

**(08-015) - Design of a radon transfer system for the experimental study of simulated scenarios in the presence of water and air.**

Trull Hernandis, Cristina <sup>1</sup>; Noverques Medina, Aina <sup>1</sup>; Juste Vidal, Belén <sup>1</sup>; Sancho Fernández, María <sup>1</sup>; Verdú Martín, Gumersindo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISIRYM, Universitat Politècnica de València

Radon is a natural radioactive gas which exposition is identified as the second reason of lung cancer deaths worldwide. It can be found in the soil and rocks and tends to accumulate in enclosed areas. There are environments, as spas, spring waters and caves, where radon gas is present dissolved in the water and in the air phase. Due to the health risks associated with radon exposure, it is necessary to characterize the radon levels of these scenarios and study if any parameters can influence the evaluated concentrations. Therefore, this work presents a system that, at lab scale, reproduces a scenario with radon transfer from water to air. The main objective of this system is to control radon levels (either in water or in the air) to be able to reproduce the conditions of real scenarios. This will permit to study any possible variation of the experimental environment associated with the physicochemical parameters. This work describes the experimental setup that has been designed for this purpose and presents the results of its adjustment. Also, this work includes the radon tightness tests that will ensure there is no leakage of this radionuclide in the set-up.

Keywords: radon; transfer; laboratory; system; water; air

**Diseño de un sistema de transferencia de radón para estudio experimental de escenarios simulados con presencia de agua y aire**

El radón es un gas radiactivo de origen natural cuya exposición se identifica como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo. Está presente en rocas y suelos y tiende a acumularse en espacios cerrados. En entornos como spas, balnearios o cuevas, el gas radón se encuentra tanto disuelto en las aguas de la zona como en el ambiente. Dado el riesgo que supone la exposición a radón para la salud, es necesario caracterizar los niveles de radón de estos escenarios, así como estudiar los parámetros que puedan tener un efecto sobre las concentraciones evaluadas. Por ello, el presente trabajo plantea un sistema que reproduzca a escala de laboratorio un escenario con transferencia de radón desde el agua al aire. El principal objetivo del sistema es que permita controlar los niveles de radón (tanto en aire como en agua) para poder reproducir condiciones que podrían darse en escenarios reales, y así poder estudiar las posibles variaciones asociadas a los parámetros fisicoquímicos del medio experimental. Se describe el montaje experimental diseñado y se presentan los resultados de su puesta a punto, incluyendo los ensayos de hermeticidad necesarios para garantizar la ausencia de fugas de radón.

Palabras clave: radón; transferencia; laboratorio; sistema; agua; aire

Correspondencia: ainome@iqn.upv.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por parte del proyecto “DESARROLLO DE METODOLOGÍAS DE PREVENCIÓN Y DE MODELOS DE DOSIMETRÍA INTERNA PARA LAS RADIACIONES IONIZANTES RELACIONADAS CON MATERIALES NORM (MEMO RADIÓN)” actuación cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER y la Generalitat Valenciana, con referencia IDIFEDER/2018/038.

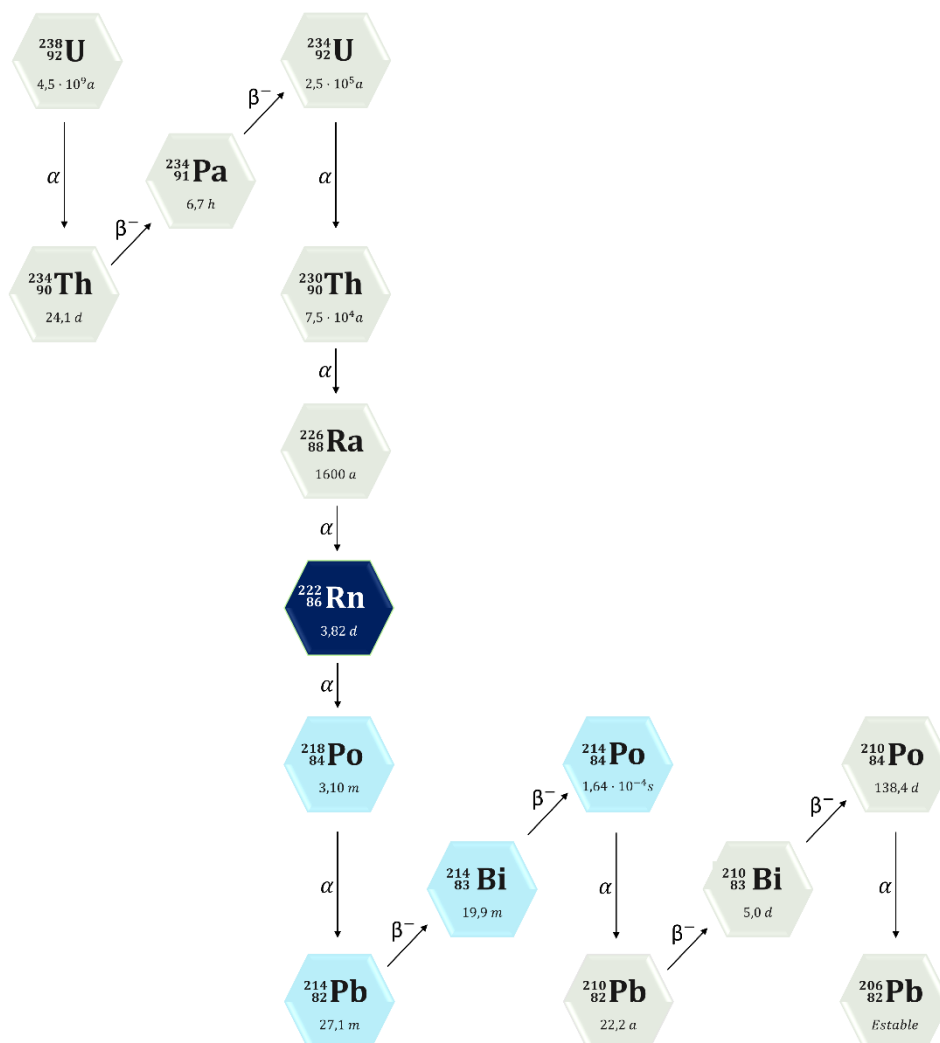


©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

El radón-222, en adelante radón, es un radionucleido que pertenece a la cadena de desintegración del uranio (Figura 1). Se forma tras la desintegración radiactiva de su predecesor, el radio-226, que se encuentra presente en suelos y rocas. Su naturaleza gaseosa le permite transportarse a través de terrenos y suelos, disuelto en las aguas, así como acumularse en el aire del interior de espacios cerrados (OMS, 2015). La principal vía de exposición a este gas radiactivo de origen natural es su inhalación, lo que constituye un problema para la salud poblacional. Esto se debe a que, tras la incorporación del radón y su progenie de vida corta al organismo (marcados en azul en la Figura 1), una fracción de estos radionucleidos decae emitiendo partículas altamente energéticas que interactúan con la materia viva a su paso. Esta interacción de la radiación ionizante con el organismo provoca daños celulares y alteraciones en el ADN que se traducen en afecciones respiratorias como el cáncer de pulmón. Por ello, la Organización Mundial de la Salud identifica el radón como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo, precedido únicamente por el tabaquismo (OMS, 2015).

**Figura 1. Cadena de desintegración Uranio-238. (Diagrama de elaboración propia – Representación de los valores de la base de datos del NNDC)**



En espacios como spas, balnearios y cuevas el radón puede estar presente en el aire y en las aguas de la zona, procedente de las rocas y suelos, y en concentraciones que pueden variar constantemente dependiendo de distintos factores, como las características físico-químicas de los medios presentes (Schubert et al., 2012) (Ye et al., 2019) y de las condiciones meteorológicas (Zhou et al., 2018) (García-Vindas, 2011). Cuando visitantes ocasionales y profesionales frecuentan estos lugares, el radón supone una fuente de exposición para estos ocupantes. Es por ello por lo que los niveles de este radionucleido en zonas con presencia de radón en agua y aire deben monitorizarse regularmente. A raíz de la reciente publicación del Real Decreto 1029/2022, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, se fija el nivel de referencia de concentración de radón en aire en espacios cerrados en  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Análogamente, el Real Decreto 314/2016 establece el criterio para las aguas de consumo de concentración de radón en  $500 \text{ Bq/L}$ , sin embargo, de superarse los  $100 \text{ Bq/L}$  se requiere continuar implementando medidas para su optimización. Por ello, mediante técnicas de prevención y mitigación se persigue mantener los niveles de radón en valores inferiores a los establecidos en la legislación, alcanzando valores tan bajos como sea razonablemente posible. Con ello, se estará en posición de controlar estos niveles para así asegurar la integridad de la salud de los individuos que se exponen en estos entornos.

Las concentraciones de radón en cada fase varían en cada escenario, así como los parámetros fisicoquímicos de las aguas que contienen radón. La turbidez, el pH, la salinidad y el contenido de materia orgánica son algunos de los parámetros de las aguas que incluso pueden variar con el tiempo dentro de una misma área. Para poder controlar los niveles de radón en aire ante variaciones de concentración en las aguas es necesario determinar cualquier influencia que puedan tener los parámetros fisicoquímicos de las aguas sobre la transferencia de radón entre ambos medios. Estudios previos plantean una posible dependencia del parámetro de pH de las aguas con las cantidades de radón emanadas del agua al aire (Ting et al., 2022). A su vez, otras investigaciones indican que el pH podría influir sobre el contenido de radón en las aguas (Sainz et al., 2016), así como estar relacionado con las propias variaciones de radón habituales de los medios acuosos (Tedesco et al., 1996).

Para poder estudiar las posibles influencias asociadas a las variaciones de estos parámetros en los entornos reales, se busca poder reproducir estos escenarios a escala de laboratorio. Para ello se plantea la construcción de un sistema que permita monitorizar los niveles de radón en ambos medios, así como ajustar los parámetros fisicoquímicos y estudiar las posibles influencias asociadas. Con ello se pretende poder esclarecer cualquier efecto que las propiedades de las aguas tengan sobre los niveles de radón en el aire en contacto, lo que permitiría predecir variaciones en las concentraciones de radón que pueden suponer un riesgo de exposición para la población, así como prever acciones de prevención y/o mitigación adecuadas.

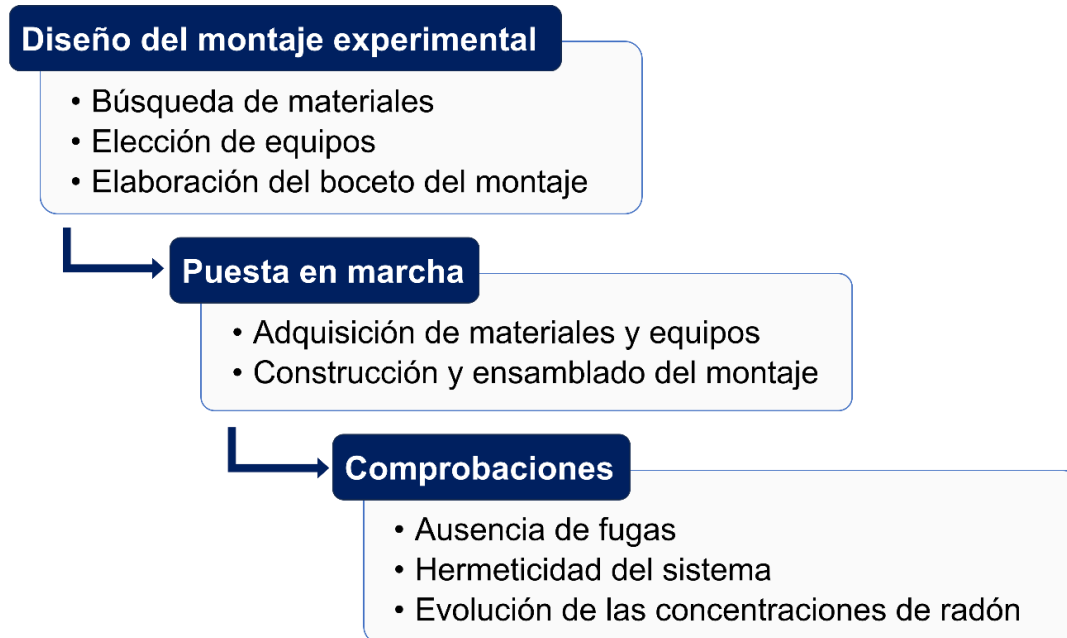
## 2. Objetivo

El objetivo general de este trabajo consiste en reproducir, a escala de laboratorio, escenarios reales con presencia de radón (tanto en aire como en agua) para poder realizar estudios acerca de cualquier posible variación en concentración de radón asociada a los parámetros fisico-químicos del medio experimental. Para ello, se plantea el objetivo específico de diseñar un montaje experimental a escala de laboratorio que permita alcanzar concentraciones de radón constantes en un sistema en presencia de agua y aire, para así poder analizar de manera independiente la influencia de los parámetros físico-químicos..

### 3. Metodología

La metodología de trabajo se estructura en tres fases: diseño del montaje experimental, puesta en marcha y comprobaciones. Cada fase se compone de una serie de subtareas que se especifican en la Figura 2.

Figura 2. Secuencia de tareas y subtareas de la metodología



El diseño del montaje experimental comienza con la búsqueda de materiales apropiados para su uso en el sistema, siendo los principales criterios de selección que el material presente una baja difusión al radón para minimizar las fugas y que se adapte a las necesidades operativas del sistema. Tras ello se determina qué equipos instrumentales se van a utilizar para medir en las fases de agua y aire. Por último, se esboza un boceto en donde se indica cómo disponer cada componente dentro del montaje experimental.

La fase de puesta en marcha se inicia con la adquisición de los materiales y equipos seleccionados en la fase de diseño del sistema. Tras ello se construye el montaje experimental en donde se ensamblan los materiales y se disponen los equipos necesarios para el funcionamiento.

Durante la fase de comprobaciones se revisa el correcto funcionamiento del sistema. Primeramente, se comprueba que no se den fugas de agua o aire en el sistema y, en caso de apreciarse alguna pérdida, se repara hasta que cada conexión queda completamente estanca. Una vez comprobada la ausencia de fugas, se verifica el funcionamiento del sistema y se realiza un ensayo de estanqueidad al radón, de acuerdo a la ISO 11665-13 (2017). El procedimiento concreto de este ensayo se explicará más adelante, en el apartado 4.3.2. Tras la verificación de la ausencia de fugas y de la hermeticidad del sistema, se acciona el sistema y se comprueba que éste funcione correctamente. Para ello se miden las concentraciones de radón en agua y aire al inicio y al final de la prueba. Particularmente se comprueba que, transcurrido 1 día de ensayo, la concentración de radón en ambos medios aumenta, lo que verifica que el sistema funciona correctamente y permitirá llevar a cabo los ensayos previsto. Se compararán los valores de concentración de radón en el agua, con los alcanzados al situar la fuente dentro del bidón, con el mismo volumen de agua y durante el mismo periodo de tiempo.

## 4. Resultados

Se presentan, a continuación, los resultados de la implementación de cada una de las fases.

### 4.1 Diseño del montaje experimental

#### Elección de materiales

La selección de materiales se realiza en función del coeficiente de difusión de radón. A pesar de que el cristal presenta una buena resistencia frente a la difusión de radón (Jobbágy et al., 2019), se descarta el uso de recipientes de este material, dado que no pueden perforarse para hacer pasar conducciones y, por tanto, no se adaptan a las necesidades del montaje experimental. Se opta por contenedores de polietileno ya que permiten su acondicionamiento para poder pasar conducciones a través de éstos. Con el fin de prevenir la difusión del radón se escoge utilizar polietileno de alta densidad (HDPE) dado que presenta un coeficiente de difusión al radón tres veces menor que el del polietileno de baja densidad (HLPE) (Jiranek y Kotrbata, 2011).

#### Elección de equipos

El equipo escogido para las medidas de radón en la fase aire del bidón se trata del detector en continuo RadonScout de SARAD Company. La elección del detector se basa en su funcionamiento autónomo durante un periodo de hasta tres meses y en sus dimensiones de 17.5 x 13.5 x 5.5 cm<sup>3</sup> que permiten que se disponga en el interior del recipiente. El radón difunde a través del dispositivo que contabiliza las partículas alfa procedentes de la desintegración del radón y su progenie, y registra una medida por hora de la concentración de radón en aire.

La concentración de radón en agua se mide en un contador de centelleo líquido Hidex 600 SL de Hidex Company. Se escoge esta técnica de medida dada su precisión y sencilla aplicación en contaje alfa, aunque las muestras requieren de preparación previa a las medidas. El proceso de preparación de muestras para su medida consiste en depositar en el interior de viales de 20 mL líquido de centelleo MaxiLight+ y la muestra objeto de estudio en una proporción de 12/8 mL. Tras realizar la mezcla, previo a las medidas, se deja transcurrir un periodo mínimo de tres horas que equivale a seis periodos de semidesintegración de su progenie. Este lapso corresponde con el tiempo necesario para que el radón alcance el equilibrio con su progenie (L'Annunziata, 2023), tras el que se mide el vial contenedor de la muestra.

#### Boceto del montaje experimental

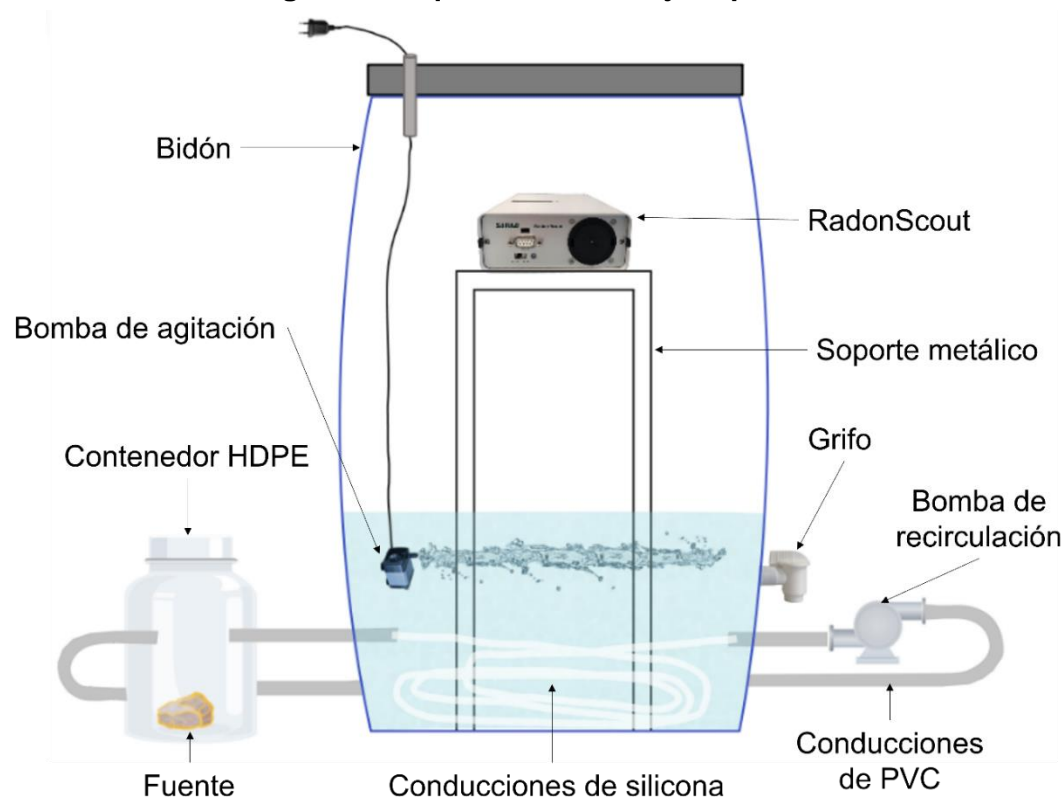
Para reproducir a escala de laboratorio escenarios reales con agua y aire en presencia de radón se necesita un volumen de control que contenga ambos medios en donde se acumule el radionucleido que se va a estudiar. A su vez, para poder analizar la influencia de las variables objeto de estudio se requiere que las concentraciones de radón de ambos medios lleguen a ser estables. Habiéndose escogido el HDPE como material adaptable a las necesidades del sistema y con bajo coeficiente de difusión al radón, el contenedor seleccionado corresponde con un bidón de HDPE de 120 L de capacidad con cierre de ballesta llenado parcialmente con 25 L de agua.

El aporte de radón se va a realizar sobre la fase acuosa del recipiente cerrado herméticamente para su acumulación. Para inducir las etapas de enriquecimiento, la fuente puede estar situada dentro del recipiente, directamente en contacto con el medio acuoso, o fuera del contenedor de acumulación. Estudios previos que sitúan la fuente en el interior del bidón en contacto con el agua reportan un incremento de la actividad en ambos medios sin llegar a estabilizarse (Noverques et al., 2023). A su vez, esta disposición limita el acceso a la fuente para su retirada, ya que requiere de la apertura del bidón para extraer la fuente y finalizar la

etapa de enriquecimiento, lo que da lugar a pérdidas parciales del radón acumulado en la fase aire.

Con el propósito de poder enriquecer y dejar decaer el agua en radón, estudios previos (Celaya et al., 2022) sitúan la fuente radiactiva en un recipiente auxiliar que conecta con el bidón de acumulación, de manera que la fuente queda accesible para su inserción y retirada en el sistema. Las aguas del depósito se cargan al estar en contacto con un circuito de silicona que conecta con la fuente radiactiva, permitiendo la difusión del radón de la fase aire del circuito auxiliar en el agua. Con el fin de evitar las limitaciones derivadas de situar la fuente en el interior del bidón y no poder alcanzar concentraciones de radón estables, el sistema se diseña de forma que la fuente sea accesible, pudiendo generar etapas de enriquecimiento y decaimiento. A continuación, se describen todos los elementos considerados para el montaje experimental, que se integran al sistema tal y como indica la Figura 3.

**Figura 3: Esquema del montaje experimental**



Para poder medir las concentraciones de radón en las fases de agua y aire es necesario incorporar elementos en el montaje experimental. Puesto que el detector RadonScout se sitúa en la fase aire del interior del bidón, se hace uso de un soporte metálico que permite mantener el detector elevado sobre el nivel del agua. Para acceder al agua del bidón el montaje requiere que se disponga de un grifo que permita la extracción de las muestras de agua. Por ello, se sitúa un grifo de HDPE a 15 cm de la base del bidón que permite extraer hasta 6 L de muestra de la fase acuosa. Se incorpora a su vez un elemento que permite recrear condiciones dinámicas como las que pueden darse en escenarios reales. Para ello se incluye una bomba de agitación modelo XL-580 que se sumerge en el agua para agitar el medio acuoso cuando se acciona. El cableado de la bomba se inserta a través de la tapa del bidón, dejando la conexión de alimentación fuera del contenedor, lo que permitirá controlar desde el exterior del bidón la agitación, alternando entre condiciones estacionarias y régimen turbulento cuando se requiera.

Por último, se diseña la parte del sistema que permite el aporte de radón desde el exterior del bidón que contiene la fase agua y aire. Para ello, se crea un circuito cerrado por el que se hace circular aire enriquecido en radón que, al estar en contacto con la fase acuosa en parte de su extensión, aporta radón al agua. El circuito para el enriquecimiento de radón consiste en una bomba de aspiración Welch Dry Vacuum Pump 2511 para la recirculación del aire con radón, tubos para las conducciones y un pequeño contenedor en el que se inserta la fuente radiactiva que aporta el radón, que consiste un bote de 1 L de HDPE a través del que la bomba de aspiración Welch hace circular el aire. Se sitúan conducciones de plástico en la parte del circuito de enriquecimiento exterior al contenedor de 120 L y se cubren con cinta selladora metálica para conductos de aire, resistente al agua, vapor y gas para evitar pérdidas de radón durante el recorrido que realiza el aire enriquecido. Estas conducciones atraviesan el bidón de forma que quedan sumergidas en el interior de la fase acuosa y se conectan con una segunda conducción, en este caso de silicona, que al estar en contacto con el agua permite la difusión del radón del aire al medio acuoso.

#### **4.2 Puesta en marcha**

El montaje del sistema se inicia realizando los orificios en el bidón de 120 L para conectar el grifo, las bombas y las conexiones laterales del circuito de enriquecimiento (ver Figura 3). Se inserta cada elemento en el lugar que corresponde y se sellan las juntas con silicona para evitar fugas. Del mismo modo, se realizan los orificios correspondientes en el contenedor de 1 L, se insertan las conexiones y se sellan las juntas con silicona.

Una vez terminado el ensamblado de partes del montaje experimental se llena el bidón con 25 L de agua de red y se sitúa el soporte metálico centrado en su interior. A continuación, se inserta el detector RadonScout en una funda de plástico estanca al agua para protegerlo de la humedad y se coloca en el interior del bidón sobre el soporte metálico. Por último, se cierra el bidón de 120 L, se inserta la fuente en la botella de 1 L de capacidad y se acciona la bomba del circuito de aporte de radón.

#### **4.3 Comprobaciones del montaje experimental**

##### **Verificación de ausencia de fugas**

Con el montaje experimental en funcionamiento se verifica que el contenedor de 120 L no fuga agua en las zonas que conectan los diferentes elementos del sistema. Esta comprobación se realiza tanto en condiciones estáticas del sistema, como en condiciones dinámicas tras haber accionado la bomba de agitación. Tras estas verificaciones se abre la tapa del bidón y se comprueba que no se observan burbujas de aire que asciendan desde el medio acuoso, lo que confirma que el sistema no fuga aire en las juntas en donde se unen las conexiones entre conducciones.

##### **Prueba de estanqueidad**

La prueba de estanqueidad se realiza disponiendo los elementos del sistema como se indica en la Figura 4. Se inserta la fuente en el contenedor de 120 L, en ausencia de agua, y, con las bombas apagadas, se registra la evolución de concentración de radón en aire en el RadonScout que se sitúa sobre el soporte metálico.

Transcurridas 165 horas desde que la fuente se encuentra dentro del contenedor, éste se abre, se extrae la fuente y se cierra de nuevo. En ausencia de la fuente de radón el detector RadonScout registra la evolución de la concentración de radón en aire durante esta fase de decaimiento. Esta evolución se presenta en la Figura 5 junto con la curva de desintegración radiactiva que se esperaría obtener en caso de que no se dieran pérdidas de radón en el sistema.

Figura 4: Montaje experimental para la prueba estanqueidad de radón en aire

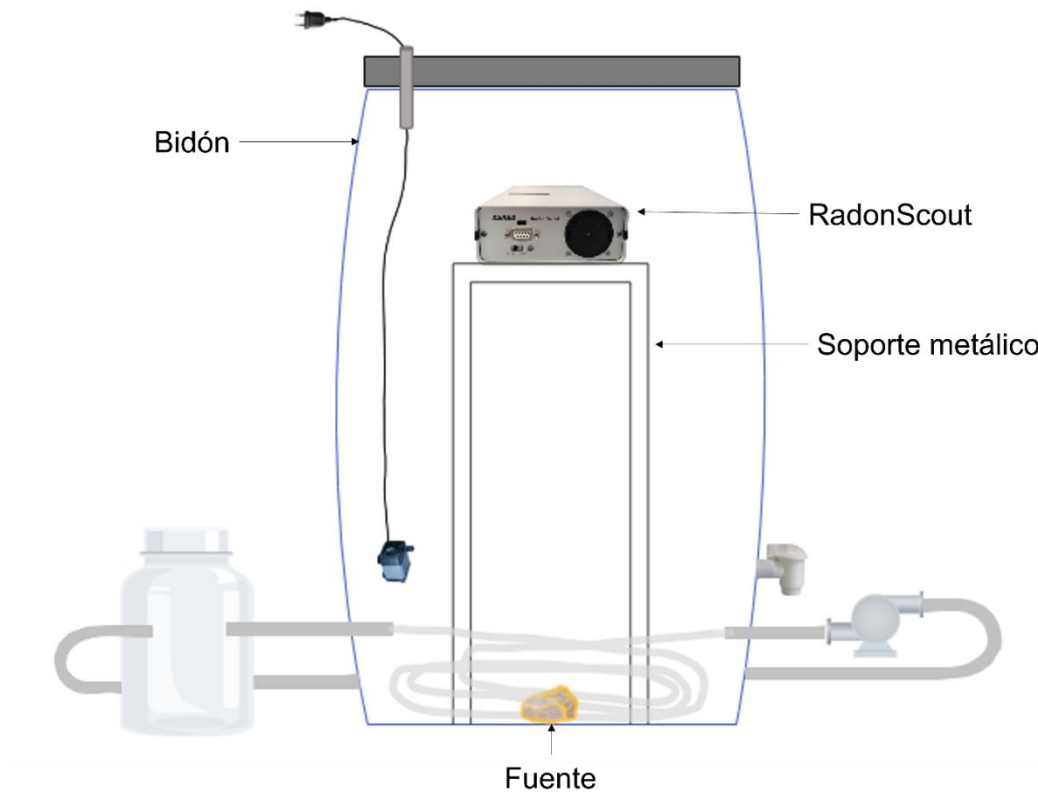
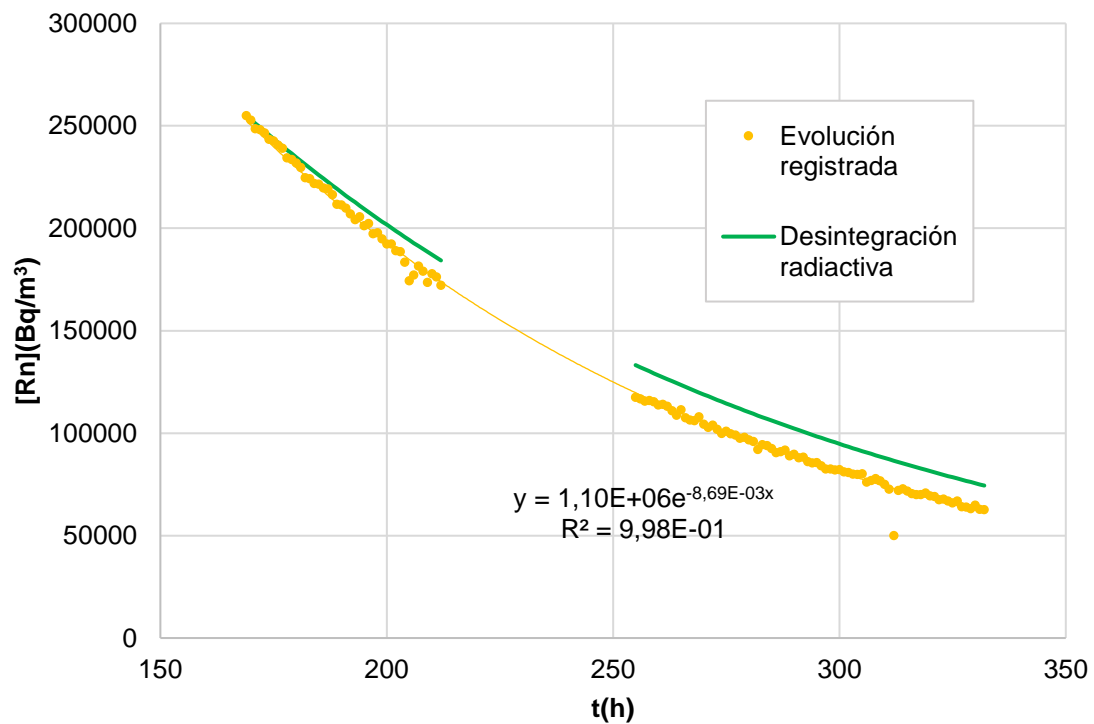


Figura 5: Comprobación de la estanqueidad del sistema





Siendo la constante de semidesintegración del radón ( $\lambda_{Rn}$ )  $0.00756 \text{ h}^{-1}$  y la constante efectiva ( $\lambda_{ef}$ ) registrada de  $0.00869 \text{ h}^{-1}$ , la constante de pérdidas ( $\lambda_{per}$ ) asociada al sistema, que se calcula como la diferencia entre  $\lambda_{ef}$  y  $\lambda_{Rn}$  resultad en un valor de  $0.00114 \text{ h}^{-1}$ . Dado que este valor no supera la mitad de la constante de semidesintegración de radón, de acuerdo a la ISO 11665-13, el montaje experimental se considera hermético al radón.

### Comprobación del funcionamiento del sistema

Tras comprobar que no hay fugas en el sistema, se verifica que el aire recirculado enriquece el agua en radón. Para ello se cierra el contenedor de 120 L y se extrae una muestra de agua del bidón que se mide en el detector de centelleo líquido Hidex 600SL. El resultado de concentración inicial de radón en el agua de red es de  $0.51 \pm 0.05 \text{ Bq/L}$ . Transcurrido un intervalo de tiempo de 24 horas, en el que la bomba de recirculación se encuentra encendida, se extrae una segunda muestra, que tras medirse en el contador de centelleo da un resultado de  $20.46 \pm 0.21 \text{ Bq/L}$ , que confirma que el agua se ha enriquecido en radón. Se compara este valor con el obtenido utilizando la misma fuente radiactiva pero insertada directamente dentro del bidón con el mismo volumen de agua, que fue de  $28.22 \pm 0.28 \text{ Bq/L}$ . Este valor es algo superior al alcanzado con la fuente en el bidón exterior, debido a que, en el caso de situar la fuente fuera del bidón, el aporte de radón al agua del sistema es menor porque el aire con radón ha de difundirse a través de los tubos de silicona del interior del bidón, lo que retrasa su contribución al agua del sistema. En cualquier caso, la diferencia (inferior al 28%) se considera razonable y dentro del orden de magnitud adecuado para conseguir el enriquecimiento del sistema en radón.

Con respecto a la fase aire que está en contacto con el agua del bidón, se registran valores de fondo durante los instantes iniciales. A medida que transcurre el ensayo la concentración de radón en aire incrementa, alcanzando a las 40 horas de ensayo valores de  $1000 \text{ Bq/m}^3$  por encima del valor inicial de fondo. El aporte de radón a la fase aire en el interior del bidón procede, por lo tanto, del agua enriquecida en radón que actúa como fuente para la fase aire.

## 5. Conclusiones

Se ha diseñado un montaje experimental que permite aportar radón a un sistema que cuenta con fases de agua y aire en contacto, sistema que permite además finalizar el aporte de radón en el instante que se requiera sin interferir en la evolución de la concentración de radón en ambos medios por apertura del bidón.

Tras la puesta en marcha del montaje se ha comprobado la ausencia de fugas y, de acuerdo con la ISO 11665-13, se ha verificado la hermeticidad del sistema. El correcto funcionamiento del montaje experimental se ha verificado al observar que, tanto el medio acuoso como la fase aire que se encuentra en contacto, se enriquecen en radón cuando se acciona el sistema. Líneas futuras de trabajo se centrarán en relacionar las concentraciones de radón en ambas fases, así como en el estudio de las variaciones asociadas a cambios en los parámetros fisicoquímicos del medio experimental.

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**



## REFERENCIAS

BOE-A-2022-21682 Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. (s/f). Boe.es. Recuperado el 11 de abril de 2024, de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-21682>

BOE-A-2016-7340 Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano ionizantes. (s/f). Boe.es. Recuperado el 11 de abril de 2024, de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/07/29/314/dof/spa/pdf>

Celaya, S., Fuente, I., Rábago, D., Quindós, L., & Sainz, C. (2022). Application of a mathematical model to an artificial aquifer under different recharge/discharge conditions using <sup>222</sup>Rn as a tracer. *Groundwater for Sustainable Development*, 17(100753), 100753. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100753>

García-Vindas, J. R. (2011). Estudio experimental del tiempo de disolución del Rn-222 en agua y algunas implicaciones en la geología. *Revista geológica de América central*, 24. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i24.8547>

Jobbágy, V., Stroh, H., Marissens, G., & Hult, M. (2019). Comprehensive study on the technical aspects of sampling, transporting and measuring radon-in-water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 197, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.11.012>

Jiraneck, M., Kotrbata, M. (2011). Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition. *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2-3), 178–183. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr043>

L'Annunziata, M. F. (2023). Radionuclide decay, radioactivity units, and radionuclide mass. En *Radioactivity*. 865–883. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90440-7.00025-9>

Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública. (2009). Who.int; World Health Organization. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241547673>

National Nuclear Data Center. (s.f.). NuDat 3. Consultado el 11 de abril 2024 en <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Noverques, A., Juste, B., Sancho, M., García-Fayos, B., & Verdú, G. (2020). Study of the influence of radon in water on radon levels in air in a closed location. *Radiation Physics and Chemistry*, 171(108761), 108761. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108761>

Sainz, C., Rábago, D., Fuente, I., Celaya, S. y Quindós, L (2016). Description of the behavior of an aquifer by using continuous radon monitoring in a thermal spa, *The Science of the Total Environment*, 543, 460-466 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.052>

Schubert, M., Paschke, A., Lieberman, E., y Burnett, W. C. (2012). Air–water partitioning of <sup>222</sup>Rn and its dependence on water temperature and salinity. *Environmental Science & Technology*, 46(7), 3905–3911. <https://doi.org/10.1021/es204680n>

Tedesco, D., Pece, R. y Avino, R. (1996), Radon, pH and temperature monitoring in water Wells at Campi Flegrei caldera (southern Italy), *Geochemical Journal*, 30(2), 131-138, <https://doi.org/10.2343/geochemj.30.131>

Ting, C-Y., Walia, V., Li, Y-S., Lin S-J., Lee. P-L., Tsai, T-L., Kumar, A. y Lin, C-C. (2022) Quantification of the dependence of the emanation of radon from water on the pH and temperature of water. *Radiation Physics and Chemistry*, 200(110308), 110308 <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110308>

UNE-EN ISO 11665-13: (2017) Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon 222 — Part 13: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials: membrane two-side activity concentration test method.

User Manual Hidex 600 SL (2021). Hidex Oy.

User Manual Radon Scout, (2017). Sarad Company

Ye, Y.-J., Xia, X.-Q., Dai, X.-T., Huang, C.-H., & Guo, Q. (2019). Effects of temperature, salinity, and pH on <sup>222</sup>Rn solubility in water. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 320(2), 369–375. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06495-9>

Zhou, J., Ding, D., & Ye, J. (2018). Study on the influence of temperature and humidity on radon exhalation from a radon-containing solution. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318(2), 1099–1107. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6224-3>