



*Facultad
de
Ciencias*

**Caracterización de un sistema de referencia
de exhalación de radón y calibración de
distintos dispositivos de medida.**

Characterization of a radon exhalation reference
system and calibration of different measuring
devices.

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al
GRADO EN FÍSICA

Autor: Sergio Nieto Fuente
Director: Daniel Rábago Gómez
Co-Director: Isidoro Gutiérrez Álvarez
Junio - 2022

Agradecimientos

Quería expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado durante los 4 años que ha durado la carrera de física. Primero a mi familia por apoyarme siempre, en las buenas y en las no tan buenas y que siempre confiaran en mí. Después en mis amigos que su apoyo también ha sido muy importante y necesario. En este caso también quiero darles un agradecimiento especial a los amigos que conocí en esta carrera: Alain, Duje, Miguel, Fran, Hugo y Fernando. Durante estos 4 años nos lo hemos pasado bien juntos, nos hemos apoyado en los momentos malos y siempre habéis estado allí cuando os he necesitado y viceversa.

Por último agradecer a Daniel Rábago por darme la oportunidad de trabajar con él en este TFG, sin dudarlo, cuando le pregunté y por echarme siempre una mano cuando lo he necesitado. También darle las gracias a Isidoro Gutiérrez por ayudarme a conseguir este trabajo a pesar de venir de otra universidad y por estar disponible cuando se ha requerido ir al laboratorio o por cualquier otra circunstancia.

Resumen

Se ha estudiado la tasa de exhalación de radón de un suelo de referencia mediante el método de acumulación y mediante el método teórico. El método de acumulación consiste en encerrar herméticamente el suelo en cuestión (cámara de acumulación) y dejar durante un periodo determinado de tiempo que el radón exhalado se acumule en el interior de la cámara hasta que alcance un valor máximo o valor de saturación. En cambio, la expresión de la tasa de exhalación en el método teórico se obtiene a partir de resolver la ecuación de difusión. El valor de referencia que se obtuvo fue $\bar{E} = 99 \pm 12$ Bqm⁻²h⁻¹ mediante el método experimental y $E = 107 \pm 6$ Bqm⁻²h⁻¹ mediante el método teórico, por lo que se comprueba que ambas tasas de exhalación de radón son compatibles entre sí.

Una vez se tiene el valor de referencia de la tasa de exhalación del suelo con el que poder comparar, se realizó un análisis de la exhalación de radón del suelo utilizando distintos equipos de medida (RTM, Radon Scout, AlphaE) para comprobar qué monitor de radón es el más adecuado para las mediciones que se pretenden hacer. Se determinó que el monitor de radón más adecuado para las medidas que se pretenden hacer es el RTM porque tiene mejor respuesta y mejor precisión.

Adicionalmente, se realizaron variaciones en las condiciones ambientales, más en concreto en la temperatura ambiente y en la velocidad del viento, para comprobar qué efectos producen tales cambios en la exhalación de radón del suelo. Se comprobó que, a medida que aumenta la temperatura, aparentemente aumenta el valor de la exhalación. Sin embargo, cambios en la velocidad del viento no alteran, en principio, el valor de la exhalación de radón, dentro del rango de velocidades y temperaturas establecido.

Palabras clave

Radón, exhalación de radón, método de acumulación, monitor de radón

Abstract

The radon exhalation rate of a reference soil has been studied by the accumulation method and by the theoretical method. The accumulation method consists of hermetically enclosing the soil (accumulation chamber) and allowing the exhaled radon to accumulate inside the chamber for a certain period of time until it reaches a maximum value or saturation value. In contrast, the expression of the exhalation rate in the theoretical method is obtained by solving the diffusion equation. The reference value obtained was $E = 99 \pm 12 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ by the experimental method and $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ by the theoretical method, therefore both radon exhalation rates are found to be compatible with each other.

Once the reference value of the soil exhalation rate was available for comparison, an analysis of radon exhalation from soil has also been carried out using different measuring equipment (RTM, Radon Scout, AlphaE) in order to check which radon monitor is the most suitable for the intended measurements. It was determined that the most suitable radon monitor for the intended measurements is the RTM because it has better response and better accuracy.

Additionally, variations in environmental conditions, more specifically in ambient temperature and wind speed, were made to test the effects of these changes on radon exhalation from the soil. It was found that, as temperature increases, the exhalation value apparently increases. However, changes in wind speed do not, in principle, change the radon exhalation value, within the established range of velocities and temperatures.

Key words

Radon, radon exhalation, accumulation method, radon monitor

Índice general

1. Introducción	1
2. Objetivos	6
3. Materiales y métodos	7
3.1. Método de acumulación	7
3.2. Suelo de referencia	9
3.3. Expresión teórica de la tasa de exhalación	12
3.3.1. Densidad	12
3.3.2. Factor de emanación	12
3.3.3. Concentración de radio	13
3.3.4. Longitud de difusión	14
3.4. Equipos e instrumentos utilizados	15
3.4.1. Cámara de acumulación	15
3.4.2. Monitores de radón	17
3.4.3. Otros dispositivos utilizados	22
4. Resultados y análisis	26
4.1. Exhalation bed	26
4.1.1. Método experimental	26
4.1.2. Método teórico	27
4.2. Comparación de equipos	30
4.3. Medidas cambiando condiciones ambientales	32
5. Conclusiones	36
6. Bibliografía	38

1. Introducción

En el momento en el que se formó la Tierra hace 4500 millones de años aproximadamente, había varios elementos radiactivos incluidos en la mezcla de materiales que se convirtieron en la Tierra. De dicha mezcla, tres elementos han sobrevivido hasta la actualidad que son el uranio ^{238}U , el uranio ^{235}U y el torio ^{232}Th . A estos elementos se les califica como radiactivos debido al fenómeno natural en el que los núcleos de los átomos pierden parte de su energía emitiéndola al exterior denominado radiactividad. Esto sucede cuando la relación entre el número de nucleones (neutrones y protones) que se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte en el interior del átomo no es estable, tendiendo el núcleo a desprenderse de ellos con el fin de alcanzar el equilibrio [1].

El ^{238}U , el ^{235}U y el ^{232}Th sufren una serie de desintegraciones nucleares hasta alcanzar ser un isótopo estable, lo que se denomina cadena de desintegración. El núcleo de ^{235}U atraviesa una serie de 11 transformaciones hasta convertirse en ^{207}Pb estable, el núcleo de ^{238}U atraviesa 14 transformaciones para llegar a ser ^{206}Pb estable y, por último, el ^{232}Th sufre 10 transformaciones hasta convertirse en ^{208}Pb [1].

Aunque no es posible predecir con exactitud la fecha cuando se producirá la transformación de un átomo individual, se puede medir de forma adecuada la probabilidad de desintegración en un intervalo dado. La transformación radiactiva natural está acompañada de la emisión de una o más partículas (principalmente alfa o beta) y, además, tras este tipo de emisión puede emitir radiación electromagnética energética denominada radiación gamma. Una partícula alfa es el equivalente al núcleo de un átomo de helio contando con una configuración con dos protones y dos neutrones. Por tanto, una desintegración alfa reducirá su número atómico en dos y el número másico en cuatro. Una partícula beta, en este caso, es un electrón energético que proviene del núcleo al convertirse un neutrón en un protón más un electrón. En las cadenas desintegrativas que se mencionan en este trabajo, se producen desintegraciones β^- en las que se aumentará el número atómico en uno y el número másico no cambiará. Un rayo gamma es un paquete de energía, por lo que una desintegración gamma por sí misma no provocaría cambios en el número atómico ni en el número másico [1].

La desintegración de un núcleo de un átomo se puede modelizar mediante la ecuación diferencial:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (1.1)$$

donde N es el número de núcleos, λ es la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo denominada constante de desintegración (es una constante independiente de cada isótopo) y t es el tiempo. Si se resuelve la ecuación diferencial, se obtiene la ley de decaimiento radiactivo

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

siendo la constante de desintegración la que indica la velocidad a la que se desintegran esos isótopos. A partir de la constante de desintegración es posible obtener el periodo de semidesintegración del núcleo: $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$ que es el tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de un radioisótopo. El número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo es denominado como actividad $A = \lambda \cdot N$, siendo su unidad el Bequerelio (Bq) que es lo mismo que una desintegración por segundo [1].

El radón presenta tres isótopos naturales, radiactivos y de periodos cortos. En este trabajo se estudiará el radón ^{222}Rn que es un gas noble radiactivo de origen natural que se forma como resultado de la desintegración radiactiva del radio ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1620$ años), perteneciente a la cadena de desintegración radiactiva del uranio ^{238}U y, por tanto, constituye una fuente continua de radón en la Tierra. Los otros dos isótopos son el denominado torón ^{220}Rn y el llamado actinón ^{219}Rn , procedentes de las cadenas radiactivas del ^{232}Th y ^{235}U respectivamente. El dato a tener en cuenta es que los periodos de semidesintegración de estos isótopos son muy cortos ($T_{1/2}(\text{torón}) = 55.6$ s y $T_{1/2}(\text{actinón}) = 3.96$ s) en comparación con el del radón ($T_{1/2}(\text{radón}) = 3.82$ días), lo que implica que el radón sea el único isótopo que permanece en una proporción significativa en un periodo de tiempo, dando así la razón de por qué se trabaja con este isótopo. Los descendientes resultantes de la desintegración del ^{222}Rn se pueden dividir en dos grupos denominados descendientes de vida corta (se incluyen el ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y el ^{214}Po) y los descendientes de vida media-larga (se incluyen el ^{210}Pb , ^{210}Bi y el ^{210}Po) [2]. La cadena de desintegración del radón se muestra a continuación en la figura 1.1:

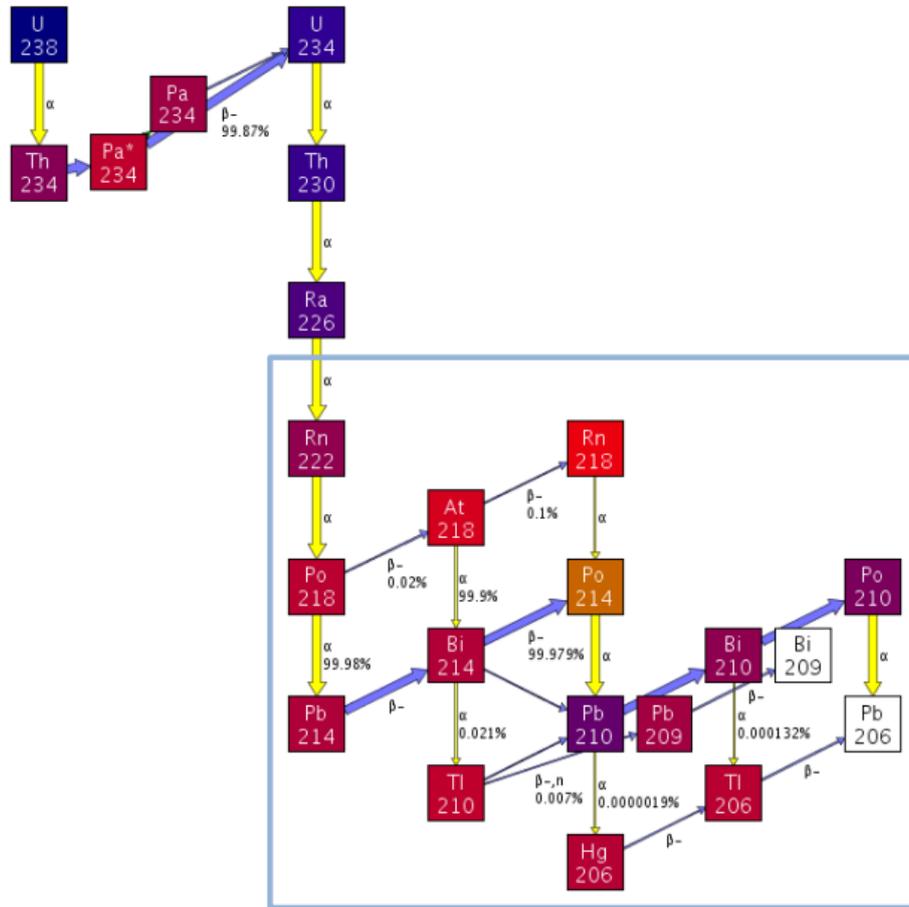


Figura 1.1: Esquema de la cadena de desintegración del ^{238}U . Se remarca en azul la parte correspondiente a la desintegración del ^{222}Rn . Además, se muestran los distintos elementos que forman dicha cadena, sus modos de decaimiento (alfa, beta y gamma), sus respectivos periodos de semidesintegración y, en los casos donde existen varias vías de desintegración, se muestra la probabilidad de las mismas [3].

El radón forma parte del grupo de los gases nobles caracterizados por poseer una estructura atómica tan estable que no les es necesario combinarse con ningún otro elemento químico. Esta propiedad junto con su periodo de semidesintegración ($T_{1/2} = 3.82$ días) y que posee un carácter gaseoso permiten que el radón tenga gran movilidad, permitiéndole escapar y moverse distancias relativamente largas desde su fuente de origen, en procesos de difusión o advección. Cabe destacar que el radón es el primer elemento no metálico de cada una de las cadenas de desintegración, por lo que puede escaparse de cualquier compuesto químico donde estuvo su antecesor, el radio, y difundirse por el aire. Finalmente, debido a que tiene una gran solubilidad, este elemento puede ser transportado tanto como un gas individual como disuelto en otros fluidos por lo que se encuentra igualmente tanto en aguas superficiales como en agua subterráneas y, del mismo modo que en los suelos, su concentración es muy variable y puede ser considerada una fuente potencialmente importante de exposición al público general a las radiaciones ionizantes naturales. Las aguas superficiales presentan concentraciones de radón muy bajas, sin embargo, las aguas que se extraen de fuentes subterráneas

como manantiales, pozos y sondeos y que fluyen a través de formaciones rocosas que pueden contener uranio, radio y torio, presentan valores más altos [4].

Cuando los átomos de radón emitidos por los núcleos de ^{226}Ra logran alcanzar el espacio entre partículas, consiguen escapar de la matriz sólida del material produciéndose el fenómeno conocido como emanación. Como el rango de retroceso en los sólidos es pequeño, normalmente inferior a $0.05\ \mu\text{m}$, la mayor parte de los átomos que retroceden permanecen dentro la red de granos del mineral. El movimiento posterior de los átomos desde la red no contribuye significativamente a la liberación de radón debido a que el coeficiente de difusión a través de los minerales es muy pequeño (10^{-25} - $10^{-27}\ \text{m}^2/\text{s}$). Si el retroceso termina fuera del grano o en un poro abierto, el radón es capaz de migrar. Hay muchos factores que afectan a la emanación de radón, como el tamaño y la forma del grano, el contenido de humedad, la porosidad, permeabilidad y la distribución de átomos de ^{226}Ra en los granos de los minerales [5].

Seguidamente a la emanación, los átomos de radón que están en el mencionado espacio intersticial son llevados a la superficie del suelo, mayoritariamente por difusión, hasta que se desintegran o finalmente se liberan al aire. Finalmente, tras los dos procesos comentados anteriormente, el radón se puede liberar de la superficie a la atmósfera, un fenómeno que se conoce como exhalación de radón [6]. Para describir este fenómeno se utiliza la tasa de exhalación de radón E que se define como la concentración de radón liberada por unidad de superficie durante una unidad de tiempo.

Debido a la exhalación de radón, las zonas de mayor preocupación son las viviendas, donde la concentración de radón en el aire depende mayoritariamente del tipo de suelo sobre el que está construida dicha vivienda. El radón, que puede penetrar dentro de la vivienda por cualquier grieta, tiende a acumularse si no existe una ventilación correcta en la misma. Por tanto, es interesante medir la exhalación de radón del suelo antes de construir un edificio, sobre todo en las zonas donde se conozca que existe una elevada concentración de radón. En el caso de la exhalación de radón desde el suelo, uno se limita a medir la exhalación de una parte muy pequeña de la superficie de exhalación, aunque pueda considerarse que la muestra se extiende indefinidamente en la dirección de exhalación. Si las mediciones no modifican el proceso de exhalación, la ampliación de los resultados obtenidos para una pequeña zona del suelo a zonas más grandes es sólo una cuestión de homogeneidad del mismo, en lo que respecta a la radiactividad, porosidad, permeabilidad, etc. [7] El método más utilizado para medir la exhalación de radón de un suelo consiste en colocar una muestra en un recipiente cerrado en posición invertida en la superficie de interés y analizar el crecimiento de la actividad de radón en función del tiempo, lo que se denomina método de acumulación. [8].

En cuanto a los efectos del radón para la salud, los descendientes del mismo cobran una gran relevancia. Estos descendientes son radioisótopos sólidos de corta duración que al inhalarse se depositan en las vías respiratorias, actuando principalmente en el pulmón y emitiendo partículas alfa. Estas partículas alfa pueden interactuar con

los tejidos biológicos pulmonares provocando daños en el ADN, siendo ésta la causa asociada al riesgo de cáncer pulmonar. Por esto, la inhalación de radón por parte de una persona es la segunda causa de cáncer de pulmón, sólo por detrás del tabaco. Así que se podría decir que es la causa natural que más aumenta las probabilidades de padecer cáncer de pulmón [9]. Este hecho conlleva a que sea importante y necesario medir las concentraciones de radón del terreno con el fin de poder llevar a cabo medidas de prevención y mitigación frente a la exposición elevada al radón.

Es importante destacar que debido a las propiedades del radón, este gas es utilizado como gas traza para distintas actividades. El radón es un gas noble radiactivo y no es susceptible a procesos de movimiento de masas de aire húmedo o seco de la atmósfera. Además, su tiempo de semidesintegración es similar al tiempo de residencia de algunos contaminantes del aire [10]. Como su periodo de semidesintegración es lo suficientemente corto para no acumularse en la atmósfera, éste es adecuado para poderse usar como un rastreador durante varios días. Existen fuentes relativamente constantes de radón natural tierra adentro, principalmente suelos ricos en uranio y radio, lo que genera grandes variaciones entre fuentes continentales y oceánicas [11], [12], [13] y también provoca diferencias entre la capa límite planetaria y la troposfera inferior [14], [15].

El uso del radón como trazador atmosférico en cuevas como la Cueva de Altamira durante los últimos 30 años ha aportado información relevante sobre los intercambios gaseosos entre distintas salas de las mismas y el ambiente exterior. El comportamiento físico-químico relativamente simple del gas radón proporciona una ventaja marcada sobre otros gases trazadores que suelen estar presentes en altas concentraciones en ambientes hipogeos, como el CO_2 . En los estudios realizados, se demuestra que el papel del radón como marcador es válido tanto para reflejar los ciclos estacionales de desgasificación y recarga, y para analizar fluctuaciones de períodos más cortos (diarios) [16].

Además de estas aplicaciones, la importancia del radón radica en su empleo como una herramienta adicional para registrar la posible ocurrencia de eventos sísmicos por medio de anomalías de radón que se presentan en movimientos de terreno como erupciones volcánicas y presencia de zonas geotérmicas, así como su potencial en trabajos ambientales cuya finalidad es la evaluación de la pluma de contaminación en el agua subterránea y el medio poroso por derrames de hidrocarburos [17].

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar y comprender la medida de las tasas de exhalación de radón mediante el método de la cámara de acumulación.

Se ha determinado la tasa de exhalación de radón en un suelo de referencia mediante dos formas distintas: primero se ha medido la exhalación de radón de manera experimental mediante el método de acumulación. Después se determina la exhalación de radón de manera teórica haciendo uso de la solución de las ecuaciones de difusión [18].

Otro objetivo ha sido determinar qué sistema es el más adecuado para medir la tasa de exhalación de radón en las condiciones que tenemos en el laboratorio, utilizando para distintas acumulaciones tres monitores de radón (RTM, AlphaE y Radon Scout).

Por último, se ha estudiado cómo afecta la variación de las condiciones ambientales, introduciendo cambios en la temperatura y en la velocidad del viento, sobre la exhalación de radón.

3. Materiales y métodos

3.1. Método de acumulación

El método de acumulación se utiliza habitualmente para medir las densidades de flujo de exhalación de ^{222}Rn , ^{220}Rn y también de gases traza estables como el CO_2 y el CH_4 [19]. En este trabajo el método de acumulación se ha realizado con el fin de estimar la tasa de exhalación de ^{222}Rn . El proceso del método de acumulación consiste en sellar herméticamente con una caja o vitrina de dimensiones conocidas el suelo para que el radón exhalado se vaya acumulando en el interior de la cámara hasta llegar a un valor de concentración de saturación. A continuación, en la figura 3.1, se muestra un esquema simple de cómo funciona el método de acumulación:

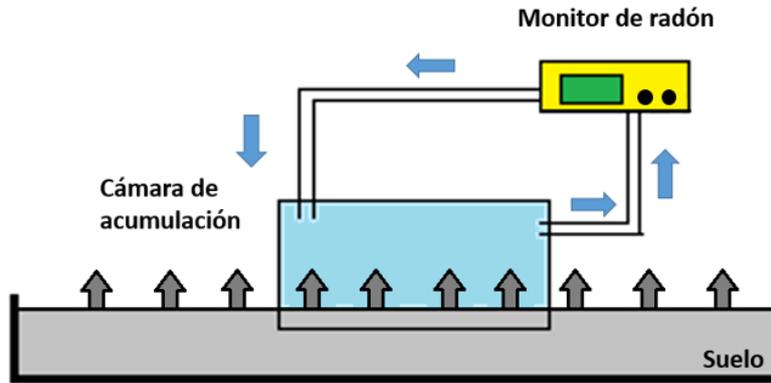


Figura 3.1: Esquema que representa el método de acumulación.

Los átomos de radón exhalados desde el suelo quedan retenidos en el interior de la cámara, resultando una acumulación gradual de la concentración de radón. Esta concentración de radón se mide en varios intervalos regulares durante el tiempo que se estime correcto mediante un medidor de radón que muestrea el aire contenido en la cámara. A partir de la evolución temporal de dicha acumulación se puede obtener la exhalación.

La variación de la concentración de radón con el tiempo se ve afectada por factores como pueden ser la desintegración del propio radón, la tasa de exhalación superficial relativa, el volumen de la cámara de acumulación, las posibles fugas que existan o la retrodifusión. Así, la variación temporal de la concentración de gas radón en el interior de la cámara se rige por una ecuación diferencial ordinaria de primer orden:

$$\frac{dC_{Rn}}{dt} = \frac{ES}{V} - (\lambda + \lambda_e + \lambda_v)C_{Rn} \quad (3.1)$$

donde C_{Rn} es la concentración de radón (Bq m^{-3}), t es el tiempo medido en horas, E es la tasa de exhalación superficial de radón ($\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), que se define como la concentración de radón liberado por unidad de superficie durante una unidad de tiempo. El parámetro λ es la constante de desintegración del radón ($\lambda = 0.0076 \text{ h}^{-1}$), λ_e representa la retrodifusión que pueda existir y λ_v es el parámetro que tiene en cuenta las posibles fugas por ventilación en la cámara de acumulación. S es la superficie de exhalación (m^2) y V es el volumen del contenedor de acumulación (m^3).

Con el fin de simplificar la ecuación 3.1, se expresará ésta en función de la altura del volumen de aire interno, desde la superficie del suelo hasta el techo de la parte superior del contenedor del contenedor h (m), ya que es la relación del volumen del cajón entre la superficie de exhalación $\frac{V}{S} = h$. También se utilizará la constante λ' que recogerá la constante de radón y las posibles fugas y retrodifusión dentro de la cámara de acumulación siendo, por tanto, $\lambda' = \lambda + \lambda_e + \lambda_v$ (h^{-1}). La expresión sería en este caso:

$$\frac{dC_{Rn}}{dt} = \frac{E}{h} - \lambda' C_{Rn} \quad (3.2)$$

Si se resuelve la ecuación diferencial 3.2, se obtiene la siguiente expresión:

$$C_{Rn}(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda' \cdot t} + \frac{E}{h\lambda'} \cdot (1 - e^{-\lambda' \cdot t}) \quad (3.3)$$

siendo C_0 la concentración inicial de radón en el interior de la cámara de acumulación.

En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de una acumulación de concentración de radón durante un periodo de tiempo en el interior de una cámara de acumulación. Esta acumulación se representa en función de la expresión 3.3:

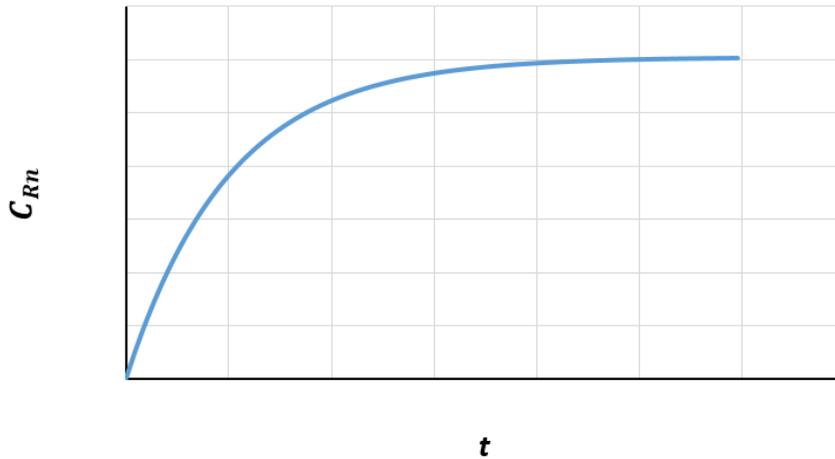


Figura 3.2: Variación de la concentración de radón en el tiempo en una cámara de acumulación según la ecuación 3.3.

Se puede apreciar en la figura 3.2 que el comportamiento de la acumulación se puede llegar a considerar lineal en los primeros intervalos de tiempo y, a partir de que vaya avanzando el tiempo, se pierde dicha linealidad. Alcanzado un momento, se alcanza la concentración de radón límite o de saturación, llegando a una concentración estable, se mantendrá dicho valor en el tiempo mientras no se alteren las condiciones de la cámara.

Finalmente, realizando un ajuste matemático no lineal según la ecuación 3.3, se obtienen los parámetros de la curva: $\lambda' C_0$ y $f = \frac{E}{h}$. Si se despeja la tasa de exhalación de radón del segundo parámetro mencionado, se puede obtener su valor:

$$E = f \cdot h \quad (3.4)$$

donde cabe destacar que la expresión 3.4 se puede reescribir en función de la concentración máxima o de saturación C_{sat} que alcanza el radón cuando se está acumulando dentro de la cámara de acumulación ya que $C_{sat} = f/\lambda'$.

En relación con la expresión 3.3, pueden llegar a ocurrir dos situaciones en las que la ecuación 3.3 se podría simplificar: cuando la concentración de saturación de radón es varios órdenes de magnitud mayor que la concentración inicial ($C_{sat} \gg C_0$), se puede suponer que C_0 es despreciable en comparación con C_{sat} . Si además se cumple que el tiempo de acumulación de radón es corto comparado con la inversa de las fugas totales ($t \ll \lambda'^{-1}$), la fase de acumulación 3.4 puede aproximarse a un crecimiento lineal de la concentración de radón en la cámara de acumulación como:

$$E = h \frac{\Delta C_{Rn}}{t} \quad (3.5)$$

La aplicación sistemática de la ecuación anterior puede conducir a estimaciones erróneas de tasas de exhalación. Sin embargo, la elección de una u otra expresión se basa principalmente en las fugas que tenga el sistema. En intercomparaciones llevadas a cabo, se observa que cuando no hay fugas $\lambda' \approx \lambda$, el comportamiento de la concentración de radón es lineal a lo largo de las primeras horas de acumulación. Por el contrario, cuando se aprecia que $\lambda' > \lambda$, la tendencia de la concentración de radón diverge del comportamiento lineal con el tiempo, de forma que, proporcionalmente al aumento de λ' , el periodo lineal de las curvas disminuye [20]. Por lo tanto, en general se utilizará la expresión 3.3 para establecer la tasa de exhalación de referencia experimental [21].

3.2. Suelo de referencia

El propósito en este apartado será tener una superficie de referencia de exhalación de radón para posteriormente realizar modificaciones ambientales y comparar los resultados. Para obtener un valor de referencia de la exhalación de radón, se ha construido un suelo de referencia usando un material cuyas características son conocidas. El material elegido para analizar la exhalación de radón fue el suelo de las minas de

fosfato de Bucraa, Marruecos, ya que las rocas de fosfatos tienen un alto contenido en trazas de materiales radiactivos tales como uranio o radio, lo que es adecuado para los análisis y estudios del radón que se pretenden hacer en este trabajo [22].

Para preparar el dispositivo lo primero que se hizo fue un secado y una homogeneización del suelo de Brucraa, como se puede apreciar en la figura 3.3, para después verterlo en un recipiente metálico como se aprecia en la imagen de la derecha de la figura 3.3:



Figura 3.3: Imágenes del proceso de homogeneización. La imagen de la izquierda se realizó durante el cribado y homogeneización mientras que la imagen de la derecha está tomada cuando el suelo está listo para ser analizado.

El proceso de homogeneización es un punto clave en la fase de configuración, ya que cuando el suelo se coloca dentro del contenedor de exhalación, debe ser homogéneo con el fin de garantizar que el radón escape por la superficie superior de manera uniforme. Finalmente, se colocó un monitor de radón en el centro de la superficie del suelo.

Para obtener un valor de referencia de la tasa de exhalación de radón del suelo mencionado de forma experimental, se sella herméticamente el suelo mediante una tapa metálica. De este modo, la parte superior del cajón metálico hace de cámara de acumulación, como se puede apreciar en la imagen de la figura 3.4 y, entonces, sería posible utilizar el método de acumulación para medir la exhalación del suelo de referencia. Para realizar otra acumulación, lo primero que se hace es abrir la cámara de acumulación quitando la tapa, consiguiendo así que se libere el radón acumulado de la anterior medición. Después de unas horas, se volvería a sellar herméticamente y se procede de la misma forma. En la figura 3.4 se muestra un esquema del dispositivo:

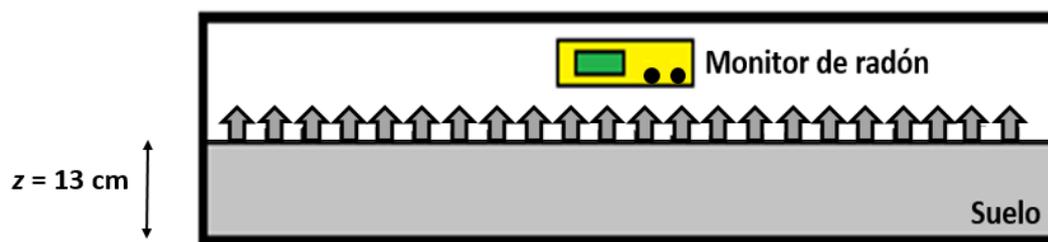


Figura 3.4: Esquema del dispositivo utilizado para la medición de la tasa de exhalación de radón del suelo de exhalación. z es el espesor del suelo.

La configuración montada para la realización del método experimental en el laboratorio consta de dos cajas de cinco placas soldadas de acero inoxidable cada una permitiendo esta configuración evitar las fugas a través de las placas y obligando al radón a escapar hacia la tapa superior de la cámara. La altura del volumen de aire interno, desde la superficie del suelo hasta el techo de la parte superior de la cámara, es de 24cm. La exhalación del suelo se medirá mediante el método de acumulación. El diseño y disposición de la cámara de exhalación se muestra en la figura 3.5



Figura 3.5: Imágenes del dispositivo exhalation bed utilizado.

3.3. Expresión teórica de la tasa de exhalación

La tasa de exhalación de radón del suelo referencia también se puede obtener de forma teórica a partir de la resolución de la ecuación de difusión [23]:

$$E = \epsilon\rho\lambda C_{Ra}L \tanh\left(\frac{z}{L}\right) \quad (3.6)$$

donde ϵ es el factor de emanación (adimensional), ρ representa la densidad aparente (kg/m^3), λ corresponde a la constante de desintegración del radón (0.0076h^{-1}) [23], C_{Ra} es la concentración de radio (Bq/kg), L corresponde a la longitud de difusión (m) y z es el espesor del suelo (m).

Cuando el espesor del suelo es mucho más pequeño que la longitud de difusión del radón, es decir cuando $z \ll L$, se puede aplicar la aproximación $\tanh\left(\frac{z}{L}\right) \approx \frac{z}{L}$ a la ecuación de difusión, resultando la expresión que da lugar a la tasa de exhalación de radón de la siguiente manera [21]:

$$E = \rho\epsilon\lambda C_{Ra}z \quad (3.7)$$

A continuación se explicará cómo se ha obtenido cada parámetro de la expresión de la tasa de exhalación de radón y, para finalizar, se mostrarán los valores de cada parámetro y la expresión final de la exhalación de radón 3.6.

3.3.1. Densidad

La densidad aparente se define como la masa seca del suelo por unidad de volumen del suelo inalterado, es decir, como se encuentra de forma natural [24]. Para la obtención de su valor en el caso del suelo de Bucraa, se vierte una porción del suelo previamente secado en un recipiente, por ejemplo una probeta, hasta alcanzar un volumen V determinado por nosotros. Después se pesa la probeta, previamente tarada, en una balanza de precisión obteniendo así la masa seca del suelo m . Finalmente, el valor de la densidad aparente del suelo se obtiene a partir de la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.8)$$

3.3.2. Factor de emanación

El factor de emanación se define como la fracción de átomos de radón generados que escapan de la fase sólida en la que se forman y quedan libres para transportarse a través del medio. Dicho de otra manera, es la relación entre la actividad de radón que se escapa a los espacios porosos del suelo y del radio del mismo:

$$\epsilon = \frac{A_{Rn}}{A_{Ra}} \quad (3.9)$$

Mientras que la actividad de radio se puede medir utilizando espectrometría gamma, la actividad de radón que se escapa de la muestra se mide utilizando comúnmente un contenedor hermético de acero inoxidable, con un volumen conocido, debido al aumento de la concentración de radón en su interior [21].

La actividad del radón se obtuvo cerrando una muestra del suelo ($M = 300$ g) en un recipiente de acero inoxidable herméticamente cerrado de volumen $V = 0,028\text{m}^3$ que se puede apreciar en la figura 3.6

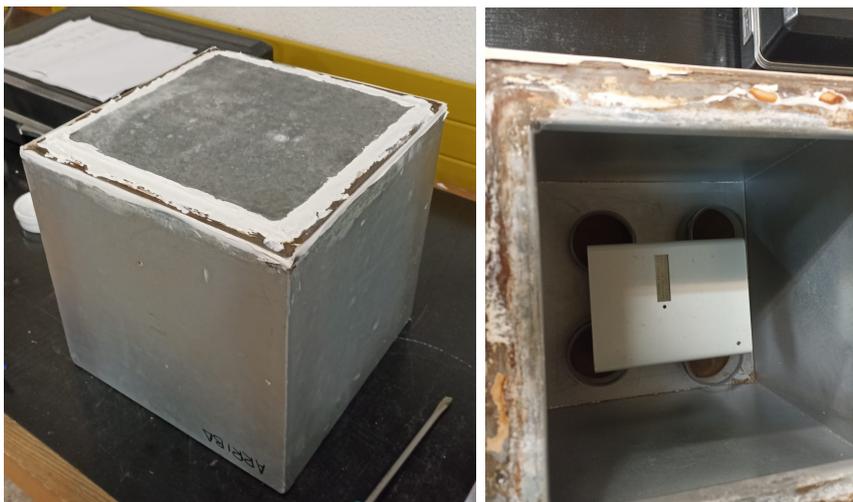


Figura 3.6: Imágenes de la caja utilizada para poder sellar herméticamente las 4 muestras del suelo estudiado.

y haciendo el ajuste exponencial:

$$C_{Rn} = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{f}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.10)$$

tomándose en este caso la producción de la fuente que se tiene en $\text{Bqm}^{-3}\text{h}^{-1}$. Con el crecimiento de radón en la caja, se puede obtener el factor de emanación del suelo estudiado. Considerando una muestra de una masa determinada M , se puede obtener el factor de emanación ϵ como:

$$\epsilon = \frac{A_{Rn}}{A_{Ra}} = \frac{f \cdot V}{\lambda C_{Ra} M} \quad (3.11)$$

3.3.3. Concentración de radio

La concentración de radio del suelo de la cámara de exhalación se obtuvo por espectrometría gamma. Para determinar la concentración del ^{222}Rn se utilizan las emisiones de radiación gamma de los isótopos ^{214}Pb y ^{214}Bi . Estos son descendientes de vida corta del radón con el que alcanzan el equilibrio secular. Las muestras se cerraron herméticamente en un recipiente cilíndrico durante un mes para alcanzar el equilibrio

de radón y radio. Posteriormente se midió el equilibrio de radio en un detector coaxial gamma HPGe de alta resolución (modelo GL-2015-7500, Canberra, EE. UU.) [25]

3.3.4. Longitud de difusión

La longitud de difusión se define como una medida de la distancia media recorrida por los átomos de radón en la matriz de residuos antes de su desintegración radiactiva [5].

Éste parámetro viene dado por la siguiente ecuación:

$$L = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (3.12)$$

donde D es el coeficiente de difusión de radón. Esto indica que para obtener la longitud de difusión será imprescindible conocer el valor del coeficiente de difusión de radón. Este coeficiente se rige por la siguiente expresión [5]:

$$D = D_{aire} \cdot p \cdot \exp(-6wp - 6w^{14p}) \quad (3.13)$$

siendo D_{aire} el coeficiente de difusión de radón en el aire ($1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), w la saturación de agua en el suelo y p la porosidad de la muestra.

Para conocer la saturación de agua w que tiene el suelo en cuestión, es necesario obtener previamente cuál es la humedad relativa m que hay en el mismo, como se puede apreciar en la siguiente expresión[5]:

$$w = \frac{\rho \cdot m}{\rho_w \cdot p} \quad (3.14)$$

donde ρ_w es la densidad del agua ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$).

Se sabe que el contenido de humedad tiene un fuerte efecto sobre el coeficiente de emanación. Esto se debe a que los rangos típicos de retroceso en el agua son mucho menores que en el aire y, por tanto, el agua es más eficaz para detener los átomos de radón dentro del espacio de los poros. En los residuos secos, el coeficiente de emanación es relativamente bajo porque la mayoría de los átomos de radón que escapan de las partículas se entierran en las partículas adyacentes. A medida que el contenido de humedad aumenta, los poros contienen más agua y es más probable que un átomo en retroceso termine su retroceso en el poro [26]. A mayor contenido de humedad (por encima del 5 % en volumen), pocos de los átomos pueden penetrar en una partícula adyacente y el coeficiente de emanación se mantiene casi constante con el aumento de la humedad hasta saturación. En general, los coeficientes de emanación en los residuos saturados son de 2 a 6 veces mayores que en los residuos secos [5].

Para la obtención de la humedad relativa m en porcentaje, se sigue la expresión que relaciona una fracción de masa del suelo con otra pero de suelo seco el cual se seca entorno a 1 día en un horno a 105 °C. La expresión es la siguiente:

$$m(\%) = \frac{M_{(humedo)} - M_{seco}}{M_{seco}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Finalmente, se necesita obtener el último parámetro de la expresión 3.12. La porosidad de los suelos habitualmente se determina de forma indirecta a partir del valor de la densidad aparente [27]. La expresión para obtener la porosidad del suelo que ha sido estudiado es:

$$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_g} \quad (3.16)$$

siendo ρ_g la densidad real o de grano.

La densidad aparente ρ ya ha sido explicada en un apartado anterior. La densidad real o de grano se obtiene a partir de una muestra del suelo con masa conocida, se vierte en un recipiente (en nuestro caso una probeta) con agua (el volumen determinado) y se comprueba el aumento del volumen de agua que se ha producido. Por tanto la relación que nos da el valor de la densidad real es: $\frac{m_{(suelo)}}{\Delta V}$, donde $\Delta V = V_{(suelo+agua)} - V_{agua}$.

3.4. Equipos e instrumentos utilizados

3.4.1. Cámara de acumulación

Para comparar distintos equipos se ha utilizado el método de acumulación que consta de una vitrina de altura $h = 34$ cm con una salida en su tapa superior para facilitar el purgado. También posee dos orificios laterales donde se colocan los tubos que unen la vitrina al monitor de radón o a la bomba de aire según lo que se quiera realizar. En la figura 3.7, se puede observar la vitrina descrita:



Figura 3.7: Dispositivo utilizando la vitrina para las medidas realizadas por el método de acumulación.

El proceso de medida consiste en conectar el monitor de radón a la cámara de acumulación en circuito cerrado. A partir de este momento se empieza a acumular el radón siguiendo la ley exponencial 3.3. Una vez realizada la acumulación, si se quiere hacer una nueva, es necesario purgar el radón del interior de la cámara. Para ello, se utiliza una bomba conectada en circuito abierto, es decir, se deja una abertura en la vitrina para que el aire interior pueda salir al exterior. La bomba entonces extrae el aire del interior de la cámara. Cabe destacar que los monitores de radón también se pueden colocar en el interior de la cámara de acumulación.

De acuerdo con la ecuación 3.3, se comprueba que es necesario conocer de forma precisa la concentración inicial en la cámara de acumulación (vitrina). Para conseguir determinar la concentración inicial con exactitud, se sigue el siguiente proceso: en primer lugar es necesario muestrear el aire en el interior de la cámara mientras se está introduciendo aire del exterior mediante el uso de una bomba. El proceso de purgado se realiza porque no es recomendable levantar la vitrina cada vez que se termina un experimento ya que esto implicaría pequeños cambios en las condiciones de medida debido a que se formaría grietas en el suelo, se anclaría a distinta profundidad, etc.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo gráfico de cómo aumenta la acumulación hasta llegado un punto donde ya se satura, la concentración de radón alcanza su valor máximo y, posteriormente, para poder realizar una nueva acumulación, se desgasifica la vitrina implicando esto una disminución de la concentración hasta un valor cercano al valor nulo.

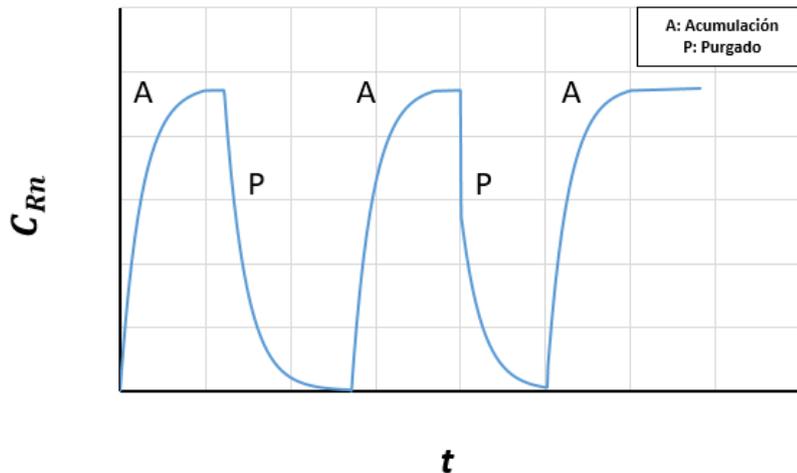


Figura 3.8: Representación gráfica del método de acumulación para observar cómo se acumula el radón y el purgado del aire del interior de la vitrina.

3.4.2. Monitores de radón

Se han utilizado tres monitores de radón con el fin de comparar la capacidad de cada uno de ellos para medir tasas de exhalación. Los monitores de radiaciones ionizantes basan su funcionamiento en alguno de los diferentes procesos que existen de interacción de la radiación con la materia. En base a cuáles son los objetivos de cada medida, se debe escoger el monitor y el método más adecuado entre las diferentes posibilidades existentes. Las técnicas de medida de radón se fundamentan en la detección de la radiación emitida por el radón o por sus descendientes, y a partir de éstas, se determina la concentración de actividad de radón presente en la muestra. En este caso se diferencian dos tipos de monitores de radón: los monitores basados en cámaras de ionización o células de centelleo y los monitores de estado sólido. De entre ambos tipos de monitores, los monitores de radón utilizados en el laboratorio son monitores de estado sólido [28].

Los detectores de estado sólido o de semiconductor son los más utilizados en espectroscopía debido a que poseen una excelente resolución, alta eficiencia, simplicidad, rapidez de respuesta, linealidad y bajo coste. Bajo el efecto de un campo eléctrico, los electrones y los huecos se desplazan hacia unos electrodos, produciendo así pulsos eléctricos que pueden ser medidos. El paso de una partícula ionizante por la zona activa del detector de semiconductor genera pares electrón-hueco por la ionización de los átomos, desplazándose estos pares en direcciones opuestas según el campo eléctrico en el semiconductor. Esto genera un pulso eléctrico siendo una señal generada por el detector. El tamaño del pulso generado depende de la energía y cantidad de partículas detectadas.

La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores no es muy grande, lo que se traduce en una mejor resolución del monitor.

Además de esto, la alta movilidad de los electrones y huecos en este tipo de monitores permite un tiempo de recolección de cargas muy corto. Sin embargo, la alta conductividad de los semiconductores, introduce ruido que reduce la capacidad de detección de partículas de baja energía.

Los materiales más utilizados para este tipo de detectores son el germanio y el silicio. Los detectores de germanio son utilizados para la detección de radiación gamma y requieren de un sistema de refrigeración (la respuesta del monitor tiene una gran dependencia con la temperatura), mientras que los detectores de silicio se utilizan para partículas alfa o beta y no tienen el problema de la temperatura. Las dimensiones de los monitores de semiconductor son mucho menores que la de los gaseosos debido a que los semiconductores son varios órdenes de magnitud más densos que los gases. Esto conlleva una considerable mejora en la eficiencia de detección por unidad de volumen del monitor.

A continuación se describe cada uno de los monitores de radón utilizados.

RTM

El dispositivo RTM 2200 es un detector semiconductor, fabricado por la empresa SARAD, para medir de manera continua en función del tiempo la concentración de los isótopos ^{222}Rn y ^{220}Rn , la temperatura ambiente, la humedad relativa, la presión atmosférica y el flujo de aire que entra en el dispositivo, mediante sensores internos. La sensibilidad de este monitor de radón está comprendida entre 3 y 7 cpm/kBq/m³ y su rango va de 0 a 10 MBq/m³. Se puede observar el dispositivo en la figura 3.9:



Figura 3.9: Monitor de radón RTM 2200

En cuanto a la medida de radón, ésta comienza con una bomba interior que genera una corriente de aire que introduce el radón al interior de la cámara. En ese proceso, hay dos etapas de filtros previos que impiden que los descendientes del radón entren dentro del dispositivo de medida. Finalmente, dos electrodos de alto voltaje crean una

diferencia de potencial entre la pared de la cámara y el detector de silicio. Durante la cadena de desintegración que comprende del ^{222}Rn a su descendiente ^{218}Po , éste se ioniza. Como consecuencia de la existencia de una diferencia de potencial, los descendientes del radón se adhieren a la superficie del detector. La desintegración alfa de dichos descendientes de vida corta es registrada por el monitor. Por todo lo anteriormente comentado, una medida del contaje de pulsos debidos a la desintegración del ^{218}Po es una medida de la concentración del ^{222}Rn respectivamente [29].

La medición de la concentración de actividad de radón requiere siempre un intervalo de integración. Todas las desintegraciones detectadas se contarán en ese intervalo como medida de la actividad. El RTM 2200 tiene 5 intervalos de integración posibles: 1', 5', 15', 30' y 1 h.

Para cualquier medición de radón utilizando el RTM 2200, se presentan dos resultados:

- **Radon fast:** Sólo se utiliza el descendiente de la desintegración directa, el ^{218}Po , para determinar la concentración de actividad de radón. El tiempo de respuesta es de 12 minutos. Sin embargo, la fluctuación estadística será mayor en comparación con el “Radon slow” debido al menor número de desintegraciones incluidas en el cálculo.
- **Radon slow:** En este caso se utilizan los dos descendientes de vida corta del radón, el ^{214}Po y el ^{218}Po , para determinar la concentración de actividad de radón. Esto implica que las fluctuaciones estadísticas son menores pero el tiempo de respuesta es de 2 horas debido a los tiempos de vida media de la cadena de desintegración hasta el ^{214}Po .

El tiempo de respuesta se define como el periodo de tiempo que el dispositivo necesita para mostrar el valor correcto, tras un cambio, de la concentración de actividad de radón en el aire medido. Dicho tiempo no es un parámetro específico del instrumento, sino que resulta de los tiempos de vida media de los productos de desintegración. El valor “Radon fast” debe utilizarse si se observan cambios rápidos de concentración en concentraciones de radón medias y altas. Para esta medición lo ideal es seleccionar un intervalo de integración de 10 o 15 minutos. En condiciones relativamente constantes, tras dos horas se alcanza el estado de equilibrio y ambos resultados deberían mostrar un valor bastante similar [30].

En este trabajo y, con la finalidad de mejorar la respuesta del equipo y que los resultados sean los más ajustados a la realidad, se ha determinado que se elegirá solo la medida del Radon fast.

Radon Scout

El monitor Radon Scout, fabricado por la empresa SARAD, es un dispositivo versátil, fácil de usar, centrado en la detección de radón (^{222}Rn) en el aire ambiente. Además de la concentración de actividad de radón, el instrumento mide la temperatura del aire, la humedad relativa y la presión barométrica. La sensibilidad de este monitor de radón es de 1.8 cpm/kBq/m^3 y su rango de medida comprende entre 0 y 2 MBq/m^3 . Con este monitor se pueden utilizar tres tiempos de integración para las medidas: 1h, 2h y 3h. Se puede observar el dispositivo en la figura 3.10:



Figura 3.10: Monitor de radón SCOUT

A diferencia del monitor RTM 2200, el Radon Scout mide el radón por difusión, esto implica que no se utiliza ninguna bomba para desplazar el gas. Con esto se consigue excluir la posible influencia de uno de sus descendientes, el torón. La cámara de medida está equipada con un detector de semiconductor de alto voltaje y no muestra ninguna sensibilidad con la humedad ambiental.

Como ya se ha comentado anteriormente, al tratarse de un monitor de estado sólido, en su interior el gas radón es sometido a un campo electrostático. Este campo es generado entre la pared de la cámara y la superficie del monitor semiconductor de silicio, formando un par de electrodos alimentados con alto voltaje. Durante el tiempo que dura la desintegración alfa del ^{222}Rn , los radionucleidos derivados son ionizados y dirigidos hacia la superficie del monitor (bajo la influencia de las fuerzas del campo). El monitor entonces registra la desintegración alfa de los descendientes de vida corta del radón, de forma que el número de pulsos contados proporciona una medida de la concentración de radón en la muestra de aire que se está analizando [31].

AlphaE

El monitor AlphaE, fabricado por la empresa Saphymo, es un dispositivo ligero y portátil utilizado para controlar la exposición y la dosis personal de radón así como la vigilancia de radón a corto/largo plazo en interiores, cuevas o minas. La sensibilidad de este monitor de radón es de 0.5 cpm/kBq/m^3 y su rango de medida va de 0 a 10

MBq/m³. El AlphaE tiene la posibilidad de utilizar tiempos de integración que van desde 1' hasta las 12h. A continuación, en la figura 3.11, se muestra una imagen del monitor:



Figura 3.11: Monitor de radón AlphaE

El monitor AlphaE se basa en una cámara de difusión de diodos de silicio. El gas radón se difunde a través de los orificios de la caja hacia el interior de la cámara de difusión. Como los orificios están totalmente cubiertos por una membrana de Gore-Tex, sólo el gas radón puede entrar en la cámara mientras que los productos de desintegración, también llamados descendientes del radón (Polonio, Plomo, Bismuto), son retenidos por el filtro. Por tanto, la medición funciona independientemente de las fluctuaciones de los parámetros externos como pueden ser la concentración de aerosoles o la humedad del aire. Este hecho es importante ya que estos factores tienen un gran impacto en la medición de los descendientes del radón, pero no influyen en el mismo.

La radiación alfa emitida durante la desintegración del Radón-222 se registra por el monitor de silicio. Sin embargo, junto con la desintegración del Radón-222 también sus descendientes se desarrollan en el interior de la cámara y se separan en sus paredes. La radiación alfa causada por los descendientes del Radón al desintegrarse es proporcional a la concentración de Radón-222 en el interior de la cámara. Su contribución a la radiación representa la mayor parte de la señal. Los impulsos de tensión generados por el monitor de silicio son posteriormente amplificados, contados, convertidos a las unidades requeridas y almacenados por el microcontrolador de acuerdo con el ciclo de medición predefinido [32].

3.4.3. Otros dispositivos utilizados

Sensores de temperatura y bombillas de luz infrarroja

Se ha intentado representar en el laboratorio las variaciones diurnas que afectan a la exhalación de radón del suelo, produciendo un mínimo de presión al mediodía.

Es de esperar que el flujo de radón muestre variaciones diurnas debido a varios sucesos: el primero es que la onda de presión diurna produce un mínimo en la presión por la tarde; el segundo es que la mezcla turbulenta en la atmósfera produce un aumento del flujo durante el día; y la tercera es que las diferencias de temperatura en el suelo entre el día y la noche provocan los cambios en el flujo convectivo [33].

Para comprobar tales variaciones en la exhalación de radón del suelo, se colocaron tres bombillas de luz infrarroja en un determinada disposición de manera que el suelo quedase calentado de manera homogénea. Se probó con dos disposiciones distintas mostradas en la figura 3.12:

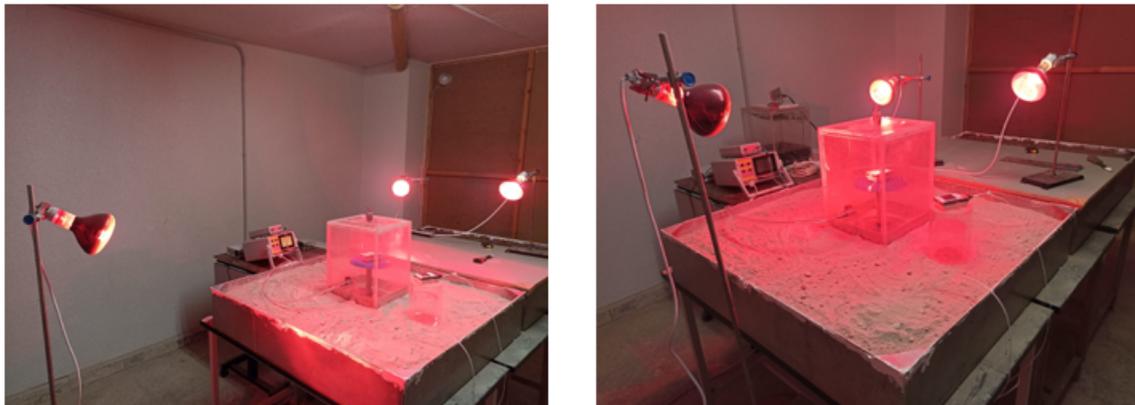


Figura 3.12: Imágenes de las dos disposiciones de las lámparas de infrarrojos para obtener distintas temperaturas del suelo.

Por tanto, en la parte de resultados se expondrán los valores de las tasas de exhalación del suelo mediante tres situaciones distintas recreadas dentro del laboratorio. La primera situación será tomar medidas de la concentración de radón sin hacer uso de las bombillas, es decir, trabajar con las condiciones ambientales del laboratorio. Después se conectarán las luces infrarrojas y se pondrán en una determinada posición (no muy cercana a la vitrina). Por último, la tercera situación consistirá en acercar las bombillas con el fin de recrear una mayor temperatura en la vitrina.

Para medir la temperatura se contó con dos medidores de temperatura del modelo Testo 175T2, uno situado en el interior de la vitrina para medir la temperatura en su interior y otro unido a un sensor que se situó de manera horizontal en el interior del

suelo (así todos los puntos del sensor están teóricamente a la misma temperatura) para medir la temperatura del suelo. Se muestra a continuación, en la figura 3.13, la imagen del sensor utilizados:



Figura 3.13: Sensor de temperatura de la compañía Testo.

Sensores de viento y ventilador de dos velocidades

No se sabe con certeza qué importancia tiene la velocidad del viento en la determinación de la exhalación de radón. La incertidumbre se debe en parte por el hecho de que los dispositivos de medición del flujo de radón interrumpen el flujo de aire a través del material el cual se está midiendo. Por tanto, no es posible estar seguro de que el flujo del material sea el mismo que “debería” ser si el dispositivo de medición del flujo estuviera allí. En estudios realizados sobre este tema, no se ha encontrado ninguna correlación evidente entre la velocidad del viento y la exhalación de radón del suelo a velocidades de viento muy bajas que normalmente se producen cerca de la superficie del suelo. Sin embargo, a velocidades del viento anormalmente altas, el flujo aumentaba linealmente con la velocidad [33].

Para comprobar las variaciones de la exhalación de radón con cambios en la velocidad del viento, se dispuso de un sensor de viento de la empresa Testo. El testo 440 se utiliza para la medición de parámetros relacionados con la climatización. Es ideal para ejecutar mediciones del nivel de confort con el fin de evaluar lugares de trabajo y para ejecutar mediciones del flujo en sistemas de ventilación y climatización y sus alrededores. Además viene con una pantalla donde podemos monitorizar y conocer cuál es la velocidad del viento, la temperatura ambiente e incluso la diferencia de presión del aire [34]. Se pueden observar en la figura 3.14:



Figura 3.14: Sensor que mide la velocidad del viento y pantalla donde observar los datos.

También se utilizó un ventilador con dos velocidades distintas con el fin de simular cambios en el viento. La disposición en el laboratorio se muestra en la figura 3.15:

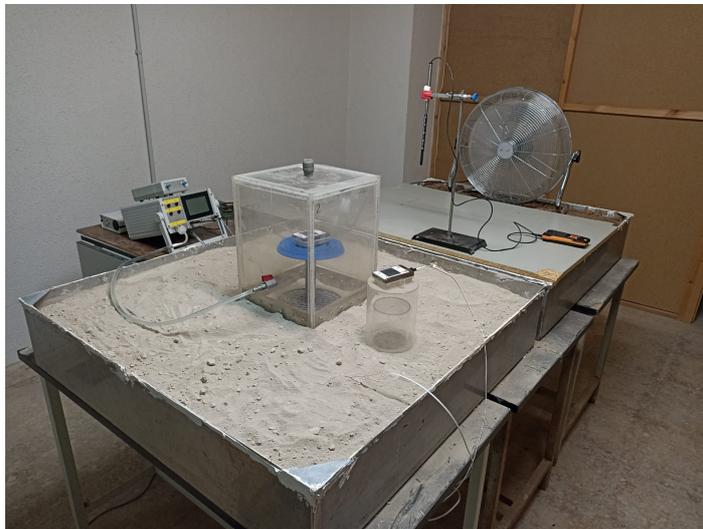


Figura 3.15: Disposición en el laboratorio del ventilador y sensor para las medidas de concentración de radón con cambios en la velocidad del viento.

Bomba de aire

La bomba Alpha Pump, de la empresa Genitron, se utiliza para purgar la cámara de acumulación entre dos mediciones. Ésta bomba introduce aire exterior, con menores concentraciones de radón, en la cámara de acumulación. A continuación, en la figura 3.16, se adjunta la imagen de la bomba de aire:



Figura 3.16: Bomba de aire de la marca Alpha Pump.

4. Resultados y análisis

4.1. Exhalation bed

4.1.1. Método experimental

Con el fin de obtener un valor referencia de la exhalación del suelo de manera experimental, se realizaron varias variaciones estableciéndose el tiempo de integración de cada medida dada por el RTM en una hora.

El ajuste de los datos experimentales se realizó de acuerdo con la ecuación 3.3, pudiendo obtener la tasa de exhalación de radón de la siguiente forma:

$$E = f \cdot h \quad (4.1)$$

mientras que la constante de desintegración λ' se obtiene directamente del ajuste. El valor de la concentración inicial de radón en el interior de la cámara de acumulación se fija siendo el primer valor que da el monitor de radón. A continuación, en la figura 4.1, se muestra un ejemplo del ajuste de una acumulación de concentración de radón:

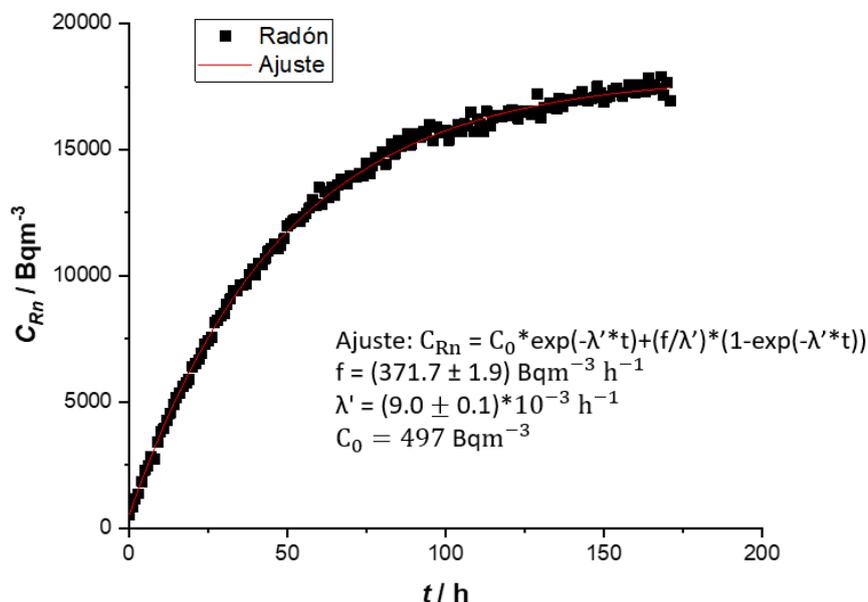


Figura 4.1: Representación gráfica del aumento de radón dentro de la cámara de exhalación en una de las acumulaciones realizadas.

A modo de ejemplo, si al valor de f de la figura 4.1 se le multiplica el valor de la altura ($h = 0.24\text{m}$), se obtiene que el valor de la exhalación de radón en esta

acumulación es: $E = 89.2 \pm 0.5 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

En la tabla 4.1 se recogen los distintos valores de la tasa de exhalación de radón de cada acumulación:

Tabla 4.1: Valores experimentales de las tasas de exhalación de radón obtenidos en cada experimento realizado mediante el método experimental en la exhalation bed. Las incertidumbres de cada valor son dadas por el programa que realiza el ajuste y la incertidumbre de la media es la desviación estándar de la misma.

Experimento	$E / \text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$
1	96.4 ± 0.6
2	92.6 ± 0.2
3	116.4 ± 0.9
4	89.2 ± 0.5
Media	99 ± 12

Haciendo una media de las exhalaciones de todas las acumulaciones realizadas, se obtiene que el valor de la tasa de exhalación de radón es: $\bar{E} = 99 \pm 12 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

4.1.2. Método teórico

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos de cada parámetro que interviene en la expresión 3.6 así como el valor obtenido para la tasa de exhalación de radón.

Densidad

En la tabla 4.2 se recogen los diferentes volúmenes utilizados y sus respectivas masas del suelo, también quedan reflejados los valores de la densidad aparente del suelo:

Tabla 4.2: Datos experimentales de las masas y volúmenes utilizados. También quedan reflejados en la última columna los valores de las densidades obtenidos por cada experimento.

m / g	V / cm^3	$\rho / \text{g/cm}^3$
249.84	50	0.851
295.04	100	0.878
336.74	150	0.863
380.00	200	0.864
422.56	250	0.861

Realizando una media y su desviación típica (los errores tomados han sido $\Delta m = \pm 0.02$ g y $\Delta V = \pm 10$ cm³), se obtiene el valor medio de la densidad aparente del suelo estudiado, que es: $\bar{\rho} = 0.86 \pm 0.03$ g/cm³.

Factor de emanación

En la figura 4.2 se muestra el ajuste de la acumulación de radón dentro de la caja y los valores obtenidos:

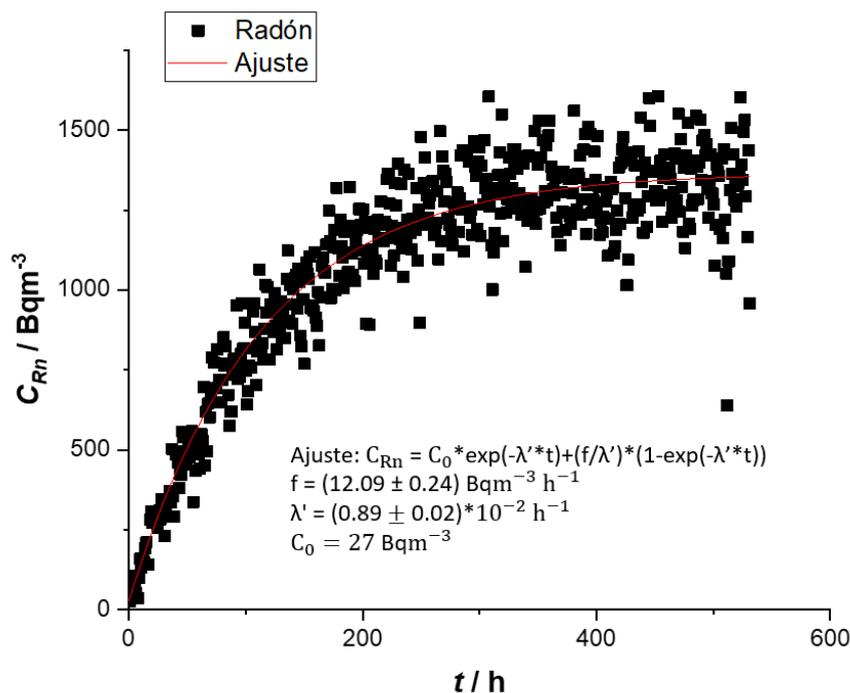


Figura 4.2: Representación gráfica del aumento de radón dentro de la caja con el propósito de obtener el factor de emanación.

Por tanto, sustituyendo los valores de los parámetros que componen la expresión 3.11 (el valor obtenido tras hacer la espectroscopía gamma de la concentración de radio del suelo es: $C_{Ra} = 275 \pm 23$ Bq/kg) y propagando errores, se obtiene el valor del factor de emanación: $\epsilon = 0.46 \pm 0.04$.

Longitud de difusión

En este apartado se irán describiendo los valores de cada parámetro que se necesita para llegar a conocer el valor de la longitud de difusión.

El primer parámetro que se necesita conocer es el de la densidad de grano que, junto con la densidad aparente, se podrá determinar la porosidad del suelo. A continuación, en la tabla 4.3, se muestran los resultados obtenidos en cada medida:

Tabla 4.3: Datos experimentales de las masas y volúmenes utilizados. También quedan reflejados en la última columna los valores de las densidades aparentes obtenidos por cada experimento.

m_{suelo} / g	$\Delta V / \text{cm}^3$	$\rho_g / \text{g/cm}^3$
20	10	2
30	15	2
35	17	2

Realizando una media y su desviación típica (los errores tomados han sido $\Delta m = \pm 0.02 \text{ g}$ y $\Delta V = \pm 10 \text{ cm}^3$), se obtiene el valor medio de la densidad de grano del suelo estudiado, que es: $\bar{\rho}_g = 2.0 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$.

Con estos valores y usando la expresión 3.16, realizando una propagación de errores, el valor de la porosidad obtenido es: $p = 0.57 \pm 0.05$.

Ahora con la finalidad de conocer el contenido en agua del suelo, se obtiene la humedad relativa de la muestra. Introduciendo los respectivos valores de ambas masas ($M_{humedo} = 396.78 \text{ g}$ y $M_{seco} = 372 \text{ g}$), el valor de la humedad relativa es: $m = 6.72 \%$.

Teniendo ya el valor de todos los parámetros de la expresión 3.14, se obtiene el valor de la saturación de agua del suelo que es: $w = 0.10 \pm 0.01$.

Ya sólo queda por determinar el valor del coeficiente de difusión D antes de conocer cuál es la longitud de difusión L . Para ello ya tenemos todos los parámetros calculados, por lo que introduciéndolos el resultado obtenido es: $D = (4.45 \pm 3.35) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Con todo, el valor obtenido de la longitud de difusión es: $L = 1.457 \pm 0.001 \text{ m}$.

Tasa de exhalación de radón

En este momento ya disponemos de los valores de todos los parámetros incluidos en la expresión 3.6, por lo que sin más que sustituirlos se obtiene la tasa de exhalación de radón teórica: $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$. En el caso que $z \ll L$, siguiendo la expresión 3.7, la tasa de exhalación de radón sería: $E = 106 \pm 9 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Por tanto, se puede observar que se asemeja bastante a la obtenida con la expresión 3.6 $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, lo que nos permite comprobar que la aproximación es válida cuando $z \ll L$.

Finalmente cabe destacar que en este caso el valor de la tasa de exhalación de radón obtenida a través de la aproximación teórica cuando $z \ll L$: $E = 106 \pm 9 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ que se asemeja bastante a la obtenida con la expresión 3.6 $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, por lo que se comprueba que la aproximación es válida cuando $z \ll L$.

A continuación se muestra la tabla 4.4 que recoge todos los resultados que son necesarios para la obtención de la tasa de exhalación de radón de forma teórica:

Tabla 4.4: Tabla resumen de los valores de los parámetros que intervienen en la expresión 3.6. La incertidumbre de la exhalación se obtiene mediante propagación de errores de cada uno de los parámetros de la tabla.

Parámetro	Símbolo	Resultado
Densidad	ρ	$0.86 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$
Factor de emanación	ϵ	0.46 ± 0.04
Concentración de radio	C_{Ra}	$275 \pm 23 \text{ Bq/kg}$
Espesor	z	$13.0 \pm 0.5 \text{ cm}$
Constante de desintegración	λ	0.0076 h^{-1}
Longitud de difusión	L	$1.457 \pm 0.001 \text{ m}$
Tasa de exhalación	E	$107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$

En vista de los resultados obtenidos mediante los dos métodos, se pueden extraer conclusiones. En este caso, el valor de la tasa de exhalación de radón en ambos casos es aceptable si se tiene en cuenta la incertidumbre de ambos valores. La tasa de exhalación de radón del suelo según el método experimental es de $\bar{E} = 99 \pm 12 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ y según la forma teórica resulta $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ por tanto coinciden dentro de los márgenes de incertidumbre. Cabe destacar que existe la posibilidad de que la exhalación teórica esté afectada por cambios en la humedad del suelo y por posibles errores en todos los parámetros implicados en esa medida ya que cada uno se obtiene mediante una metodología distinta.

4.2. Comparación de equipos

En este apartado se expondrán los resultados de las tasas de exhalación de radón obtenidas mediante cada monitor de radón para después compararlos y comprobar qué monitor de radón es el más adecuado para medir la tasa de exhalación. Para ello, se realizaron cinco medidas mediante el método de acumulación usando los tres equipos simultáneamente. Éstos se pusieron en las mismas condiciones de medida, es decir, todos midieron en un tiempo de integración de 1h y la concentración inicial de cada una de las medidas se fija siendo ésta el primer valor que da el monitor de radón tras la purga. De esta forma se pudo comprobar los datos que proporcionaba cada monitor para la misma concentración de radón. A continuación, en la figura 4.3, se puede observar las distintas acumulaciones y purgas con uno de los monitores de radón utilizados:

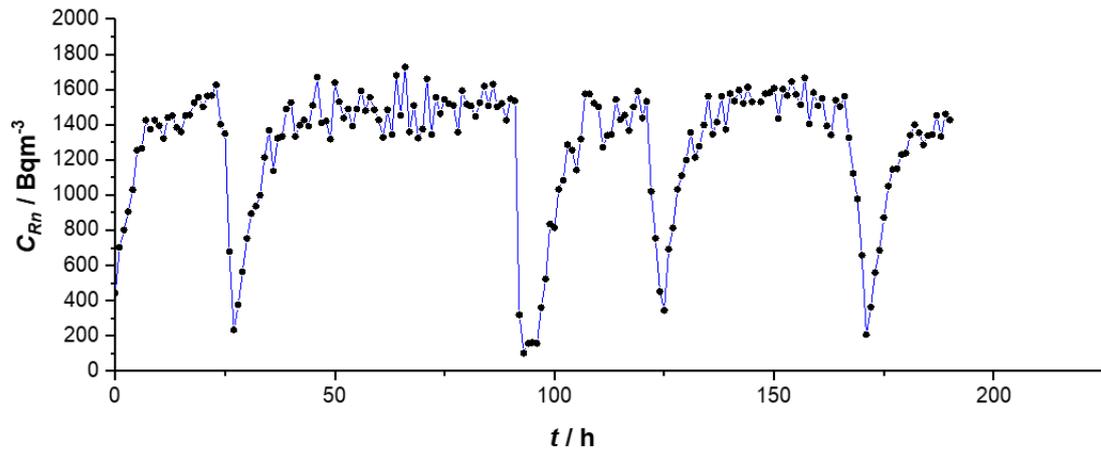


Figura 4.3: Representación gráfica de las distintas acumulaciones de radón y las respectivas purgas de la camara de acumulación.

A modo de ejemplo, en la figura 4.4 se muestra gráficamente la diferencia de acumulaciones tomadas por cada detector en una misma medida:

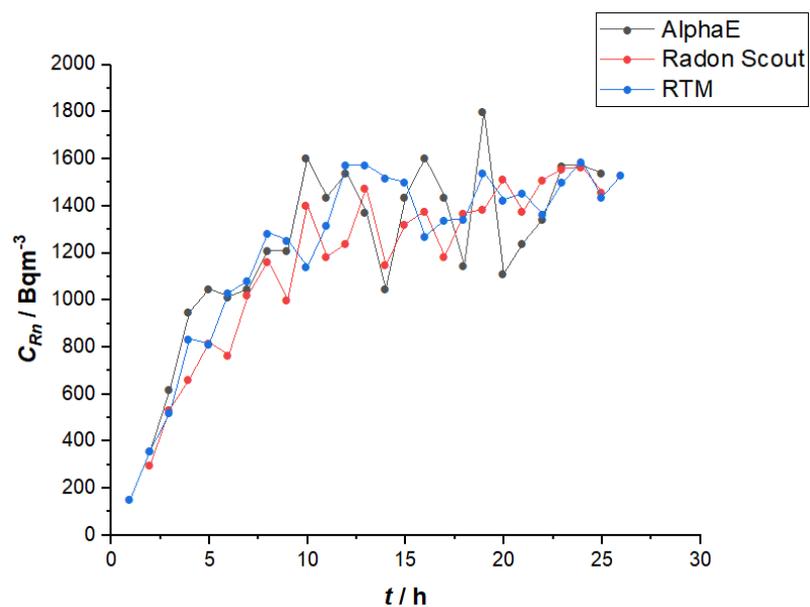


Figura 4.4: Representación gráfica de una acumulación de radón medida por distintos monitores de radón.

Finalmente, en la tabla 4.5, se muestran los valores de las exhalaciones de radón obtenidas mediante los distintos monitores:

Tabla 4.5: Resultados experimentales de las exhalaciones obtenidas mediante cada uno de los dispositivos de medición. Las incertidumbres de cada valor son dadas por el programa que realiza el ajuste y la incertidumbre de la media es la desviación estándar de la misma.

	AlphaE	Radon Scout	RTM
Experimento	$E/\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$	$E/\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$	$E/\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$
1	157 ± 63	109 ± 14	123 ± 10
2	91 ± 21	101 ± 13	94 ± 8
3	145 ± 32	86 ± 9	106 ± 9
4	137 ± 33	103 ± 12	115 ± 13
5	157 ± 43	135 ± 21	113 ± 7
Media	137 ± 27	107 ± 18	110 ± 11

En cuanto a los resultados dados por el AlphaE, $\bar{E} = 137 \pm 27 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, sí que se aprecia que están bastante por encima del valor de referencia del suelo ($\bar{E} = 99 \pm 12 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$). Sin embargo, los valores de exhalación dados mediante el Radon Scout, $\bar{E} = 107 \pm 18 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, son bastante cercanos a dicho valor de referencia, pero tienen una incertidumbre mayor que los que dados por el RTM.

Finalmente, los resultados experimentales mediante el uso del medidor de radón RTM, $\bar{E} = 110 \pm 11 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, están ligeramente por encima del valor de referencia aunque es compatible teniendo en cuenta la incertidumbre del mismo. Esto ha podido deberse a que en estos experimentos no se midió la concentración de radón en el interior de la cámara durante la purga, por lo que el valor de la concentración inicial no está bien determinado y puede haber generado la sobreestimación de la tasa de exhalación. Esto se comprobó en experimentos posteriores, que se pueden observar en el siguiente apartado, donde los resultados obtenidos eran mucho mejores que los obtenidos con el RTM. Con esto y sabiendo que la resolución temporal del RTM puede ser mejor (se pueden escoger tiempos de integración de 10 minutos), se determinó que el RTM es el mejor medidor de radón a utilizar para las mediciones que se quieren realizar.

4.3. Medidas cambiando condiciones ambientales

En esta sección, con el fin de analizar las variaciones en el valor de la tasa de exhalación del suelo, se muestran los resultados obtenidos al realizar mediciones en condiciones ambientales y cambiando parámetros que afectan a la exhalación de radón tales como la temperatura y la velocidad del viento. Para cada acumulación realizada, se aplicó un tiempo de integración del RTM de 10 minutos.

Para las medidas de control o medidas realizadas con las condiciones ambientales del laboratorio, se realizaron 5 experimentos. Sin embargo, para cada cambio de parámetro, ya sea de temperatura o de velocidad del viento, se realizaron 6 mediciones, 3 para cada cambio de parámetro. Esto significa que se modificó los parámetros

ambientales dos veces, es decir, se aplicaron dos disposiciones distintas de las bombillas provocando dos temperaturas distintas T1 (distancia más cercana a la vitrina de las bombillas) y T2 (distancia más alejada de las bombillas a la vitrina) y dos velocidades del viento diferentes V1 (menor velocidad) y V2 (mayor velocidad), aplicadas por el ventilador, con el fin de comprobar realmente el efecto que tenían en la tasa de exhalación de radón del suelo utilizado.

En todas las mediciones se utilizaron tres sensores de temperatura, uno estaba dentro de la vitrina (T_{int}), otro se situó en el exterior (T_{ext}) y el último a 7 cm de profundidad, aproximadamente a la mitad de la altura del suelo (T_{suelo}) en disposición horizontal con el fin de que todos los puntos del sensor midiesen la misma temperatura. Por último, se dispuso de un sensor de viento sólo en las mediciones donde se cambiaba la velocidad del mismo debido a que en las otras mediciones no había viento suficiente que afectase en las medidas de la tasa de exhalación de radón. A continuación, en la tabla 4.6, se muestran todos los resultados de lo anteriormente comentado:

Tabla 4.6: Datos experimentales obtenidos durante los experimentos de control (CX), variando la temperatura (TX) y la velocidad del viento (VX). Las incertidumbres de cada valor de la exhalación son dadas por el programa que realiza el ajuste y las del resto por los sensores.

Experimento	$E/\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$	$T_{int} / \text{°C}$	$T_{ext} / \text{°C}$	$T_{suelo} / \text{°C}$	$v_{viento} / \text{m/s}$
C1	96 ± 10	17.4 ± 0.6	17.3 ± 0.6	16.9 ± 0.2	0 ± 0
C2	94 ± 7	17.4 ± 0.6	17.3 ± 0.6	16.9 ± 0.2	0 ± 0
C3	96 ± 8	17.4 ± 0.6	17.3 ± 0.6	16.9 ± 0.2	0 ± 0
C4	95 ± 9	17.2 ± 0.6	17.0 ± 0.5	16.8 ± 0.1	0 ± 0
C5	95 ± 8	17.4 ± 0.3	17.3 ± 0.3	17.1 ± 0.1	0 ± 0
T1-1	127 ± 14	50.0 ± 0.3	25.1 ± 0.1	22.1 ± 0.2	0 ± 0
T1-2	162 ± 18	50.5 ± 0.3	25.4 ± 0.1	22.4 ± 0.1	0 ± 0
T1-3	165 ± 20	50.3 ± 0.3	25.5 ± 0.1	22.6 ± 0.1	0 ± 0
T2-1	140 ± 11	30.5 ± 0.4	25.9 ± 0.3	22.9 ± 0.1	0 ± 0
T2-2	144 ± 14	30.9 ± 0.1	26.3 ± 0.2	24.2 ± 0.1	0 ± 0
T2-3	169 ± 16	38.2 ± 0.3	25.0 ± 0.2	22.8 ± 0.3	0 ± 0
V1-1	94 ± 11	18.0 ± 0.1	17.9 ± 0.1	17.9 ± 0.1	0.30 ± 0.02
V1-2	97 ± 10	18.2 ± 0.1	18.1 ± 0.1	18.0 ± 0.1	0.31 ± 0.02
V1-3	96 ± 11	18.4 ± 0.0	18.3 ± 0.1	18.3 ± 0.1	0.31 ± 0.01
V2-1	109 ± 10	18.5 ± 0.1	18.3 ± 0.1	18.3 ± 0.0	0.60 ± 0.01
V2-2	88 ± 10	18.5 ± 0.1	18.3 ± 0.1	18.4 ± 0.0	0.62 ± 0.04
V2-3	115 ± 12	18.9 ± 0.1	18.7 ± 0.1	18.6 ± 0.0	0.65 ± 0.16

A partir de los resultados recogidos en la tabla 4.6, se han calculado la media de las tasas de exhalación de cada cambio de parámetro para poder apreciar los cambios de forma mucho más clara. A lo largo de la toma de medidas en el laboratorio, han surgido una serie de inconvenientes que han provocado que alguna de las tasas de exhalación de la tabla 4.6 no sean representativas. Uno de los inconvenientes que se produjeron

fue que se acumulaba humedad en los tubos que conectaban el monitor RTM con la vitrina provocando que se dejaran de tomar medidas de la concentración de radón en el interior de la misma antes de lo previsto. Para posibles medidas futuras, se podría añadir una trampa de agua que impidiese que se condensase el agua en el interior de los tubos debido a las altas temperaturas que se aplican. A continuación, en la tabla 4.7 y en la figura 4.5, se muestran los datos de las medias de los valores de la tabla 4.6:

Tabla 4.7: Medias de las tasas de exhalación de radón, de las temperaturas y velocidades del viento dadas por los distintos sensores obtenidas durante los experimentos de control (C), variando la temperatura (TX) y el viento (VX). La incertidumbre de la media de la tasa de exhalación de cada experimento es la desviación estándar de la misma.

Experimento	$\bar{E}/\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$	$\bar{T}_{int}/\text{°C}$	$\bar{T}_{ext}/\text{°C}$	$\bar{T}_{suelo}/\text{°C}$	$\bar{v}_{viento}/\text{m/s}$
C	95 ± 1	17.4 ± 0.1	17.2 ± 0.1	16.9 ± 0.1	0 ± 0
T1	151 ± 21	50.3 ± 0.3	25.3 ± 0.2	22.4 ± 0.3	0 ± 0
T2	142 ± 3	30.7 ± 0.3	26.1 ± 0.3	23.6 ± 0.9	0 ± 0
V1	96 ± 2	18.2 ± 0.2	18.1 ± 0.2	18.1 ± 0.2	0.31 ± 0.01
V2	104 ± 14	18.6 ± 0.2	18.4 ± 0.2	18.4 ± 0.2	0.62 ± 0.03

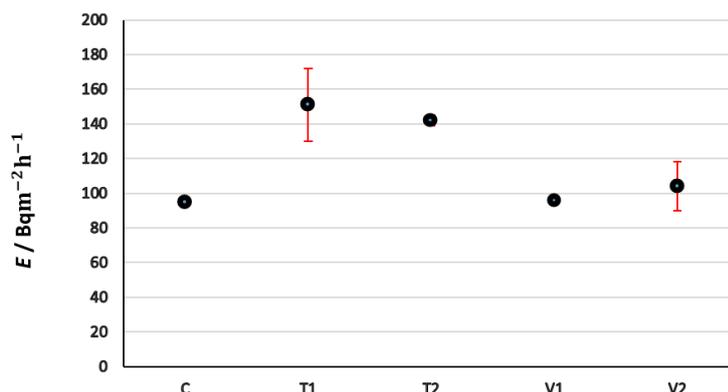


Figura 4.5: Representación gráfica de los valores de las medias de las tasas de exhalación de radón, de las temperaturas y velocidades del viento dadas por los distintos sensores obtenidas durante los experimentos de control (C), variando la temperatura (TX) y el viento (VX).

En la tabla 4.7 se puede observar que la tasa de exhalación en condiciones ambientales es bastante parecida, si tenemos en cuenta el error, a la tasa de exhalación de referencia obtenida en el apartado 4.1.

Analizando ahora los valores de la tasa de exhalación de radón cuando se cambia la temperatura, se observa un aumento de su valor con respecto al valor en condiciones ambientales. Esto nos indica que sí que hay una correlación directa entre el aumento de la temperatura y el aumento de la exhalación de radón. Si se comparan los dos valores de exhalación obtenidos en los experimentos T1 y T2 se observa que los valores son ciertamente parecidos si se tiene en cuenta la incertidumbre, pero esto también puede

ser debido a que la medida T1-1 de la tabla 4.6 puede no ser representativa. Por tanto, la tasa de exhalación obtenida en T1 podría estar un poco subestimada y por eso no se aprecia tanta diferencia. Cabe destacar que para la media en T2, no se ha tomado el valor T2-3 de la tabla 4.6 porque la temperatura alcanzada no es coherente con el resto de medidas de T2.

Finalmente, si se analizan los valores de las tasas de exhalación de radón cuando varía la velocidad del viento, se observa que el valor de la tasa de exhalación en ambos casos es bastante parecida si tenemos en cuenta las incertidumbres, lo que lleva a pensar que el viento no afecta, al menos directamente, al valor de la tasa de exhalación de radón de un suelo en el rango de las velocidades estudiadas. Además ninguno de los dos valores es muy diferente a la exhalación de la medida de control. Sin embargo, se aprecia que cuanto mayor es la velocidad del viento, mayor es la incertidumbre del valor de la exhalación de radón, por lo que es posible que en futuros experimentos haya que modificar o idear un nuevo sistema para intentar erradicar o disminuir esa incertidumbre y descubrir así si el viento afecta realmente a la tasa de exhalación de radón de un suelo.

5. Conclusiones

Analizar la tasa de exhalación de radón de un suelo es de vital importancia como ya se ha comentado a lo largo de este trabajo. En este caso, el suelo escogido para medir su tasa de exhalación de radón es el suelo de las minas de fosfato de Bucraa, Marruecos, cuya procedencia son rocas ricas en materiales radiactivos. Todas las medidas que se realizaron utilizaron el denominado método de acumulación cuyo proceso consiste en sellar herméticamente con una caja o vitrina de altura determinada el suelo para que el radón exhalado se vaya acumulando en el interior de la cámara hasta llegar a un valor de concentración de saturación.

Para establecer un valor de referencia de la tasa de exhalación del suelo, se utilizó un suelo de exhalación con características conocidas. A partir de dicho valor de referencia, ya se pueden realizar modificaciones en distintos parámetros con el fin de observar variaciones y la influencia de tales cambios en la tasa de exhalación de radón. El valor obtenido de referencia es de $\bar{E} = 99 \pm 12 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Después se realizó una estimación de la exhalación del suelo de forma teórica mediante el estudio y medición a partir de cada uno de los parámetros del suelo que se ven implicados en la expresión teórica 3.6 con el fin de compararlo con el valor de referencia obtenido y, así, comprobar que se ha medido de manera correcta. El valor obtenido mediante la forma teórica fue $E = 107 \pm 6 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, resultado que se asemeja bastante al valor de referencia si tenemos en cuenta la incertidumbre de ambos valores y, por tanto, se puede decir que es válido.

Con el fin de decidir qué dispositivo de medida de radón es el más adecuado para las mediciones que se pretenden en este trabajo, se han realizado medidas con tres monitores de radón como son el RTM, Radon Scout y AlphaE y, al analizar los resultados obtenidos comparándolos con el valor referencia, se determina cuál es más adecuado. En base a los resultados obtenidos y a sus características, se ha determinado que el monitor de radón más adecuado para la toma de medidas es el RTM.

Finalmente, se modificaron los parámetros ambientales tales como la temperatura y la velocidad del viento para comprobar su influencia en la tasa de exhalación de radón. Primero se realizaron unas medidas de control con las que comparar los cambios que se van a introducir. Posteriormente se utilizaron dos disposiciones distintas de las bombillas de luz infrarroja para simular dos temperaturas distintas y dos velocidades del ventilador diferentes para también simular dos velocidades de viento distintas. De los resultados se puede concluir que la relación de los cambios en la temperatura con la tasa de exhalación de radón es que un aumento en la temperatura ambiental implica un incremento en el valor de la exhalación de radón del suelo. Sin embargo, los valores de las tasas de exhalación de radón cuando se modifica la velocidad del viento, no varían mucho respecto a la medida de control. Esto nos indica que, en vista de los resultados obtenidos, no existe ninguna relación entre los cambios en la velocidad del viento y los cambios en la tasa de exhalación de radón de un suelo.

A lo largo de todas las mediciones para este trabajo, han ido surgiendo inconvenientes o ideas que pueden ser resueltas en algún trabajo futuro. Uno de los puntos clave en el análisis de todas las mediciones fue qué medida tomar como la concentración inicial de radón, ya que algunas no eran representativas del radón del interior de la cámara de acumulación debido a que, por ejemplo, se tenía que cambiar las conexiones del monitor de radón a la bomba para la purga y al revés si se quería realizar una acumulación. Esto provocaba que el aire externo de la cámara entrase y pierda precisión la medida. Entonces sería interesante estudiar como varía la concentración inicial de radón, es decir el primer valor tomado por el monitor de radón, en función de si cambias los tubos, o levantas y cierras directamente la vitrina entre medidas o cualquier otro tipo de método que se pueda confeccionar. A colación de esto, sería interesante también comprobar con qué disposiciones de la cámara + suelo + monitor de radón existe menos fugas, lo que ayudaría a que la concentración inicial, y el resto de medidas, fuese mucho más precisa.

Otro de los problemas que se ha manifestado en los resultados el cambio de las condiciones ambientales mientras se medían los distintos parámetros de la expresión teórica de la exhalación de radón. Fundamentalmente, el que mayor incertidumbre creó fue el factor de emanación. Esto es debido a que este factor depende de la humedad relativa del suelo, la cual varía con el paso del tiempo. Como para la medida del factor de emanación se necesita más de un día (esto también sucede para obtener el valor de la concentración de radio), la humedad relativa del suelo cambiará y, por tanto, cambia las condiciones ambientales y con ello la precisión de la medida de la exhalación. Con relación a este hecho, en trabajos futuros se podría medir la humedad relativa del suelo frecuentemente (humedeciendo y secando el suelo) mientras se realizan las medidas y así uno se puede comprobar si la humedad relativa ha variado significativamente o no.

En cuanto a las medidas cambiando los parámetros ambientales, surgió un problema cuando se aumentaba la temperatura. Cuando se va aumentando la temperatura del suelo y el interior de la vitrina, se comenzó a condensar agua en los tubos que conectaban la vitrina con el monitor de radón provocando que el monitor de radón deje de medir la concentración de radón en el interior de la cámara antes de tiempo. Esto se podría arreglar en trabajos futuros dando calor sólo al suelo para que no aumentase la temperatura excesivamente en los tubos o añadiendo algún tipo de trampa para eliminar el agua que se condense. En cuanto a las mediciones cambiando la velocidad del viento, sería interesante cambiar el rango de la velocidad del viento para comprobar si, en otro rango de velocidades, la influencia del viento en el valor de la tasa de exhalación de radón es notable o no.

6. Bibliografía

- [1] Burcham, W.E. (1974). *Física nuclear*. Reverté.
- [2] Quindos, L. S., Fernandez, P. L., Rodenas, C., & Soto, J. (1992). Estimate of external gamma exposure outdoors in Spain. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1-4), 527-529.
- [3] JANIS - Renderer, OECD-NEA. (n.d.). Retrieved (Marzo, 2022)
- [4] Appleton, J. D. (2013). Radon in air and water. In *Essentials of medical geology* (pp. 239-277). Springer, Dordrecht.
- [5] Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y. S., & Phaneuf, M. (2013). Measurement and calculation of radon releases from NORM residues.
- [6] Noverques, A., Verdú, G., Juste, B., & Sancho, M. (2019). Experimental radon exhalation measurements: Comparison of different techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 155, 319-322.
- [7] Jonassen, N. (1983). The determination of radon exhalation rates. *Health Physics*, 45(2), 369-376
- [8] Mayya, Y. S. (2004). Theory of radon exhalation into accumulators placed at the soil-atmosphere interface. *Radiation protection dosimetry*, 111(3), 305-318. doi:10.1093/rpd/nch346
- [9] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008). *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR. Vol.I.
- [10] Podstawczyńska, A. (2016). Differences of near-ground atmospheric Rn-222 concentration between urban and rural area with reference to microclimate diversity. *Atmospheric Environment*, 126, 225-234.
- [11] Schery, S. D., & Huang, S. (2004). An estimate of the global distribution of radon emissions from the ocean. *Geophysical Research Letters*, 31(19).
- [12] Williams, A. G., Chambers, S. D., Conen, F., Reimann, S., Hill, M., Griffiths, A. D., & Crawford, J. (2016). Radon as a tracer of atmospheric influences on traffic-related air pollution in a small inland city. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 68(1), 30967.
- [13] Botha, R., Labuschagne, C., Williams, A. G., Bosman, G., Brunke, E. G., Rossouw, A., & Lindsay, R. (2018). Characterising fifteen years of continuous atmospheric radon activity observations at Cape Point (South Africa). *Atmospheric Environment*, 176, 30-39.
- [14] Moore, H. E., Poet, S. E., & Martell, E. A. (1973). 222Rn, 210Pb, 210Bi, and 210Po profiles and aerosol residence times versus altitude. *Journal of Geophysical Research*, 78(30), 7065-7075.

- [15] Chambers, S. D., Wang, F., Williams, A. G., Xiaodong, D., Zhang, H., Lonati, G., Crawford, J., Griffiths, A.D., Ianniello, A. & Allegrini, I. (2015). Quantifying the influences of atmospheric stability on air pollution in Lanzhou, China, using a radon-based stability monitor. *Atmospheric Environment*, 107, 233-243.
- [16] Sainz, C., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, E., Quindós, J., Quindós, L., Fernández, A., Fuente, I., Arteche, J.L. & Quindós, L. S. (2018). Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in the cave of Altamira (Cantabria, Spain). *Science of the total environment*, 624, 416-423.
- [17] Ball, T. K., Cameron, D. G., Colman, T. B., & Roberts, P. D. (1991). Behaviour of radon in the geological environment: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24(2), 169-182.
- [18] Quindós, L. S. (1981). Determinacion del coeficiente de difusion vertical y de la altura de mezcla por aplicacion de un modelo de caja cerrada.
- [19] Livingston, G. P., Hutchinson, G. L., & Spartalian, K. (2005). Diffusion theory improves chamber-based measurements of trace gas emissions. *Geophysical Research Letters*, 32(24).
- [20] Rábago, D., Quindós, L., Vargas, A., Sainz, C., Radulescu, I., Ioan, M. R., Cardellini, F., Capogni, M., Rizzo, A., Celaya, S., Fuente, I., Fuente, M. Rodriguez, M. & Grossi, C. (2022). Intercomparison of Radon Flux Monitors at Low and at High Radium Content Areas under Field Conditions. *International journal of environmental research and public health*, 19(7), 4213. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074213>
- [21] Report traceRadon. WP2 Radon Flux measurements. (2021) *Continuous radon flux monitors as a transfer standard*.
- [22] Subils, M. J. B. (1990). NTP 440: Radón en ambientes interiores.
- [23] Porstendörfer, J. (1994). Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25(2), 219-263.
- [24] Pinot, R. H. (2000). Manual de Edafología. Ed. Computec. Chile.
- [25] Celaya González, S., Rábago Gómez, D., Fuente Merino, I., Quindós López, L., Bon Carreras, N., Valero Castell, M. T., Gutiérrez, J.L. & Sainz Fernández, C. (2018). A simple national intercomparison of radon in water. *Radiation Protection Dosimetry*, 181(4), 343-349.
- [26] Zhuo, W., Guo, Q., Chen, B., & Cheng, G. (2008). Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China. *Journal of environmental radioactivity*, 99(7), 1143-1148.
- [27] Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2012). TÉCNICAS DE MEDIDA DEL ESPACIO POROSO DEL SUELO.

- [28] Hernández, H. A. (2016). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales* (Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).
- [29] Sarad Gmbh Enviromental Instruments *RTM 2100 Radon/Thoron monitor Operation Manual*.
- [30] Manual, U. (2020). *Manual RTM 2200 Soil Gas*. SARAD GmbH
- [31] Manual, U. (2017). *Radon Scout*. SARAD GmbH
- [32] Manual, U. (2014). *Hand-Held Device for Radon Concentration & Personal Radon Exposure*. Saphymo GmbH
- [33] Young, J. A., Thomas, V. W., & Jackson, P. O. (1983). *Recommended Procedures for Measuring Radon Fluxes from Disposal Sites of Residual Radioactive Materials* (No. PNL-4597; NUREG/CR-3166). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- [34] Manual de instrucciones *Medidor para climatización testo 440*. Testo