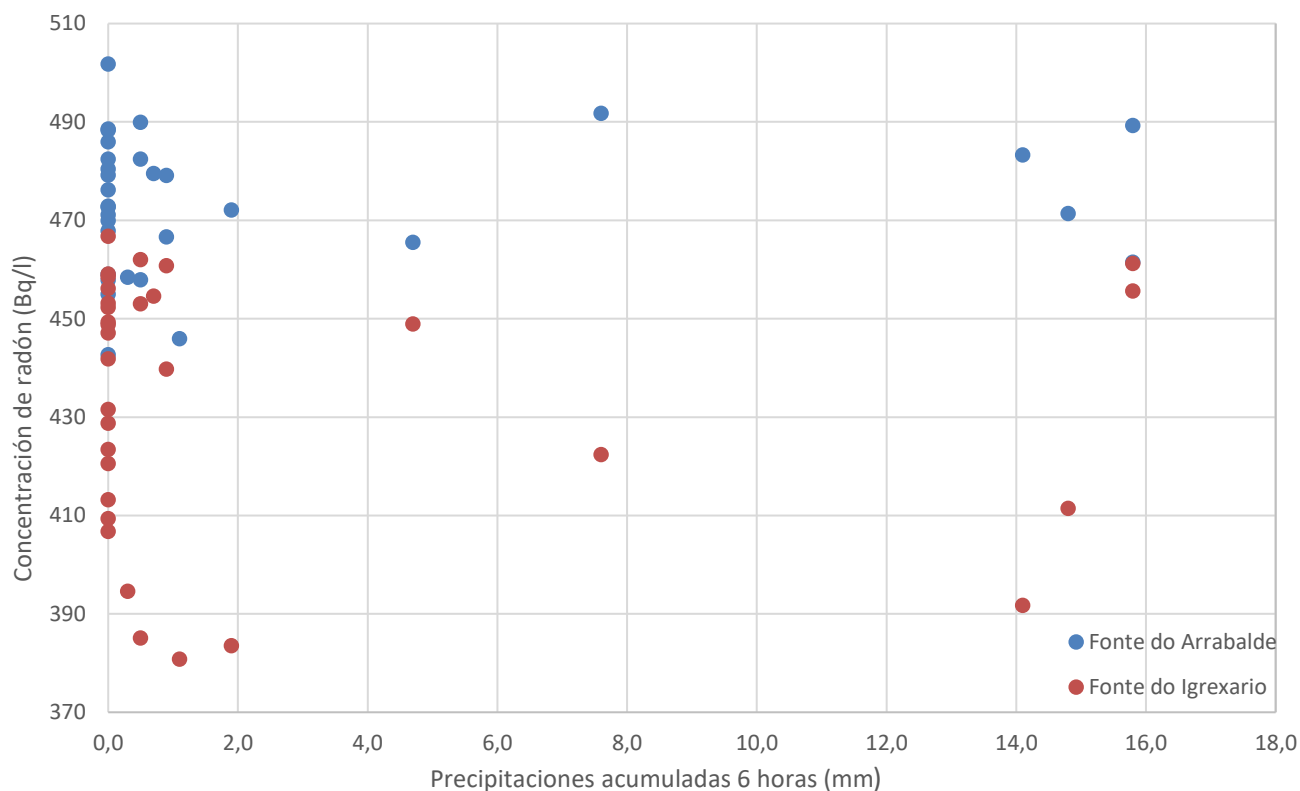


Figura 4-18 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas 6 horas (Elaboración propia)

En la Fonte do Arrabalde, este gráfico muestra una asociación entre radón y lluvia. Se aprecia una tendencia creciente relativamente nítida, ya que las mayores concentraciones de radón aparecen tras eventos de precipitación superiores a 14 mm en ese intervalo. Este patrón sugiere que el sistema hidrogeológico tiene una respuesta casi inmediata, facilitada por la entrada rápida de agua meteórica que, al interactuar con las zonas de emanación radiactiva del terreno, favorece la disolución y el transporte del gas.

En cambio, se observa que la Fonte do Igrexario mantiene su perfil de estabilidad. A pesar de algunas precipitaciones puntuales en el intervalo analizado, las concentraciones de radón no varían significativamente. Esto refuerza la hipótesis de que el sistema subyacente presenta alguna condición por la que las precipitaciones no influyen directamente.

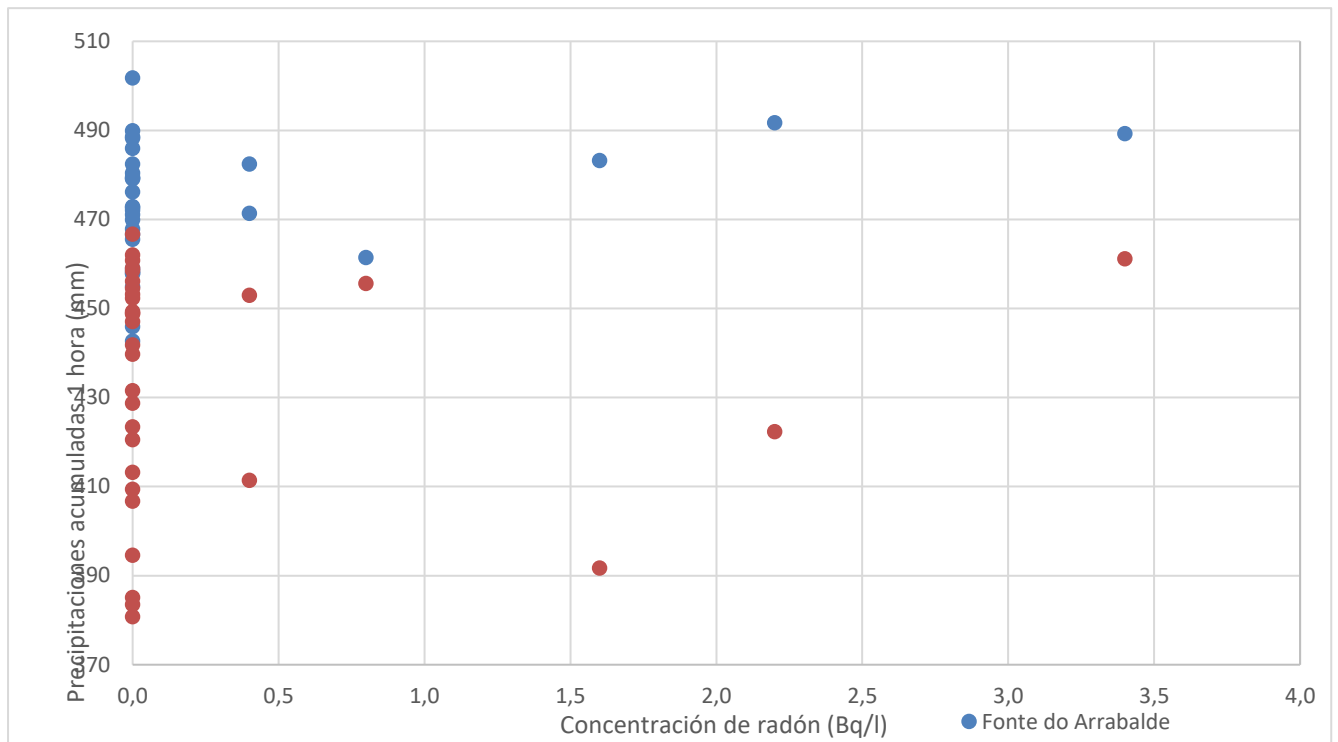


Figura 4-19 Concentración de radón-Precipitaciones acumuladas en la última hora (Elaboración propia)

En este último gráfico, (Figura 4-19), se representa la precipitación acumulada exclusivamente en la hora inmediatamente anterior al momento del muestreo, con el objetivo de determinar si existe una respuesta del sistema hidrogeológico al impacto meteorológico más inmediato.

Los resultados muestran una ausencia de correlación clara en ambas fuentes. En la Fonte do Arrabalde, aunque algunos valores elevados de radón coinciden con precipitaciones ligeras (1.5–3.5 mm), la mayoría de los valores altos se registran sin lluvia aparente en esa hora. Esto sugiere que la respuesta del sistema requiere un tiempo de retardo superior a una hora, probablemente debido al tiempo que necesita el agua para percolar desde la superficie hasta los niveles donde se produce la liberación de radón.

En la Fonte do Igrexario, como en los gráficos anteriores, no se detecta ninguna asociación significativa entre la lluvia y la concentración de radón. Los valores permanecen bajos o moderados, con independencia de si ha llovido en la última hora o no, confirmando el comportamiento hidrológico estable y menos reactivo de este sistema.

Este análisis indica que las precipitaciones en la hora previa no constituyen un parámetro útil para predecir variaciones en el radón disuelto, al menos en el contexto de las fuentes estudiadas.

4.4.3 Resultados otros parámetros

pH

Este gráfico de dispersión (Figura 4-20) examina la relación entre el pH del agua y la concentración de radón (Bq/l), distinguiendo los datos procedentes de la Fonte do Arrabalde (puntos azules) y la Fonte do Igrexario (puntos rojos).

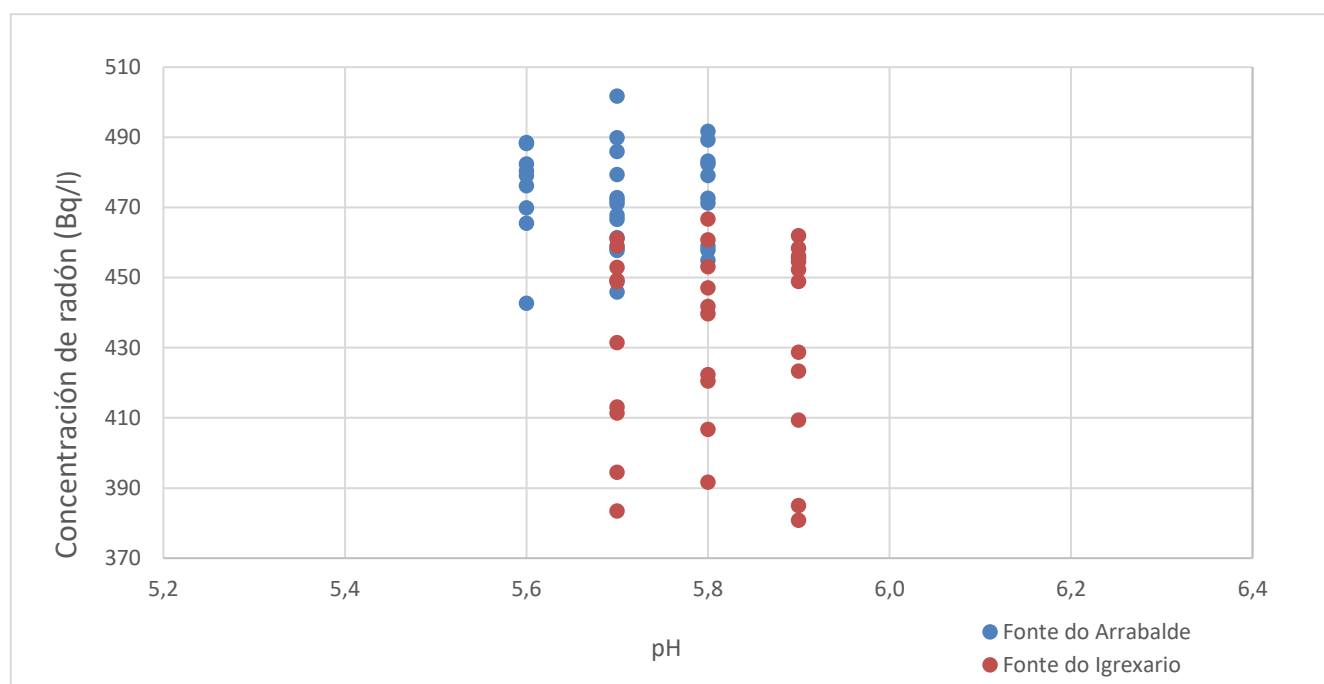


Figura 4-20 Concentración de radón-pH (Elaboración propia)

En esta fuente, los valores de pH se concentran principalmente entre 5,6 y 5,8, lo que indica un medio moderadamente ácido. Dentro de ese rango estrecho, las concentraciones de radón tienden a ser sistemáticamente elevadas, situándose entre 455 y 500 Bq/l.

Llama la atención que los valores más altos de radón se asocian con los pH más bajos del conjunto, en torno a 5,6, lo que sugiere una posible relación inversa entre acidez y concentración de radón. Esta tendencia es coherente con lo observado en otros estudios, donde un pH más ácido puede favorecer la liberación del radón desde la matriz rocosa al agua, debido a una mayor movilidad de los gases en entornos menos alcalinos.

La Fonte do Igrexario muestra valores de pH ligeramente más altos y dispersos, con registros que alcanzan los 5,9, lo que indica una acidez algo menor. En este caso, las concentraciones de radón son más variables (de 375 a 470 Bq/l), y no se aprecia una relación clara entre el pH y los niveles de radón.

Aunque se observa cierta agrupación de datos con pH altos y radón bajo, también hay casos con pH elevado y concentraciones intermedias, lo que sugiere que, en esta fuente, el pH no constituye un factor determinante en la dinámica del radón.

El comportamiento observado en la Fonte do Arrabalde sugiere que un pH más ácido podría favorecer la concentración de radón en agua, mientras que en la Fonte do Igrexario esta relación no es evidente.

Temperatura del agua

El gráfico (Figura 4-21) muestra cómo varía la concentración de radón disuelto en función de la temperatura del agua en ambas fuentes. Este parámetro es especialmente relevante, ya que la solubilidad del radón en agua disminuye con el aumento de la temperatura, según lo establece el coeficiente de Ostwald.

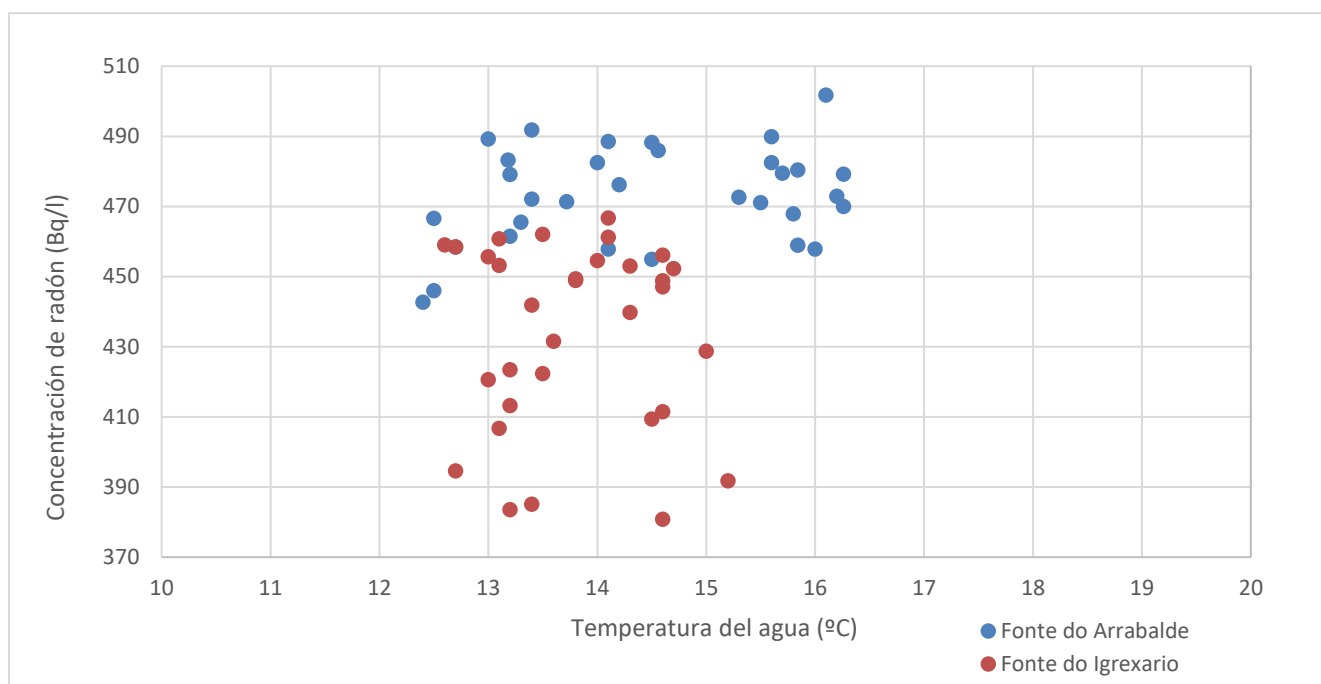


Figura 4-21 Concentración de radón-Temperatura del agua (Elaboración propia)

Los registros correspondientes a la Fonte do Arrabalde revelan una temperatura del agua mayoritariamente estable, situada entre 13 y 16,5 °C, con una ligera tendencia ascendente en paralelo a los niveles de radón. Las concentraciones de este gas se mantienen altas (entre 460 y 500 Bq/l), y tienden a encontrarse en el extremo superior del eje de temperatura.

Este comportamiento sugiere una ligera correlación positiva entre temperatura y radón en esta fuente. Una posible explicación es que las aguas más cálidas —potencialmente más profundas o con menor renovación superficial— favorezcan la acumulación de radón debido a un mayor tiempo de residencia o a la desgasificación menos eficiente en condiciones de confinamiento. Esta hipótesis coincide con la idea de que la Fonte do Arrabalde está conectada a un sistema más profundo o cerrado, donde las variaciones térmicas son suaves pero relevantes a largo plazo.

La Fonte do Igrexario presenta una mayor dispersión térmica, con valores de temperatura entre 12,8 y 15,5 °C, y una distribución más irregular de las concentraciones de radón (370–470 Bq/l). No se aprecia una relación clara entre temperatura y radón, y los puntos se dispersan en todo el intervalo sin una pendiente reconocible.

Esto refuerza la idea de que esta fuente está más expuesta a condiciones atmosféricas o conectada a un acuífero superficial, donde la temperatura puede fluctuar más y no estar relacionada con procesos de acumulación o liberación de radón de forma directa.

En la Fonte do Arrabalde se identifica una posible tendencia ascendente entre temperatura del agua y concentración de radón, mientras que en la Fonte do Igrexario dicha relación no es evidente. Esta diferencia podría reflejar distintas condiciones hidrogeológicas: un acuífero más estable y profundo en Arrabalde, frente a uno más superficial y dinámico en Igrexario. En conjunto, el patrón observado es coherente con una correlación positiva moderada, ya reflejada en la matriz de correlación calculada previamente.

Turbidez

Esta gráfica (Figura 4-22) analiza la posible vinculación entre el contenido de partículas en suspensión en el agua (expresado como turbidez en Unidades Nefelométricas de Turbidez) y los niveles de radón disuelto en ambas fuentes.

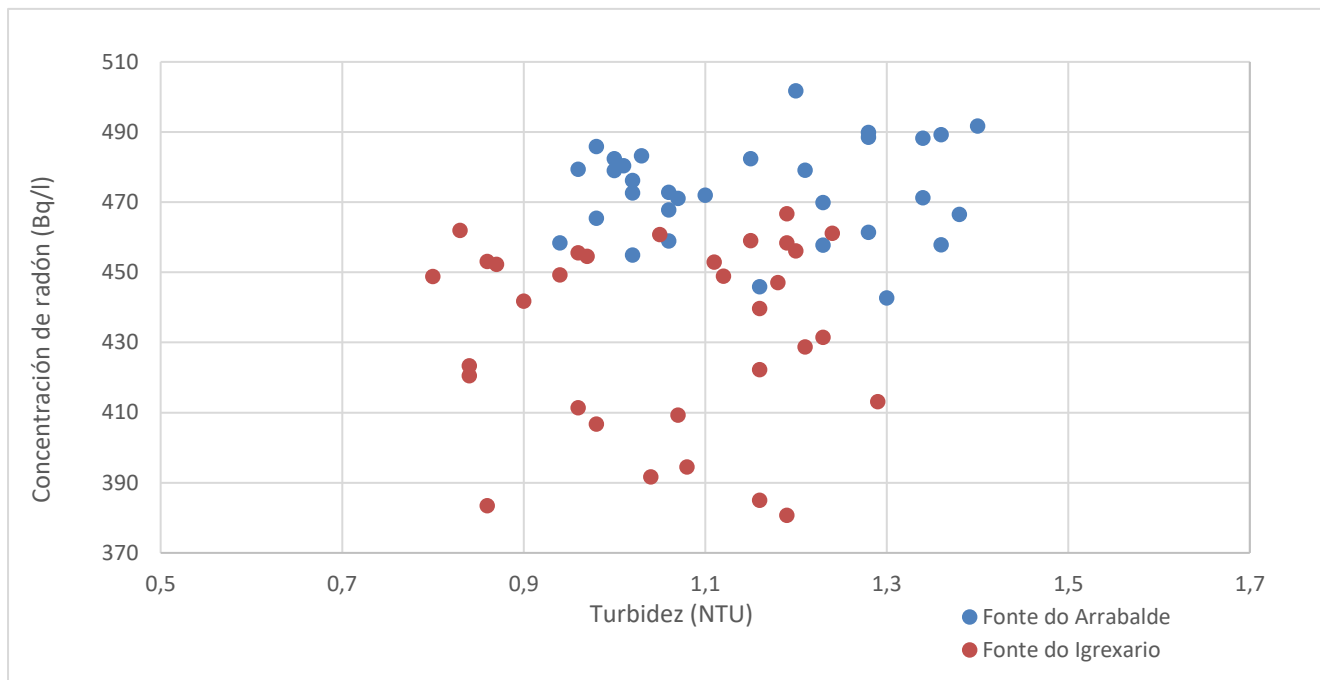


Figura 4-22 Concentración de radón-Turbidez (Elaboración propia)

La mayoría de los valores de turbidez registrados en la Fonte do Arrabalde (azul) oscilan entre 0,9 y 1,4 NTU, lo que indica una calidad del agua relativamente clara, con una carga moderada de sólidos finos. Aun así, se observa una tendencia creciente entre la turbidez y la concentración de radón: a medida que la turbidez se eleva, también lo hace el contenido de radón, con varios puntos que superan los 1,3 NTU coincidiendo con concentraciones superiores a 480 Bq/l.

Este patrón sugiere una posible asociación positiva entre ambas variables. Una explicación plausible es que una mayor turbidez podría reflejar un arrastre más intenso de materiales graníticos o arcillosos ricos en radio, que al descomponerse originan radón. Además, un mayor contenido en partículas puede dificultar la difusión del gas hacia la atmósfera, favoreciendo su retención en fase acuosa.

En la Fonte do Igrexario (rojo), los valores también se sitúan entre 0,85 y 1,3 NTU, pero su distribución es más uniforme, y no se observa una relación clara entre turbidez y concentración de radón. De hecho, se encuentran puntos con turbidez relativamente alta y baja concentración de radón, lo que sugiere que en este caso la presencia de sólidos en suspensión no guarda una relación directa con la cantidad de radón disuelto en esta fuente.

Este comportamiento puede deberse a una menor interacción entre el agua y los materiales radiactivos del subsuelo, o a una mayor ventilación del acuífero que facilite la desgasificación del radón independientemente del contenido particulado.

Mientras que en la Fonte do Arrabalde se observa una ligera correlación positiva entre turbidez y concentración de radón, probablemente vinculada a procesos de arrastre mineral o menor desgasificación, en la Fonte do Igrexario esta relación no se manifiesta. Estos resultados apuntan a diferencias en la estructura geológica, en la mineralogía de los sedimentos y en la dinámica hidráulica de cada fuente.

Concentración de fosfatos

El gráfico (Figura 4-23) examina la posible asociación entre el contenido de fosfatos en el agua expresado en mg/l y la concentración de radón disuelto, representando los datos de la Fonte do Arrabalde (azul) y la Fonte do Igrexario (rojo).

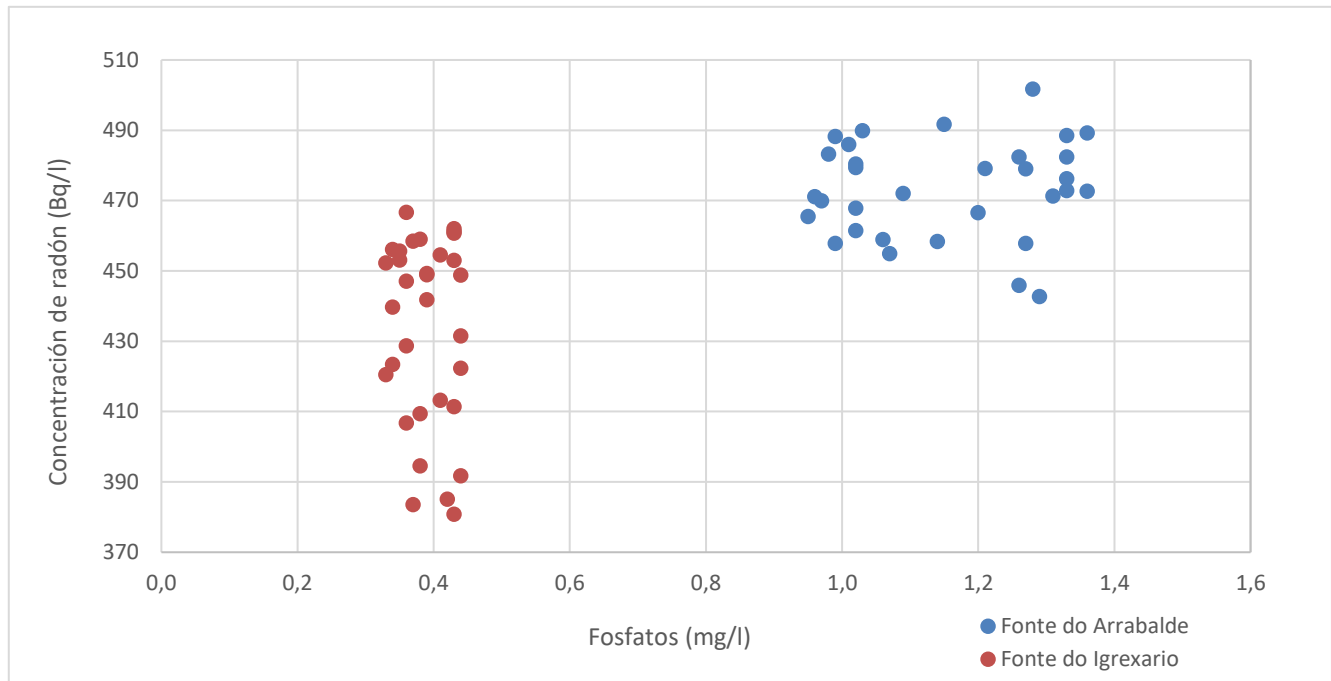


Figura 4-23 Concentración de radón-Fosfatos (Elaboración propia)

En primer lugar, en la Fonte do Arrabalde (azul), se observa una tendencia clara y bien definida: las concentraciones más altas de radón (superiores a 460 Bq/l) se corresponden con contenidos igualmente elevados de fosfatos, en el rango de 1,0 a 1,4 mg/l. Esta correlación positiva fue ya evidenciada en la matriz estadística previa, y aquí se confirma visualmente de forma muy consistente.

Una posible interpretación es que la fuente común de ambos elementos podría estar en el sustrato granítico o en la matriz mineral del acuífero, donde la descomposición de minerales fosfatados (como la apatita) libera simultáneamente fósforo y radionúclidos del uranio, que son precursores del radón. Además, condiciones de bajo intercambio superficial y alta mineralización podrían favorecer su acumulación conjunta en el agua.

En cambio, la Fonte do Igrexario (rojo) muestra una estabilidad marcada en los niveles de fosfatos, todos situados en torno a 0,35–0,45 mg/l, independientemente de la concentración de radón. Esto sugiere que, en esta fuente, no existe relación significativa entre ambas variables, probablemente porque la composición del acuífero es distinta o los procesos de arrastre están más influidos por la dinámica superficial que por la mineralogía profunda.

Estos resultados podrían estar relacionados con la granja de cultivos cercana a la Fonte do Arrabalde, que podría emplear regularmente ciertos fertilizantes que al filtrarse a las aguas subterráneas favorezcan a la acumulación de radón en esos acuíferos.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha permitido evaluar de forma detallada la concentración de radón disuelto en aguas subterráneas de la Península del Morrazo, aportando una visión integral de la interacción entre todos los factores.

A partir de la revisión de la literatura disponible, se llega a las siguientes conclusiones:

- 1) La revisión bibliográfica llevada a cabo confirma que la concentración de radón en agua subterránea está fuertemente condicionada por la litología del terreno, la estructura tectónica y los procesos de meteorización. En particular, las rocas graníticas y granodioritas biotíticas, debido a su elevado contenido en uranio y radio, representan los principales reservorios naturales capaces de liberar radón al agua.
- 2) Desde el punto de vista hidrogeológico, la profundidad y el tipo de acuífero juegan un papel clave, ya que los sistemas confinados o profundos tienden a acumular concentraciones más elevadas debido a su menor ventilación y mayor tiempo de residencia del agua.
- 3) Los factores fisicoquímicos, como el pH, la temperatura, la fuerza iónica y la presencia de sulfatos o fosfatos, también modulan la movilidad y disponibilidad de los precursores del radón, afectando indirectamente su concentración en el agua.
- 4) Los estudios revisados en regiones como Galicia, Hungría, Transilvania o la India demuestran que la presencia de radón es el resultado de una interacción compleja entre la geología, la dinámica hidrogeológica y la química del agua, lo que explica la gran variabilidad observada entre diferentes zonas.

En definitiva, la concentración de radón en agua no depende exclusivamente de la riqueza uranífera del sustrato, sino de la combinación de factores que controlan la liberación, transporte y retención del gas, confirmando la necesidad de un análisis integral y multidisciplinar para su correcta evaluación.

A través de los resultados experimentales, se llegan a las siguientes conclusiones:

- 1) Los resultados obtenidos muestran que las fuentes ubicadas sobre granito y granodiorita biotítico presentan las concentraciones más elevadas de radón, superando en varios casos los 300 Bq/L y alcanzando valores cercanos a 500 Bq/L. Este comportamiento puede atribuirse al alto contenido en uranio y radio presente en estas litologías, así como al grado de fracturación y meteorización, que facilitan la migración y liberación del gas hacia el acuífero.
- 2) Se ha observado una correlación positiva entre la concentración de radón y las precipitaciones acumuladas en las seis horas anteriores al muestreo, especialmente en la *Fonte do Arrabalde*, lo que indica una respuesta rápida del sistema hidrogeológico a la recarga superficial. Esta relación no se reproduce con igual claridad en precipitaciones más inmediatas (1 hora) o a escala diaria.
- 3) Los valores más altos de radón se han registrado en muestras con temperaturas más bajas, en línea con la Ley de Henry, que establece que la solubilidad del radón aumenta a menor temperatura. Este patrón ha sido especialmente evidente en las fuentes más sombreadas y menos expuestas a radiación solar directa.
- 4) En cuanto al pH, aunque no se ha observado una correlación estadística directa, las concentraciones más altas de radón tienden a aparecer en aguas ligeramente ácidas. Este comportamiento concuerda con lo descrito en estudios previos, que señalan que un pH bajo puede favorecer la liberación del radón desde la matriz rocosa al agua.

- 5) Para la medición de fosfatos, aunque se halló una correlación positiva en la Fonte do Arrabalde, no es determinante. Se plantea que los fosfatos pueden modular la movilidad del uranio, y por tanto influir en la generación de radón, especialmente bajo ciertas condiciones geoquímicas.
- 6) En algunas muestras, se ha observado un incremento de la turbidez coincidiendo con concentraciones más elevadas de radón. Esto sugiere que, tras eventos de precipitación o movimientos del acuífero, puede producirse un arrastre de partículas finas ricas en radionucleidos.
- 7) No se ha establecido una relación consistente entre el caudal de la fuente y el radón disuelto. Sin embargo, ciertos picos coinciden con mayores niveles de radón, lo que puede reflejar un aumento del flujo desde zonas más profundas o con mayor carga radiológica.
- 8) Factores como la presión atmosférica, humedad y temperatura ambiental no han mostrado una correlación significativa con los niveles de radón en las condiciones observadas, aunque podrían influir indirectamente en procesos como la emanación desde el subsuelo o la tasa de intercambio gas-líquido.
- 9) En comparación con el TFG de Sánchez Ferragut, se aprecia un aumento en la mayoría de las fuentes analizadas nuevamente, aunque se mantiene la jerarquía entre fuentes, las que tenían concentraciones más altas, siguen teniéndolas.
- 10) Desde un punto de vista geológico, no se encuentra una relación entre el tipo de suelo y la concentración de radón, aunque se requiere ampliar la información geológica del transcurso subterráneo de esta agua, ya que el suelo del que se dispone la información es el de salida de agua de las fuentes.

Como conclusión general, se puede decir que este trabajo contribuye a mejorar el conocimiento sobre la distribución y los factores de control del radón en aguas subterráneas gallegas, proporcionando una base técnica para futuras investigaciones y medidas de gestión sanitaria y ambiental en la región.

5.2 Líneas futuras

El trabajo realizado abre múltiples vías de desarrollo científico y técnico que podrían profundizar en la comprensión del radón en aguas subterráneas:

- 1) Estudios multianuales y estacionales: Es recomendable ampliar la serie temporal de datos para observar variaciones a lo largo de todo el año, especialmente en estaciones húmedas y secas, con el fin de identificar tendencias estacionales y efectos acumulativos.
- 2) Llevar a cabo un análisis geoquímico detallado del acuífero que incluya una caracterización mineralógica y geoquímica de los materiales del subsuelo (con especial atención a la presencia de apatita y minerales fosfatados) permitiría comprender mejor la relación entre fosfatos, uranio y radón.
- 3) Ampliación del estudio a otras regiones de Galicia: Sería conveniente replicar la metodología en otras comarcas gallegas con alto riesgo radiactivo natural (como Ourense o Lugo), para establecer un mapa regional del riesgo y diseñar estrategias específicas de mitigación.
- 4) Sería importante seguir investigando cómo factores antrópicos como fertilizantes (ricos en fosfatos) pueden estar alterando el ciclo natural del radón, mediante procesos de movilización de uranio en acuíferos superficiales, ampliando la información sobre la interacción entre la contaminación química y la radiactividad natural.
- 5) Evaluación del riesgo sanitario: Se sugiere desarrollar estudios que integren la exposición por ingesta e inhalación de radón procedente del agua, para establecer modelos de riesgo más precisos para la población, sobre todo teniendo en cuenta que, tal y como se ha concluido, las concentraciones de radón en fuentes analizadas anteriormente parecen tener una tendencia ascendente.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano».
- [2] H. Zeeb, F. Shannoun, y World Health Organization, «WHO handbook on indoor radon: a public health perspective», 2009, Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://iris.who.int/handle/10665/44149>
- [3] L. S. Quindos, P. L. Fernandez, y J. Soto, «Study of areas of Spain with high indoor radon», *Radiat. Meas.*, vol. 24, n.º 2, pp. 207-210, abr. 1995, doi: 10.1016/1350-4487(94)00108-D.
- [4] J. N. S.-F. Guitart, A. G. Gil, y S. U. Madriñán, «Determinación de la concentración de radón en aguas de consumo».
- [5] «Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.».
- [6] J. S. P. Ibánhez, X. A. Álvarez-Salgado, y C. Rocha, «Radon prevalence in domestic water in the Ría de Vigo coastal basin (NW Iberian Peninsula)», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 27, pp. 69927-69940, jun. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27305-6.
- [7] J. J. Llerena, D. Cortina, I. Durán, y R. Sorribas, «Impact of the geological substrate on the radiological content of Galician waters», *J. Environ. Radioact.*, vol. 116, pp. 48-53, feb. 2013, doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.08.014.
- [8] V. Moreno, J. Bach, C. Baixeras, y L. Font, «Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain», *J. Environ. Radioact.*, vol. 128, pp. 1-8, feb. 2014, doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.10.021.
- [9] C. Cosma, M. Moldovan, T. Dicu, y T. Kovacs, «Radon in water from Transylvania (Romania)», *Radiat. Meas.*, vol. 43, n.º 8, pp. 1423-1428, sep. 2008, doi: 10.1016/j.radmeas.2008.05.001.
- [10] D. C. Nita, M. Moldovan, T. Sferle, V. D. Ona, y B. D. Burghel, «RADON CONCENTRATIONS IN WATER AND INDOOR AIR IN NORTH - WEST REGIONS OF ROMANIA».
- [11] M. Moldovan, D. C. Nita, A. Cucos-Dinu, T. Dicu, N. Bican-Brisan, y C. Cosma, «Radon concentration in drinking water and supplementary exposure in Baita-Stei mining area, Bihor county (Romania)», *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 158, n.º 4, pp. 447-452, mar. 2014, doi: 10.1093/rpd/nct258.
- [12] H. Surbeck, «Dissolved gases as natural tracers in karst hydrogeology; radon and beyond».
- [13] T. A. Przylibski, S. Staško, y E. Domin, «Radon groundwater in a radon-prone area: possible uses and problems: an example from SW part of Kłodzko Valley, Sudetes, SW Poland», *Environ. Geochem. Health*, vol. 44, n.º 12, pp. 4539-4555, dic. 2022, doi: 10.1007/s10653-022-01212-0.
- [14] M. M. Isam Salih, *Radon in natural waters: analytical methods, correlation to environmental parameters, radiation dose estimation, and GIS applications*. Linköping: Division of radiation physics, Department of medicine and care, Faculty of health sciences, Linköping University, 2003.
- [15] M. Erdogan, N. Eren, S. Demirel, y V. Zedef, «Determination of radon concentration levels in well water in Konya, Turkey», *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 156, n.º 4, pp. 489-494, oct. 2013, doi: 10.1093/rpd/nct099.
- [16] I. Yigitoglu, F. Oner, H. A. Yalim, A. Akkurt, A. Okur, y A. Ozkan, «Radon concentrations in water in the region of Tokat city in Turkey», *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 142, n.º 2-4, pp. 358-362, dic. 2010, doi: 10.1093/rpd/ncq191.
- [17] R. W. Qadir, N. Asaad, K. W. Qadir, S. T. Ahmad, y hewa y Abdullah, «Relationship between radon concentration and physicochemical parameters in groundwater of Erbil city, Iraq», *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 1, pp. 61-69, dic. 2021, doi: 10.1080/16878507.2020.1856588.
- [18] G. M. Shilpa, B. N. Anandaram, y T. L. Mohankumari, «Measurement of ²²²Rn concentration in drinking water in the environs of Thirthahalli taluk, Karnataka, India», *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 3, pp. 262-268, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jrras.2017.05.007.

- [19] «International Journal of Advanced Scientific and Technical Research Issue 4 volume 2, March-April 2014 Available online on <http://www.rpublication.com/ijst/index.html> ISSN 2249-9954», vol. 2, n.º 4, 2014.
- [20] H. K. Shu'aibu, M. U. Khandaker, A. Baballe, S. Tata, y M. A. Adamu, «Determination of radon concentration in groundwater of Gadau, Bauchi State, Nigeria and estimation of effective dose», *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 178, p. 108934, ene. 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.108934.
- [21] E. H. El-Araby, H. A. Soliman, y M. Abo-Elmagd, «Measurement of radon levels in water and the associated health hazards in Jazan, Saudi Arabia», *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 1, pp. 31-36, ene. 2019, doi: 10.1080/16878507.2019.1594134.
- [22] J. A. Sambache Lisintuña, «Análisis de la presencia de radón “Rn- 222” disuelto en las aguas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa», bachelorThesis, Quito: Universidad de las Américas, 2019, 2019. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/10893>
- [23] E. V. Arenas Herrera, «Evaluación de la concentración de radón en aguas subterráneas de los geiser y baños termales de la ciudad de Arequipa y Coalaque - Moquegua», 2023, Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12773/16591>
- [24] M. Inácio, S. Soares, y P. Almeida, «Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã's county, Portugal», *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 2, pp. 135-139, abr. 2017, doi: 10.1016/j.jrras.2017.02.002.
- [25] Z. Szabo, V. T. dePaul, J. M. Fischer, T. F. Kraemer, y E. Jacobsen, «Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States», *Appl. Geochem.*, vol. 27, n.º 3, pp. 729-752, mar. 2012, doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.11.002.
- [26] M. de J. Díaz, L. G. Gil, y J. F. Conde, «Análisis de las propiedades de rocas graníticas y la relación con la emanación de gas radón».
- [27] «Natural_Radiation_in_the_Rocks_Soils_and_Groundwat».
- [28] «Daniel Rabago Gomez.pdf». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3105/Daniel%20Rabago%20Gomez.pdf;sequence=1>
- [29] M. Fuente Lastra, «Puesta a punto de un sistema de medida de radón en agua aplicado al estudio de acuíferos», *Set up of a radon in water measurement system applied to aquifers' study*, jul. 2015, Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/7113>
- [30] V. S. Mehta, F. Maillot, Z. Wang, J. G. Catalano, y D. E. Giammar, «Transport of U(VI) through sediments amended with phosphate to induce in situ uranium immobilization», *Water Res.*, vol. 69, pp. 307-317, feb. 2015, doi: 10.1016/j.watres.2014.11.044.
- [31] F. D. Tillman, K. R. Beisner, J. R. Anderson, y J. A. Unema, «An assessment of uranium in groundwater in the Grand Canyon region», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, p. 22157, nov. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-01621-8.
- [32] Q. Yang *et al.*, «Uranium and Radon in Private Bedrock Well Water in Maine: Geospatial Analysis at Two Scales», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, n.º 8, pp. 4298-4306, abr. 2014, doi: 10.1021/es405020k.
- [33] Y. A. G. Romero, «Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación».
- [34] «Fontes de Marín – Todas as fontes do Concello de Marín». Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fontesdemarin.com/>
- [35] «man-rtm1688-2-en».
- [36] «AN-003_RadonInWater_EN_17-01-24».
- [37] «Tester de pH con electrodo renovable». Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hannainst.es/parametros/5379-tester-de-ph-con-electrodo-renovable.html#/452-resolucion-0_1

- [38] «Fotómetro multiparamétrico sobremesa con DQO y pHmetro (230V)». Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hannainst.es/parametros/4412-fotometro-multiparametrico-sobremesa-con-dqo-y-phmetro-230v.html>
- [39] «TURBIDIMETRO X5 - baezaonline.com». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.baezaonline.com/detalle/-/producto/turbidimetro-x5/91199>
- [40] «Magna50_185.pdf». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d1_G50/Magna50_185.pdf
- [41] «Magna50_223.pdf». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d2_G50/Magna50_223.pdf
- [42] MeteoGalicia, «Histórico de red meteorológica», MeteoGalicia. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.meteogalicia.gal/web/home>
- [43] «ds-rtm1688_2-es.pdf». Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sarad.de/cms/media/docs/datenblatt/ds-rtm1688_2-es.pdf

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Los elevados niveles de radón disueltos en agua de diversos manantiales en la Península de Morrazo plantean varias cuestiones importantes a nivel social, económico y ambiental, ya que es una problemática tanto como para la ciudadanía, la administración pública y el medio ambiente.

Desde un contexto social, la población, generalmente poco informada sobre este tipo de contaminantes naturales, puede estar expuesta a dosis de radiación sin ser consciente de ello. Por tanto, este estudio contribuye a aumentar la concienciación ciudadana, fomenta el derecho a una información veraz y promueve el acceso a agua segura como un derecho fundamental.

Además, la identificación de fuentes con concentraciones superiores a los límites recomendados por las autoridades sanitarias permite establecer prioridades de actuación, beneficiando directamente a las comunidades locales y garantizando la protección de grupos vulnerables, como niños o personas con patologías respiratorias.

A nivel económico, la detección de niveles elevados de radón en determinadas fuentes de agua puede requerir la implementación de medidas correctoras, como sistemas de aireación o filtrado, lo cual conlleva costes tanto para administraciones públicas como para explotaciones privadas. Sin embargo, estas inversiones deben entenderse como necesarias en un enfoque de prevención, ya que a medio y largo plazo suponen una reducción de los costes sanitarios asociados a enfermedades potencialmente derivadas de exposiciones prolongadas.

Desde un punto de vista ambiental, el estudio del radón en aguas subterráneas está estrechamente vinculado al conocimiento de la geología local, los acuíferos y los procesos hidrogeológicos. Promueve un enfoque de gestión sostenible del recurso hídrico, al considerar la calidad radiológica como un componente esencial de la evaluación ambiental del agua.

Además, permite comprender cómo la contaminación natural puede interactuar con otros procesos (químicos, meteorológicos, antropogénicos), lo que resulta clave para la planificación territorial, el diseño de infraestructuras hidráulicas y la protección de los ecosistemas asociados al ciclo hidrológico.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaco, y su presencia en el agua de consumo (especialmente en zonas rurales o montañosas, donde muchas viviendas se abastecen de pozos o manantiales) puede representar un riesgo silencioso, desconocido para la población.

La ética científica exige que se identifiquen estos peligros y que se comuniquen con responsabilidad, sin alarmismo, pero con transparencia. Todo ciudadano tiene derecho a saber si el agua que consume supera los umbrales recomendados de radiación natural, así como a recibir orientación sobre las posibles soluciones.

Este estudio pone de manifiesto una realidad poco conocida: la presencia de radón en agua no afecta por igual a toda la población, sino que tiende a concentrarse en zonas con características geológicas específicas, como es el caso de Galicia. Muchas de estas zonas coinciden con áreas rurales o menos atendidas por sistemas de control automatizado de calidad del agua.

Desde una perspectiva ética, esto plantea una cuestión de equidad ambiental: todos los ciudadanos, independientemente de su lugar de residencia o situación socioeconómica, tienen derecho a consumir agua segura. Por ello, este trabajo también puede considerarse una llamada de atención sobre la necesidad de reforzar la vigilancia ambiental y sanitaria en aquellos territorios más expuestos a riesgos naturales invisibles.

Es de vital importancia que la administración pública, tanto a nivel regional como nacional, tome medidas que garanticen la equidad territorial y la justicia ambiental, fomentando estrategias de mitigación o llevando a cabo campañas informativas para que los españoles y, más en concreto la ciudadanía gallega tengan un acceso al agua que no implique perjuicios para su integridad física.

ANEXO III: CARACTERÍSTICAS RTM-1668

En este Anexo se detallan tanto las características técnicas como los principios físicos y matemáticos del aparato empleado para medir la concentración de radón durante la fase experimental, el RTM 1668-2, de la marca SARAD.

Características del monitor

El monitor RTM 1688-2 es un instrumento de medición diseñado para proporcionar datos precisos y fiables sobre las concentraciones de radón y torón en distintos entornos y medios. Uno de los aspectos más destacados del dispositivo es su amplio rango operativo, que permite detectar concentraciones de radón desde 1 Bq/m³ hasta 10 MBq/m³. Esta capacidad le confiere versatilidad para ser empleado tanto en entornos con niveles bajos de radiactividad, como en escenarios donde los niveles pueden ser significativamente elevados, por ejemplo, en minas, en suelos ricos en uranio o en edificaciones situadas sobre formaciones geológicas favorables al exhalado de radón [33].

El volumen interno de la cámara de medición y del circuito de aire es de aproximadamente 250 mililitros. Este volumen relativamente reducido permite al equipo alcanzar con rapidez el equilibrio entre las concentraciones de radón y torón en la muestra y el volumen de aire dentro del sistema, facilitando así mediciones con tiempos de respuesta cortos. Dicho volumen también permite realizar análisis de muestras de aire procedentes de volúmenes pequeños, una característica útil para aplicaciones específicas en investigación o monitoreo en zonas limitadas.

El sistema de detección del RTM 1688-2 se basa en la espectroscopía alfa. Para ello, incorpora un conjunto de detectores semiconductores (4 x 200 mm² Si-detector con cámaras de alto voltaje), los cuales permiten registrar los productos de desintegración de vida corta del radón y del torón. Este diseño posibilita la discriminación precisa entre los picos alfa correspondientes a los distintos elementos, lo cual es fundamental para la separación efectiva de los isótopos medidos y, por ende, para la obtención de datos confiables sobre la concentración específica de cada gas radiactivo.

El RTM 1688-2 dispone de dos modos operativos principales en cuanto al procesamiento de la señal: el modo rápido (fast) y el modo lento (slow). En el modo rápido, el instrumento calcula la concentración de radón considerando únicamente los decaimientos del polonio-218 (218Po), que presenta una vida media de 3.05 minutos. Esto permite obtener resultados con un tiempo de respuesta mínimo de 15 minutos, adecuado para situaciones donde se requiere un monitoreo ágil de las variaciones en la concentración. En cambio, el modo lento incorpora tanto los decaimientos de 218Po como los de polonio-214 (214Po), aumentando la sensibilidad y reduciendo el error estadístico de la medición, aunque extendiendo el tiempo de respuesta hasta aproximadamente 120 minutos. La elección entre uno u otro modo dependerá de los requisitos específicos del estudio y de las necesidades de precisión y temporalidad.

Uno de los componentes esenciales del sistema es la bomba de diafragma incorporada, que asegura un caudal constante de 0.3 litros por minuto. Este caudal puede configurarse para operar de manera continua o por intervalos, dependiendo del modo seleccionado y de la estrategia de ahorro energético deseada. La operación continua es ideal para monitoreos prolongados donde se requiere un flujo constante de aire a través del sistema, mientras que el modo por intervalos permite optimizar el consumo de la batería en aplicaciones donde los cambios en la concentración no son tan rápidos o donde la autonomía energética es prioritaria.

En términos de autonomía, el RTM 1688-2 es alimentado por una batería recargable interna con capacidad para más de 150 horas de funcionamiento continuo, y más de 10 días cuando se utiliza el modo de bomba por intervalos. Esta autonomía, sumada a la posibilidad de recarga mediante un adaptador AC/DC estándar (100-240V, 50/60Hz), convierte al instrumento en una opción viable para

operaciones tanto en laboratorio como en campo. El tiempo de recarga de la batería es de aproximadamente 8 horas.[38]

El equipo está diseñado para operar en un rango ambiental amplio, soportando temperaturas entre 0 °C y 40 °C, humedades relativas de hasta 95% sin condensación, y presiones barométricas comprendidas entre 800 y 1100 hPa. Estas condiciones lo hacen adecuado para ser utilizado en entornos interiores y exteriores sin que las variables ambientales afecten significativamente la estabilidad de las mediciones. Además, uno de los aspectos que diferencia al RTM 1688-2 de otros instrumentos similares es que las fluctuaciones de humedad relativa no impactan en sus lecturas, eliminando la necesidad de utilizar desecantes adicionales.

En cuanto a la capacidad de almacenamiento de datos, el monitor incorpora una memoria no volátil con capacidad para almacenar hasta 2047 registros, funcionando bajo una arquitectura circular. Esto significa que los registros más antiguos se sobrescriben cuando la memoria alcanza su límite, permitiendo así un uso continuo sin riesgo de interrupciones por falta de espacio de almacenamiento. Cada registro guarda no solo el valor de concentración calculado, sino también el espectro alfa completo y las lecturas de los sensores auxiliares, como temperatura, presión y humedad, así como un sello temporal para cada intervalo de integración.

La interfaz de usuario del RTM 1688-2 ha sido diseñada para ofrecer una operación sencilla e intuitiva. Cuenta con una pantalla retroiluminada de tres líneas y dieciséis caracteres, junto con un sistema de control mediante dos botones principales. Esta configuración permite configurar parámetros operativos como el intervalo de muestreo, el modo de bombeo, los umbrales de alarma y la activación del modo sniffing. La interfaz también facilita la visualización de los valores actuales de radón y torón, la lectura de los sensores internos y el estado general del instrumento.

La conectividad del dispositivo se logra mediante interfaces USB, RS232 y RS485, con soporte para protocolos como MODBUS RTU y ASCII para impresión directa. Esto posibilita la integración del RTM 1688-2 en redes de monitoreo más amplias o su conexión directa a ordenadores y sistemas de adquisición remotos. La descarga y análisis de los datos se realiza mediante el software Radon Vision, que además de la transferencia de datos permite configurar parámetros operativos, realizar análisis gráficos y emitir informes detallados.

Otra característica destacada es la incorporación de sensores auxiliares internos, entre los cuales se incluyen un sensor de temperatura, un sensor de humedad relativa, un sensor de presión barométrica y un detector de inclinación. Este último es particularmente importante en aplicaciones donde se requiere asegurar que el dispositivo no haya sido manipulado o desplazado durante el período de medición. Si el monitor detecta un movimiento mayor a 8 segundos, se registra un evento que permite advertir sobre posibles alteraciones en la fiabilidad de la medición.

Por último, el RTM 1688-2 cuenta con un sistema de alarma configurable. El usuario puede establecer un umbral específico de concentración de radón, tras el cual se activa un zumbador interno para advertir sobre la superación del valor crítico. Esta función es especialmente útil en entornos donde la seguridad radiológica requiere atención inmediata ante concentraciones elevadas.

Principios físicos y matemáticos

El radón (^{222}Rn) se disuelve naturalmente en el agua subterránea debido a la interacción entre el agua y las rocas que contienen uranio. Dado que el radón es un gas noble, no reacciona químicamente con el agua, pero sí puede disolverse físicamente, generando concentraciones que, en determinados contextos geológicos, pueden superar los límites establecidos por normativas sanitarias.

La metodología empleada por el RTM 1688-2 para medir radón en agua se basa en la transferencia de este gas desde la fase líquida a la fase gaseosa mediante un proceso controlado de burbujeo. Este

procedimiento se ejecuta dentro de un sistema cerrado, compuesto por un frasco burbujeador que contiene la muestra de agua y que está conectado al monitor mediante un circuito de aire hermético. La bomba incorporada en el equipo hace circular aire a través del frasco, facilitando la liberación del radón disuelto hacia la fase gaseosa [39].

El principio físico que rige esta transferencia es el equilibrio de solubilidad entre el radón presente en el agua y el radón en el aire, descrito por el coeficiente de Oswald. Dicho coeficiente expresa la relación entre las concentraciones de radón en las dos fases (agua y aire) a una temperatura determinada. Su formulación es la siguiente:

$$K_{Oswald} = \frac{C_{Rn\ agua}}{C_{Rn\ aire}} = 0,425 \times e^{-0,05T} + 0,1$$

donde T representa la temperatura de la muestra en grados Celsius.

Una vez que se alcanza el equilibrio, que generalmente requiere alrededor de 25 minutos de circulación, la concentración de radón en la fase gaseosa puede medirse directamente con el detector del RTM 1688-2. Conocida la concentración en aire, la concentración inicial en agua se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$C_{Rn\ agua} = \frac{C_{Rn\ aire} \times (K_{Oswald} \times V_{agua} + V_{aire})}{V_{agua}}$$

En esta ecuación, V_{agua} y V_{aire} corresponden al volumen de la muestra de agua y al volumen total de aire en el sistema cerrado, respectivamente. Cuanto mayor sea el volumen de agua comparado con el volumen de aire, mayor será la concentración de radón transferido al aire, optimizando así la sensibilidad de la medición.