



*Facultad de
Ciencias*

Puesta a punto de un sistema de
determinación de factor de equilibrio entre
el gas radón y sus descendientes basado en
detectores de trazas nucleares

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Morrás Aguas, Samuel

Director: Sainz Fernández, Carlos

Codirector: Fuente Merino, Ismael

Junio 2023

Agradecimientos

Querida familia,

En este momento tan especial en el que finalizo mi trabajo de fin de grado, quiero expresar mi profundo agradecimiento por todo vuestro esfuerzo y paciencia a lo largo de esta travesía. Habéis sido y siempre seréis el motor de mi vida, la razón por la que he alcanzado mis metas. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino y por ser mi fuente de inspiración. Os llevo en lo más profundo de mi corazón y sé que puedo contar con vosotros siempre.

A mis amigos de la universidad,

Compañeros de la mejor etapa de mi vida hasta el momento. Compañeros de risas, alegrías y desafíos. Juntos hemos superado obstáculos, hemos aprendido y crecido dentro y fuera de lo académico. Sé que esto no es un adiós, si no un hasta pronto.

Al grupo Radón de la Universidad de Cantabria,

Quiero extender mi más sincero agradecimiento por enseñarme los conocimientos y proporcionarme los medios necesarios para hacer posible la realización de este trabajo. Quisiera agradecer especialmente a mis tutores Carlos Sainz Fernández e Ismael Fuente Merino, por la comprensión que habéis tenido este último año tan duro para mí. Habéis sido un pilar fundamental con vuestro apoyo y paciencia para guiarme en todos estos meses.

Índice

Resumen	3
1 Introducción	4
1.1 Problemática del radón en viviendas y puestos de trabajo. Legislación . . .	4
1.2 Proceso de deposición	5
1.3 Evaluación de dosis por inhalación de radón y descendientes	6
1.4 Objetivos	9
2 Material y métodos	10
2.1 Descripción del lugar de experimentos	10
2.2 SARAD RadonScout: medida en continuo de concentración de gas radón . .	11
2.3 SARAD poCAMon: medida en continuo de EEC	13
2.4 CR39: medida integrada de exposición de gas radón	14
2.5 Método de calibración de CR39 abiertos para la medida integrada de F . . .	16
3 Resultados y Análisis	18
3.1 Series temporales de concentración de radón, factor de equilibrio	18
3.2 Medidas instantáneas de F	26
3.3 Exposiciones de CR39 abiertos	27
3.4 Ajuste calibración CF vs F	28
3.5 Prueba del ajuste con los detectores cerrados	30
4 Conclusiones	32
Referencias	33

Resumen

Se ha calibrado un método para la obtención del Factor de Equilibrio F basado en los detectores de trazas nucleares CR39. El método se apoya en la relación exponencial, descrita en el artículo *Method of radon and decay products equilibrium factor measurement with the use of passive track detectors*, entre el ya mencionado Factor de Equilibrio y el Factor de Calibración CF de los detectores. Se realizaron medidas en continuo e integradas de concentraciones de radón y sus descendientes a lo largo de un periodo de tres meses, en el cual se realizaron cambios en la atmósfera con los cuales se pudieron obtener diferentes Factores de Equilibrio. Las medidas se realizaron mediante los detectores: RadonScout, poCAMon y detectores CR39. Estas medidas dieron lugar a diferentes valores de F y CF con los que se realizó un ajuste con el que se pudo verificar la relación exponencial, dando lugar al siguiente método de determinación:

$$F = \frac{1}{0.6 \pm 0.3} \cdot \ln \frac{CF}{7.4 \pm 1.2}$$

Abstract

A method has been calibrated for the obtain the Equilibrium Factor F based on CR39 nuclear trace detectors. The method holds on the exponential relationship, described on the article *Method of radon and decay products equilibrium factor measurement with the use of passive track detectors*, between the aforementioned Equilibrium Factor and the Calibration Factor CF of the detectors. Continuous and integrated measurements of radon and its progeny concentrations were carried out over a period of three months, during which atmospheric changes were made to obtain different Equilibrium Factors. The measurements were performed using RadonScout, poCAMon, and CR39 detectors. The measurements resulted in different values of F and CF , which were fitted and from which the exponential relationship was verified, leading to the following determination method:

$$F = \frac{1}{0.6 \pm 0.3} \cdot \ln \frac{CF}{7.4 \pm 1.2}$$

1 Introducción

1.1 Problemática del radón en viviendas y puestos de trabajo. Legislación

Los principales elementos radioactivos presentes en la corteza terrestre son el Potasio ^{40}K , material radioactivo de vida muy larga, y los materiales provenientes de las cadenas radioactivas naturales del Uranio ^{238}U , Torio ^{232}Th y Actinio ^{235}U . De estas series provienen una gran cantidad de elementos que se encuentran en las rocas de la corteza terrestre, pudiendo llegar a estar presentes en materiales de construcción.

En estas series radioactivas aparecen los elementos radón ^{222}Rn , Torón ^{220}Rn y Actinón ^{219}Rn isótopos del Radón que, por su naturaleza gaseosa, pueden emanarse de las rocas llegando a la atmósfera. Los periodos de semidesintegración¹ de los elementos son: radón 3.8 días, torón 55.6 s y actinón 4.0 s. Dado que el radón es el único isótopo cuyo periodo de semidesintegración es mayor a 1 minuto, es el único considerado para la protección radiológica.

El radón ^{222}Rn , es un gas noble, por lo que es químicamente poco reactivo lo que hace que sea complicado detectarlo, especialmente por los sentidos humanos ya que es incoloro, inodoro e insípido. El radón es producto directo del Radio ^{226}Ra , y por lo tanto está presente en el suelo, agua y aire. El gas está presente en la cadena del uranio ^{238}U , por lo que tierras ricas en este elemento presentan una fuente continua de radón. Aunque no es la existencia de uranio en un lugar la que se usa como indicativo de presencia de radón, si no la existencia de radio (progenitor directo del radón), ya que pueden haber desequilibrios en la cadena de desintegración.

Por la naturaleza gaseosa y periodo de semidesintegración relativamente largo (3.8 días), el radón tiene gran capacidad de desplazamiento, por difusión o advección/convección², que dependerá de las condiciones del material en el que se desplaza, principalmente de la distribución de tamaño de los granos del suelo, la porosidad y la humedad. Después de que el Radio se desintegre, los átomos de radón pueden escaparse de los granos a los poros del terreno donde se produce el transporte del gas, pudiendo llegar a la atmósfera, proceso al que se llama emanación. El radio también puede estar presente en aguas profundas (diluido), cuya desintegración hace que aumente la concentración de radón en estas. Procesos de agitación y turbulencias permiten al radón escaparse del agua y llegar a la atmósfera. Estos son los procesos principales por los cuales el radón aparece en la atmósfera donde se diluye rápidamente, aunque también puede ocurrir que se acumule en zonas poco ventiladas como viviendas y zonas de trabajo.

¹**Periodo de semidesintegración:** Tiempo necesario para que se desintegre la mitad de núcleos atómicos de una cierta cantidad de material.

²Al transporte horizontal se le denomina advección, mientras que al vertical convección.

El radón llega a los edificios desde los materiales de construcción, desde corrientes de agua subterránea y desde el terreno sobre el que está construido el edificio. Dicho esto, la mayor contribución a la concentración de radón suele ser, en general, la proveniente del terreno. Que el radón se acumule en viviendas y zonas de trabajo en concentraciones elevadas supone un riesgo para la salud de las personas. La inhalación de radón es la segunda causa de cáncer de pulmón solo detrás de fumar tabaco [10]. No se conoce una concentración de radón umbral para la cual la exposición no suponga un riesgo, pero la Organización Mundial de la Salud recomienda una concentración media inferior a 100 Bq/m^3 [9]. A nivel Europeo, en 2013 se estableció la directiva 2013/59/EURATOM [5] del consejo que establece un máximo de 300 Bq/m^3 de concentración promedio anual en viviendas y zonas de trabajo, que debe trasponerse en la legislación de los estados miembros. En España, en 2019 se realizó la regulación estableciendo una nueva sección HS6 en el Real Decreto 732/2019, que cumple con las exigencias de la Directiva Europea [11]. Estas exigencias se aplican en los edificios de nueva planta, que se construyan en las zonas 1 y 2 del mapa del potencial de radón de España realizado por el Consejo de Seguridad Nuclear, que puede encontrarse en su página web [12]. Añadido a todo esto, el pasado 20 de diciembre de 2022 se publicó el Real Decreto 1029/2022 en el se establece al radón como fuente de radiación que obligatoriamente hay que controlar en puestos de trabajo de manera dosimétrica, tanto a nivel de área como personal [6].

1.2 Proceso de deposición

Al ser un gas noble, no es el radón si no sus descendientes los que suponen un riesgo para la salud. El gas radón es radioactivo, y se descompone principalmente en Polonio ^{218}Po emitiendo una partícula alfa. La cadena radioactiva acaba en el Plomo ^{206}Pb , que es estable. El resto de la cadena puede verse en la Figura 1. Las desintegraciones por partículas alfa (núcleos de Helio) son los peligrosos, ya que, al contrario que las desintegraciones por partículas beta (electrones) y gamma (fotones muy energéticos), las alfa son las que tienen más probabilidad de interacción con los tejidos humanos. Por lo que si se inhalan los tres isótopos de polonio, ^{218}Po , ^{214}Po y ^{210}Po , podrían ser dañinos para la salud.

Los descendientes del radón pueden fijarse a partículas de aerosoles ⁴ suspendidos en el aire. Estos aerosoles se convierten en portadores de los descendientes del radón. Al inhalar estas partículas, se depositan en las células de las distintas partes del tracto respiratorio. El lugar donde se depositan depende del tamaño de los aerosoles. Al decaer, en concreto los Polonios que emiten partículas alfa, la radiación emitida puede dañar el ADN de las

³**Bequerelio (Bq)**: Número de desintegraciones por unidad de tiempo.

⁴**Aerosol**: Suspensión de partículas diminutas de sólidos o líquidos en el aire (RAE). El término aerosol se refiere tanto a las partículas como al gas en el que están suspendidas.

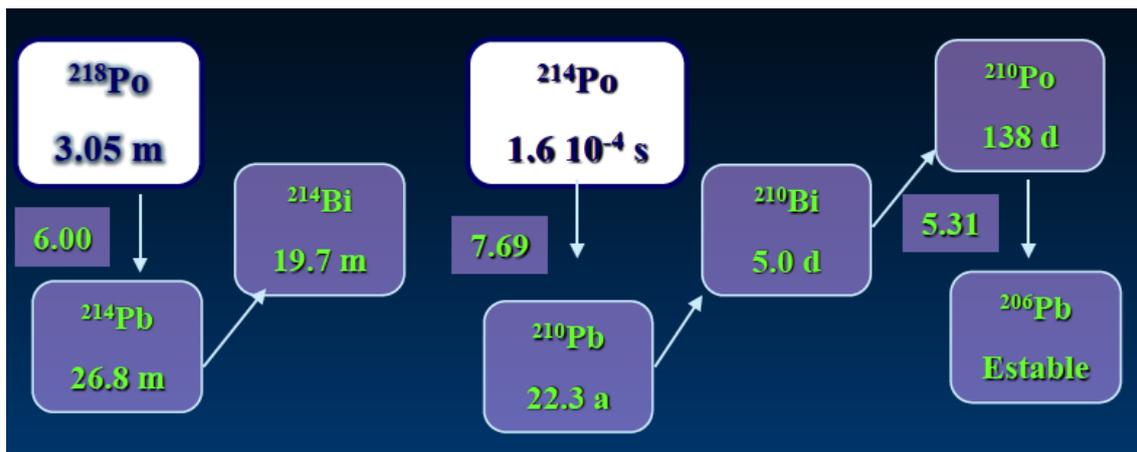


Figura 1: Descendientes de periodo de semidesintegración corto del radón ^{222}Rn . Se especifican los tipos de decaimientos y periodos de semidesintegración.

células y generar una mutación genética que puede llegar a ser cancerígena [3].

1.3 Evaluación de dosis por inhalación de radón y descendientes

Al estar en un lugar cerrado, dependiendo de las concentraciones de radón (y la de sus descendientes) y del tiempo al que se vea expuesta la persona determinarán la dosis recibida. Estos conceptos, concentración de radón, tiempo de exposición y dosis, están íntimamente relacionados. El más importante, para la salud de las personas, y el objetivo final suele ser el cálculo de la dosis recibida ya que determina el daño que puede estar recibiendo una persona. Y este cálculo se realiza a través de las concentraciones y el tiempo de exposición.

Para medir concentraciones, las unidades de medida son las mencionadas anteriormente, los Bq/m^3 en aire o Bq/l en agua, aunque en este trabajo sólo se trabaja con las concentraciones en aire. Esta magnitud no mide la concentración de radón como una densidad de masa por unidad de volumen, si no como una densidad de número de desintegraciones por segundo (Bq) por unidad de volumen (m^3). Esto es porque lo que interesa del radón son sus desintegraciones ya que el gas de por sí no es dañino. Además, el número de desintegraciones que hay indica la cantidad de descendientes que puede haber en el aire.

En el aire el gas radón se encuentra mezclado con sus descendientes. En esta atmósfera habrá decaimientos radioactivos del tipo alfa, beta y gamma, se suele decir que esta atmósfera es activa. Para medir esta actividad radioactiva, es interesante introducir la magnitud *PAEC* o Potential Alfa Energy Concentration, es decir, la concentración de energía alfa potencial. Esta magnitud mide la cantidad de energía que pueden emitir potencialmente las partículas del medio en forma de desintegraciones alfa por unidad de volumen. En el caso del radón, las partículas que se desintegran mediante partículas alfa son los tres isótopos de Polonio comentados anteriormente. Aunque también hay que tener en cuenta los

otros descendientes que, tarde o temprano, se desintegran en algún Polonio y por tanto emiten también partículas alfa. En conclusión, el cálculo de la *PAEC* se realiza mediante la Ecuación (1), donde $E_{\alpha j}$ es la energía alfa potencial del descendiente j y C_j es su concentración. La *PAEC*, en el SI de unidades, se mide en J/m^3 , aunque también se puede usar MeV/m^3 . De manera histórica se ha usado la unidad Working Level, WL ⁵

$$PAEC = \sum_j E_{\alpha j} \cdot C_j \quad (1)$$

Una magnitud que suele usarse es la *EEC* o Equilibrium Equivalent Concentration, es decir, la concentración de radón equivalente que estando en equilibrio con sus descendientes, de periodo de semidesintegración corta, proporciona la misma *PAEC*. Por lo tanto, es una medida de la actividad de los descendientes del radón. Al ser una concentración se mide en Bq/m^3 . Que una cadena radioactiva esté en equilibrio significa que tanto el elemento padre como sus descendientes decaen al mismo ritmo, el impuesto por el padre que en este caso es el radón. Esto ocurre cuando los periodos de semidesintegración de los descendientes son menores al del padre. En la Figura 2. puede observarse que al principio sólo hay actividad del padre porque es el único presente, pero a medida que decae en el hijo la actividad de este aumenta hasta alcanzar a la del padre. Cuando ambos tienen la misma actividad se dice que están en equilibrio. Este equilibrio suele obtenerse tras siete periodos de semidesintegración del hijo y puede romperse si hay alguna interacción con el medio.

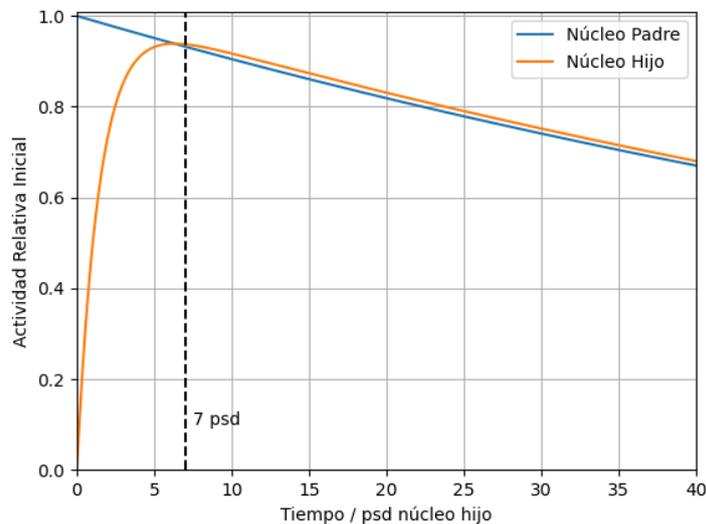


Figura 2: Gráfica que muestra la actividad relativa a la inicial de núcleos padre e hijo frente al tiempo, en unidades de periodo de semidesintegración del hijo. Donde se ve que se alcanza el equilibrio en el momento que la actividad del hijo alcanza a la del padre al rededor de 7 periodos de semidesintegración del hijo.

⁵Un WL se corresponde con $2.08 \cdot 10^{-5} \text{ J}/\text{m}^3$ o $1.3 \cdot 10^8 \text{ MeV}/\text{m}^3$. Actualmente un WL se define como cualquier combinación de descendientes de radón en 1 l de aire que resulte en emitir $1.30 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ de energía alfa potencial [15].

Para el radón, la equivalencia entre *PAEC* y *EEC* es: $PAEC(\text{J}/\text{m}^3)=5.56\cdot 10^{-9}\times EEC(\text{Bq}/\text{m}^3)$.

Al cociente entre la *EEC* y la verdadera concentración de gas radón (*C*) se le denomina Factor de Equilibrio, *F*. Esta magnitud cobra importancia en el cálculo de la dosis. Recordemos que la *EEC* da un valor de la actividad de los descendientes en unidades de concentración de radón. Por lo tanto, el Factor de Equilibrio da un porcentaje de cuanto de estos descendientes están presentes en el aire, en relación a la cantidad de radón que hay, y son potencialmente peligrosos para una persona que los inhale.

$$F = \frac{EEC}{C} \quad (2)$$

Para aclarar el concepto de Factor de Equilibrio, es bueno dar un ejemplo. Los valores típicos para exteriores, aunque varían mucho ya que dependen de muchos factores ambientales, son del orden de $F=0.8$. Y para interiores sin embargo $F=0.4$ [7]. Esto es así porque, aunque en el interior hay más concentración de gas radón que en el exterior, la cantidad de descendientes que se encuentran en el aire es menor. En interiores es más probable que un descendiente se deposite en alguna pared o se adhiera a una partícula pesada que caiga al suelo, y por eso la cantidad de descendientes que hay en el aire y, por tanto, el Factor de Equilibrio disminuye con respecto a la de exteriores que ronda valores más cercanos a los del equilibrio.

Las magnitudes presentadas hasta ahora estaban relacionadas únicamente con el gas radón y sus descendientes. El primer paso para el cálculo del daño en humanos por inhalación de radón (dosis) es la exposición. La exposición es simplemente la integración de la concentración del radón y sus descendientes extendida al periodo de inhalación. Puede ser medida en términos de actividad cuyas unidades serían $\text{Bq}/\text{m}^3\cdot\text{h}$. O en energías, $\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ en el SI, aunque la unidad histórica es el Working Level Month, WLM⁶.

La dosis efectiva es la cantidad de radiación recibida, estimada para un humano que esté en una habitación con una cierta concentración de radón y descendientes, expuesto durante un cierto periodo de tiempo. Suele medirse en mSv⁷. Para el cálculo de la dosis efectiva, Ecuación (3), hay que tener en cuenta factores que afectan a la cantidad de radiación alfa recibida, como por ejemplo la proporción de progenitores de radón pegados a los aerosoles, la probabilidad de la partícula alfa en interactuar con las células del pulmón, la sensibilidad de los tejidos, etc. Este factor se denomina Dose Conversion Factor *DCF*, factor de conversión a dosis, que depende de la localización de la concentración de gas radón. En la actualidad, los valores calculados para viviendas y zonas de trabajo son 14 mSv por $\text{mJ}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ que equivalen a aproximadamente 46 mSv por WLM. Mientras que para cuevas los valores son mayores: 23 mSv por $\text{mJ}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ o 77 mSv por WLM [8].

⁶**Working Level Month (WLM)**: Exposición a 1 WL extendida a lo largo de un mes de trabajo (170h).

⁷**Sievert (Sv)**: Unidad de equivalencia de dosis de radiación ionizante, equivalente a 1 J por kg. Es una medida del efecto sobre la salud que tiene sobre el cuerpo humano la radiación ionizante.

$$DE = \frac{C \cdot F \cdot t}{170 \cdot 3700} \cdot DCF \quad (3)$$

donde DE la dosis efectiva, C es la concentración de radón, F es el Factor de Equilibrio, t es el tiempo de exposición y DCF es el factor de conversión a dosis.

1.4 Objetivos

En este trabajo, el objetivo principal ha sido obtener un método de medida del Factor de Equilibrio a partir de detectores de trazas nucleares, llamados CR39. En el artículo [1], se dice que existe una relación exponencial entre el Factor de Equilibrio F y el Factor de Calibración CF ⁸, ver Ecuación (4). El objetivo ha sido comprobar que esta relación se cumple y, además, obtener los parámetros (A,B) de la exponencial para calibrar el método de medida. A partir de los detectores CR39 se podría obtener el Factor de Calibración y haciendo uso de la relación exponencial se tiene un método para la obtención del Factor de Equilibrio.

$$CF = A \cdot e^{B \cdot F} \quad (4)$$

⁸**Factor de calibración:** Número por el que se multiplica la densidad de trazas detectadas en el CR39, para obtener la exposición de gas radón.

2 Material y métodos

Las medidas realizadas en este trabajo se desarrollaron en la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria desde el 7 de marzo hasta el 27 de junio de 2022. A lo largo de este periodo se realizaron medidas de Concentraciones de radón y Concentraciones Equivalentes de radón (EEC) de forma continua o integrada. A partir de estas medidas, se pudieron obtener diferentes valores de Factores de Equilibrio y Factores de Calibración con los cuales se pudo calibrar el método de medida.

2.1 Descripción del lugar de experimentos

Las medidas se realizaron en una habitación del sótano de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria (Figura 3.). En el centro de esta habitación, de dimensiones al rededor de $3 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$, se encontraba un contenedor lleno de tierras ricas en radio extraídas de una mina de Salamanca. Estas tierras suponían una fuente continua de radón al aire de la habitación, con lo que se obtenían determinadas concentraciones de radón y EEC.



Figura 3: Habitación donde se realizaron las medidas. En medio un contenedor lleno de tierras ricas en Uranio ^{238}U , que suponía una fuente continua de radón.

A lo largo de las semanas que se realizaron las medidas, a parte de las condiciones normales, se implementaron diferentes cambios sobre la atmósfera de la habitación. Primero se quemó incienso, lo que aumentaba el número de aerosoles en el aire, a los que los descendientes del radón podían adherirse. También se colocó un purificador que eliminaría las partículas que estuvieran en el aire, eliminando los descendientes del radón pegadas a estas. Los cambios que se realizaron junto con las semanas en las que se implementaron pueden verse

en la Tabla 1. Estos cambios proporcionaban diferentes atmósferas donde los valores de las concentraciones de radón y la de sus descendientes variaban, dando lugar a medidas de diferentes Factores de Equilibrio. Los valores con incienso darían lugar a los mayores Factores de Equilibrio, mientras que los menores valores fueron obtenidos con el purificador.

Fechas	Condiciones
7/03 - 9/05	Cond. normales
9/05 - 16/05	Incienso
16/05 - 20/06	Cond. normales
20/06 - 27/06	Purificador

Tabla 1: Tabla con las fechas de las diferentes condiciones en las que estuvo la atmósfera de la habitación donde se realizaron las medidas.

2.2 SARAD RadonScout: medida en continuo de concentración de gas radón

Para las medidas en continuo de la concentración de radón se usó el dispositivo de medida SARAD RadonScout, ver Figura 4. Este dispositivo mide la concentración media a través de un detector semiconductor de alto voltaje, en la Figura 4. la semiesfera metálica, al que el gas llega por difusión. El radón emite una partícula alfa que más tarde interactúa con el semiconductor creando un par electrón-hueco, que se registra y da cuenta de la actividad radioactiva dentro del detector.

El RadonScout tiene un rango de medición de concentración de radón de $1-10 \cdot 10^6$ Bq/m³. A 1000 Bq/m³ tiene una sensibilidad de entre 1 a 8 impulsos por minuto y, general, tiene una precisión $\leq 6\%$. El dispositivo tiene un almacenamiento de 672 registros de datos y debe estar en unas condiciones ambientales de entre 0-40 °C, humedad de 0-95% y a una presión de 800-1100 hPa. El resto de datos técnicos del dispositivo pueden verse en la página web de la marca SARAD [16].



Figura 4: Imágenes del SARAD RadonScout. A la izquierda la vista frontal donde se encuentran todas las conexiones. A la derecha una imagen del interior, donde se destaca el detector semiconductor de alto voltaje en la parte superior izquierda.

El RadonScout es capaz de dar valores de la concentración de radón en intervalos de una hora. Con lo que, a la escala de semanas de las medidas, se obtuvieron medidas en continuo. Gracias a su conexión a una fuente de energía externa, el RadonScout pudo estar realizando medidas ininterrumpidamente durante periodos largos. En la Tabla 2. pueden verse los días que estuvo activo el dispositivo de medida a lo largo de las semanas.

Semanas	Días
7/03 - 14/03	7 - 12
14/03 - 21/03	16 - 21
21/03 - 28/03	Toda la semana
28/03 - 4/04	Toda la semana
4/04 - 11/04	Toda la semana
11/04 - 18/04	Toda la semana
18/04 - 25/04	Toda la semana
25/04 - 2/05	Toda la semana
2/05 - 9/05	Toda la semana
9/05 - 16/05	9 - 11 // 12 - 16
16/05 - 23/05	Toda la semana
23/05 - 30/05	Toda la semana
30/05 - 6/06	Toda la semana
6/06 - 13/06	Toda la semana
13/06 - 20/06	Toda la semana
20/06 - 27/06	Toda la semana

Tabla 2: Tabla con las fechas que estuvo el RadonScout realizando medidas de concentración de gas radón.

2.3 SARAD poCAMon: medida en continuo de EEC

Para la medida en continuo de la concentración equivalente se usó el dispositivo SARAD poCAMon, Figura 5. Para obtener este dato el detector, mediante una bomba de aire, hace pasar el aire de la atmósfera que lo rodea a través de un filtro donde se depositan los aerosoles que portan los descendientes del radón. El poCAMon obtiene la actividad de los descendientes mediante un detector semiconductor que es capaz de diferenciar partículas alfa como beta. El propio detector hace el cambio de concentración de descendientes a la concentración equivalente.

El dispositivo poCAMon tiene un rango de medición de concentraciones equivalentes entre 0-125000 Bq/m³. La eficiencia de los conteos es de un 20 %, y tienen un rango de energías de 0.15-3 MeV (β) y de 3-10 MeV (α). En cuanto al filtro, tiene una capacidad de retención de los aerosoles >99.9 %. Al igual que con el RadonScout, el resto de datos técnicos del poCAMon pueden verse en su página web correspondiente [17].



Figura 5: Imagen del SARAD poCAMon. A la izquierda pueden verse un filtro limpio (arriba) y un filtro usado (abajo), que se colocan en la parte metálica superior del dispositivo.

Semanas	Días
7/03 - 14/03	9 // 10 // 11
14/03 - 21/03	16 // 17 // 18
21/03 - 28/03	-
28/03 - 4/04	-
4/04 - 11/04	4 // 7
11/04 - 18/04	-
18/04 - 25/04	-
25/04 - 2/05	26
2/05 - 9/05	6
9/05 - 16/05	9 // 12
16/05 - 23/05	-
23/05 - 30/05	-
30/05 - 6/06	-
6/06 - 13/06	8
13/06 - 20/06	14 - 17
20/06 - 27/06	Toda la semana

Tabla 3: Tabla con las fechas que estuvo el detector poCAMon realizando medidas de EEC. Exceptuando las últimas dos filas, los días se refieren a periodos de detección que varían entre una y veinte horas.

En la Tabla 3. se recogen las fechas en las que estuvo el detector realizando medidas. El filtro del poCAMon se ensucia y llega un punto que los valores de detector no son correctos. Este punto de saturación depende de lo cargada que esté la atmósfera de aerosoles. Por esta razón, excepto las últimas dos semanas, los días indicados se refieren a unas horas de medición del poCAMon, que varían desde una hasta veinte horas.

2.4 CR39: medida integrada de exposición de gas radón

Para finalizar con los aparatos de medida, se presentan los detectores de trazas nucleares CR39 en los que se basa el método de medida de este trabajo. Consisten en un recipiente de plástico de dimensiones 55 mm de alto y 35 mm de diámetro, y un detector CR39 que pueden verse en la Figura 6. El CR39 es un material orgánico, en concreto un polímero, que al atravesarlo, las partículas alfa dañan la estructura del polímero dejando una traza microscópica. Cuando la tapa está colocada, el detector en el interior se ve expuesto a la radiación ionizante que ha podido entrar dentro de el recipiente por difusión, principalmente radón. Al desintegrarse el radón dentro del recipiente, los descendientes tienen mucha probabilidad de adherirse a las paredes. Lo que asegura que, cuando el detector está cerrado, aproximadamente el 100% de las trazas depositadas en el CR39 sean las provenientes de los decaimientos del gas radón. Cuando el detector está abierto, el polímero está expuesto a toda la actividad de la atmósfera en la que se encuentre, es decir, gas radón y descendientes.



Figura 6: Imágenes de un detector CR39 abierto y cerrado. A la izquierda puede verse el polímero pegado a la parte superior de la tapa.

Se colocaron diferentes grupos de cinco detectores CR39, en periodos que variaban desde una semana hasta un mes de exposición. Las semanas concretas de medida pueden verse en la Tabla 6. La mayoría de los detectores se colocaron abiertos excepto dos detectores del Grupo 3.

Grupo	Periodo	Detectores
1	12/04 - 21/04	5 abiertos
2	12/04 - 29/04	2 cerrados, 3 abiertos
3	21/04 - 29/04	5 abiertos
4	29/04 - 9/05	5 abiertos
5	9/05 - 13/05	5 abiertos
6	13/05 - 26/05	5 abiertos
7	26/05 - 20/06	5 abiertos
8	20/06 - 27/06	5 abiertos

Tabla 4: Tabla con las fechas que estuvieron en exposición los distintos grupos de CR39.

Tras cada exposición, se procedía al revelado de las trazas dejadas en los materiales CR39. Para ello, se bañaban los detectores en el Radobath (Figura 7(a)) en una mezcla de 1kg NaOH y 4 l de agua destilada, a 90 ± 3 °C, que disolvía el plástico no dañado revelando las trazas. Más tarde, se neutralizaban los detectores en un baño de 35 ml de ácido acético glacial (CH₃COOH) y 3.965 l de agua destilada y, por último, se aclaraban en otro baño de 4 l de agua destilada. Para realizar el conteo de las trazas se usó el Radometer (Figura 7(b)). Este dispositivo escaneaba los detectores por zonas con una cámara CCD con ampliación 100x y daba como resultado la densidad de trazas de cada detector (D). Para ello, realizaba

cinco conteos de trazas por CR39 y se tomaba la media estadística.



Figura 7: (Izquierda) Radobath, dispositivo donde se realizaron los baños de NaOH y ácido acético glacial para el revelado de las trazas en los detectores. (Derecha) Radometer, sistema óptico conectado a un ordenador donde se realizaron los conteos automáticos de las trazas en los detectores.

Para obtener el valor de la concentración media de radón, se debería usar un detector que hubiera estado cerrado y multiplicar la densidad de trazas por el Factor de Calibración (CF) dado por el fabricante ⁹. Por lo tanto, los CR39 dan una medida integrada de la concentración del gas radón, es decir, un valor medio a lo largo del tiempo de exposición. Cabe mencionar que, en este trabajo, se ha trabajado con detectores abiertos ya que el dato de la concentración de radón se obtuvo a partir del RadonScout. Y lo que interesaba de los CR39 era obtener el Factor de Calibración para los detectores abiertos. Que se obtuvo a partir de la densidad de trazas y la concentración de gas radón dada por el RadonScout.

2.5 Método de calibración de CR39 abiertos para la medida integrada de F

Como se ha comentado en el apartado 1.4 de la Introducción, existe una relación exponencial entre el Factor de Calibración CF y el Factor de Equilibrio F , ver Ecuación (4). Para obtener el Factor de Equilibrio F , sólo hay que aplicar la Ecuación (2). La concentración C se obtuvo a partir del RadonScout. Y la concentración equivalente EEC a partir del poCAMon. A partir las medidas de los CR39 se obtuvieron haciendo uso de los valores de las concentraciones proporcionadas por le RadonScout diferentes valores de CF para los detectores abiertos. Se emparejaron valores de F con sus correspondientes F y se realizó un ajuste exponencial, siguiendo la Ecuación (4).

⁹El CF dado por el fabricante es el número por el que hay que multiplicar la densidad de trazas de un detector **cerrado** para obtener la exposición de gas radón.

A partir de este ajuste, basta medir con dos CR39 en un lugar para conocer el Factor de Equilibrio. Uno de los detectores se coloca cerrado y se obtiene así la concentración de gas radón. El otro CR39 se coloca abierto y se obtiene, con el dato de la concentración, el Factor de Calibración. Con el valor de CF , se accede al ajuste y se obtiene el valor del Factor de Equilibrio. Simplemente habría que despejar el F partiendo de la Ecuación (4) de la siguiente manera:

$$CF = A \cdot e^{B \cdot F} \quad (4)$$

$$\ln(CF) = \ln(A \cdot e^{B \cdot F})$$

$$\ln(CF) - \ln(A) = \ln(e^{B \cdot F})$$

$$\ln \frac{CF}{A} = B \cdot F \ln(e)$$

$$F = \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{CF}{A} \quad (5)$$

3 Resultados y Análisis

3.1 Series temporales de concentración de radón, factor de equilibrio

En este apartado se presentan todas las series temporales de las medidas de concentraciones de radón detectadas con el RadonScout, concentraciones equivalentes proporcionadas por el poCAMon, así como los valores de Factores de Equilibrio calculados a partir de la Ecuación (2) en cada punto. Los resultados se presentan por semanas, y los valores de concentraciones, EEC y F son las medias semanales, tomando los errores como la desviación estándar de los puntos de esa semana.

No todos los valores de los Factores de Equilibrio calculados fueron válidos, por ejemplo en la gráfica de la Semana 2, hay valores de la concentración de radón menores que las de la EEC , lo que dio lugar a un F mayor que 1 o en la Semana 9 y 10, que los valores de la EEC empezaban muy bajos y luego con un aumento rapidísimo llegaban a valores más estables. Estas incertidumbres se deben a errores de los aparatos de medida y no se tuvieron en cuenta para el cálculo de los valores de F . Los criterios concretos para cada semana se especifican en los pies de foto correspondientes.

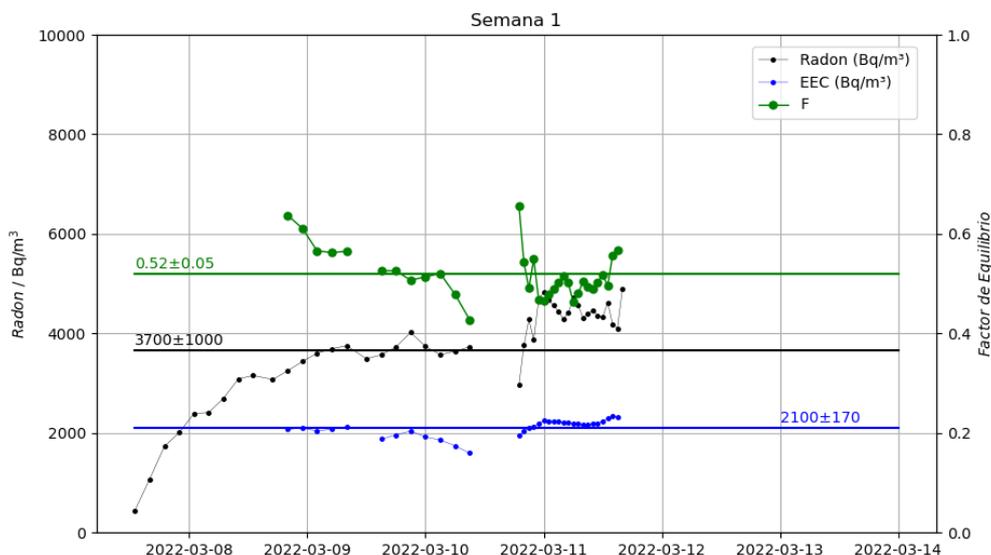


Figura 8: Serie temporal de la Semana 1 de las medidas realizadas desde el 2022/03/08 hasta 2022/03/14, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (EEC) medidos, así como los valores de F calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Se tuvieron en cuenta todos los puntos.

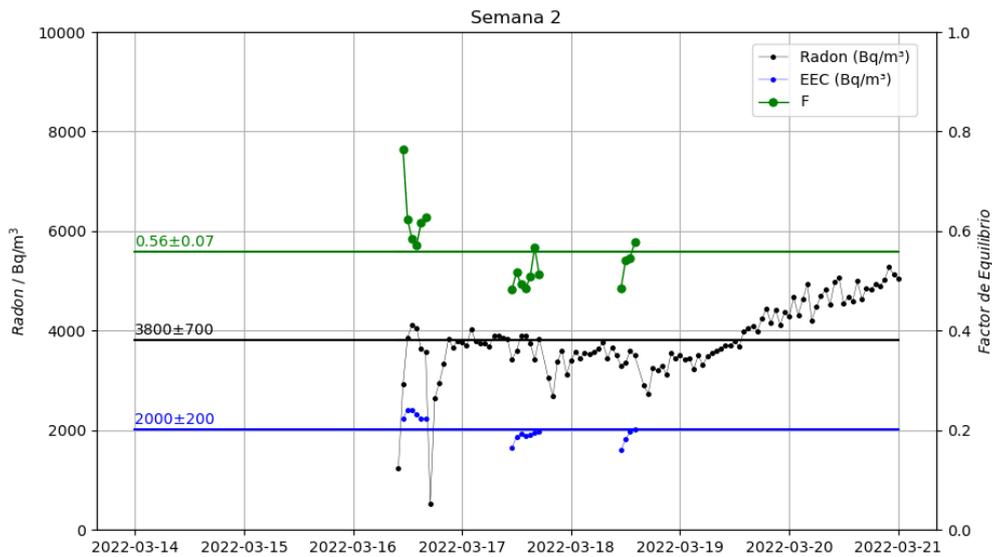


Figura 9: Serie temporal de la Semana 2 de las medidas realizadas desde el 2022/03/14 hasta 2022/03/21, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los *F* eliminados fueron los que daban valores superiores a 1, es decir, cuando la concentración de radón era menor que la *EEC*.

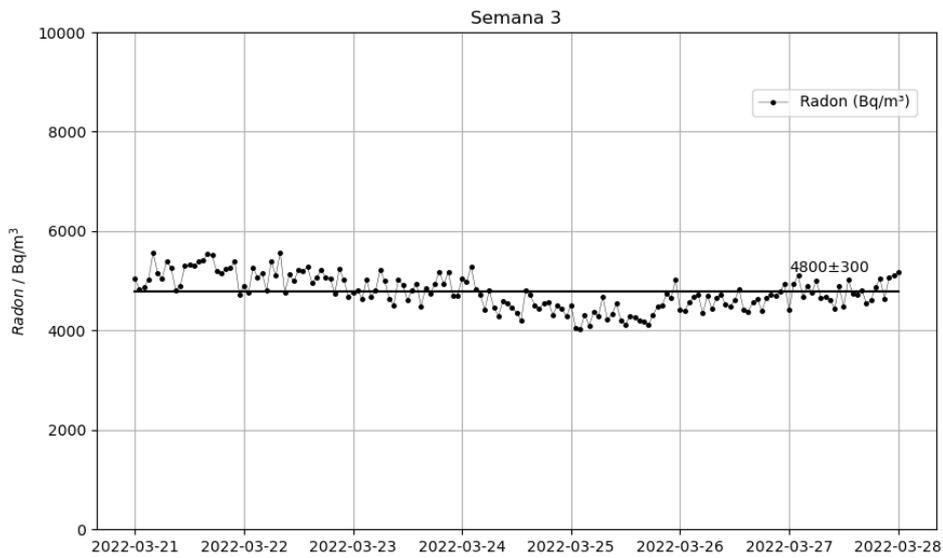


Figura 10: Serie temporal de la Semana 3 de las medidas realizadas desde el 2022/03/21 hasta 2022/03/28, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de *F*.

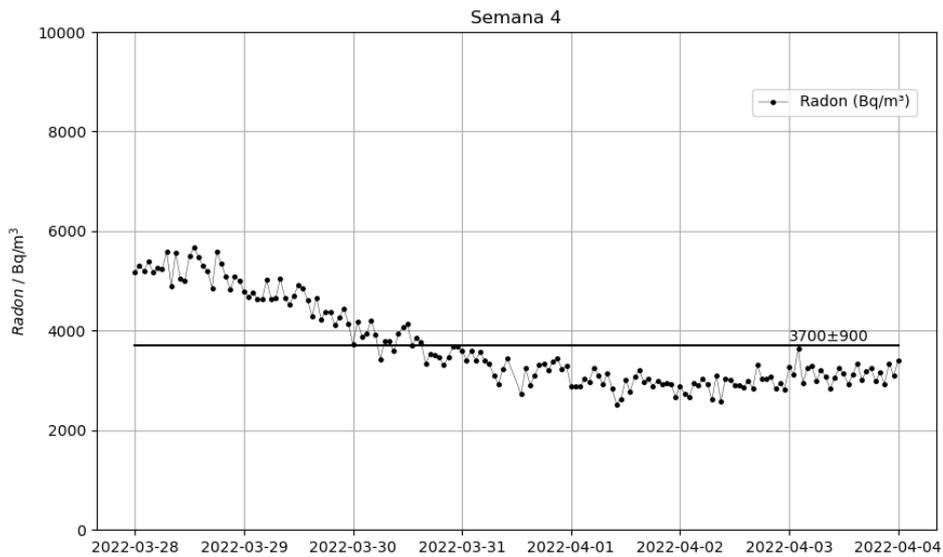


Figura 11: Serie temporal de la Semana 4 de las medidas realizadas desde el 2022/03/28 hasta 2022/04/04, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de F .

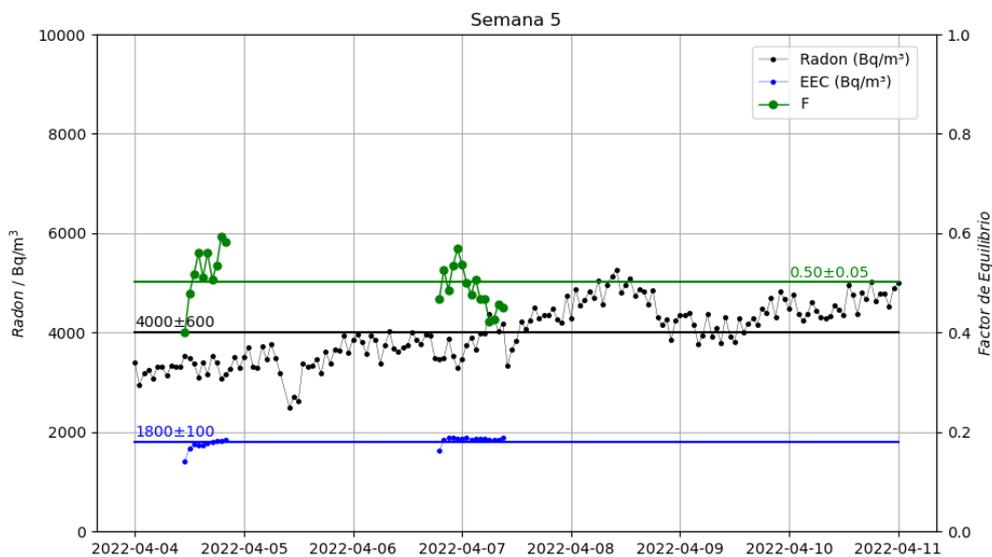


Figura 12: Serie temporal de la Semana 5 de las medidas realizadas desde el 2022/04/04 hasta 2022/04/11, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (EEC) medidos, así como los valores de F calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Se tuvieron en cuenta todos los puntos.

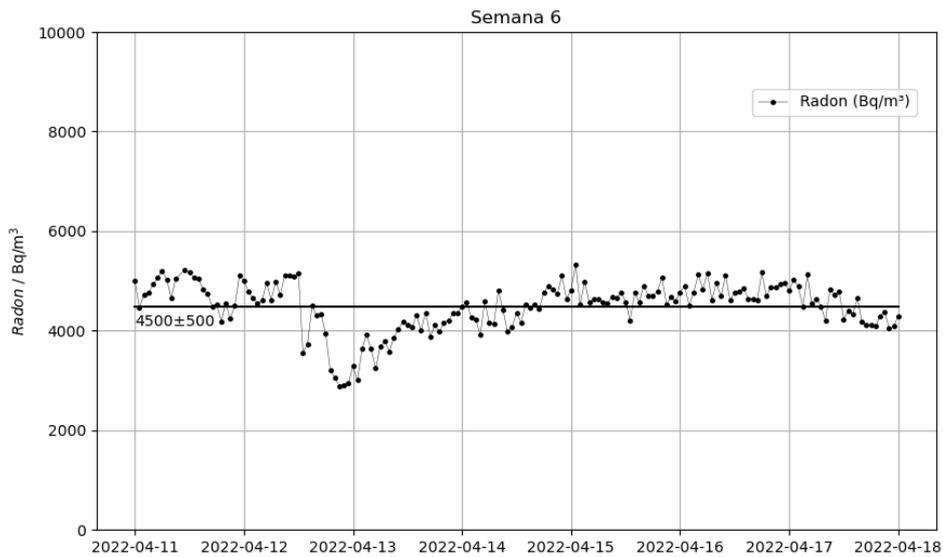


Figura 13: Serie temporal de la Semana 6 de las medidas realizadas desde el 2022/04/11 hasta 2022/04/18, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de F .

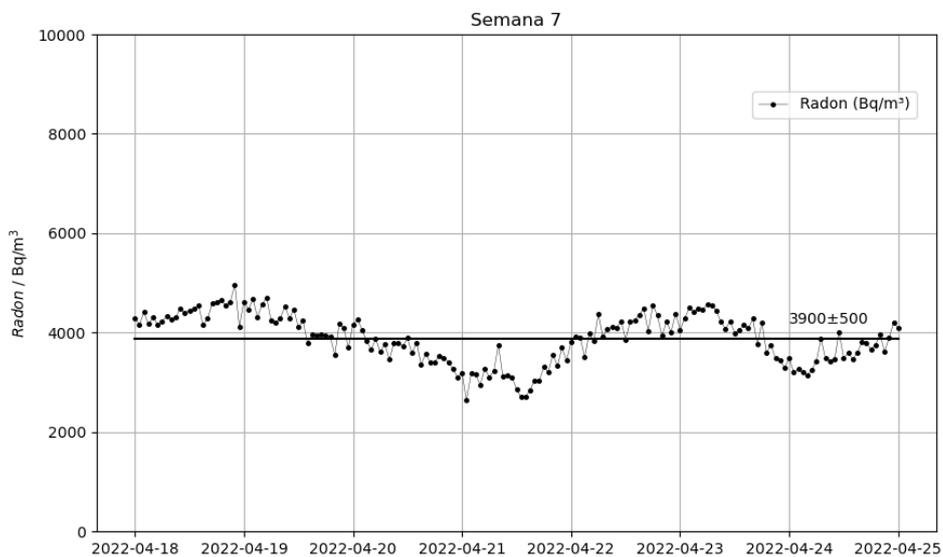


Figura 14: Serie temporal de la Semana 7 de las medidas realizadas desde el 2022/04/18 hasta 2022/04/25, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de F .

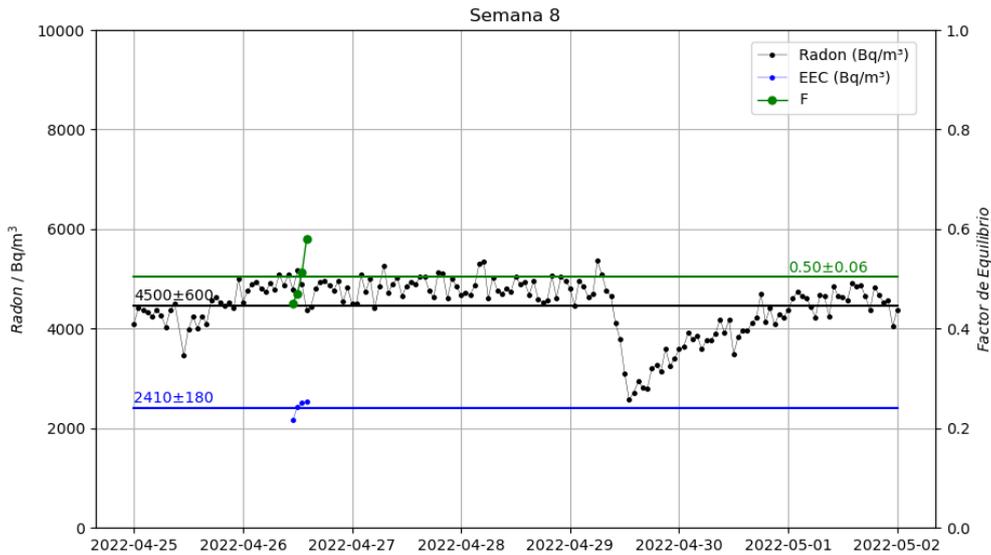


Figura 15: Serie temporal de la Semana 8 de las medidas realizadas desde el 2022/04/25 hasta 2022/05/02, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Se tuvieron en cuenta todos los puntos.

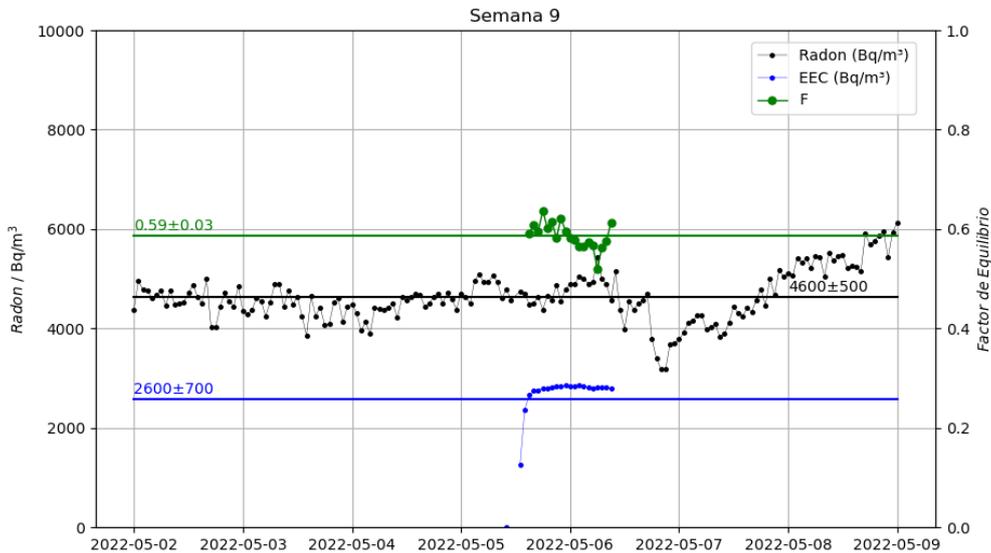


Figura 16: Serie temporal de la Semana 9 de las medidas realizadas desde el 2022/05/02 hasta 2022/05/09, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Sólo se tuvieron en cuenta valores de *F* calculados a partir de valores de *EEC* estabilizados (~ 2600 Bq/m³).

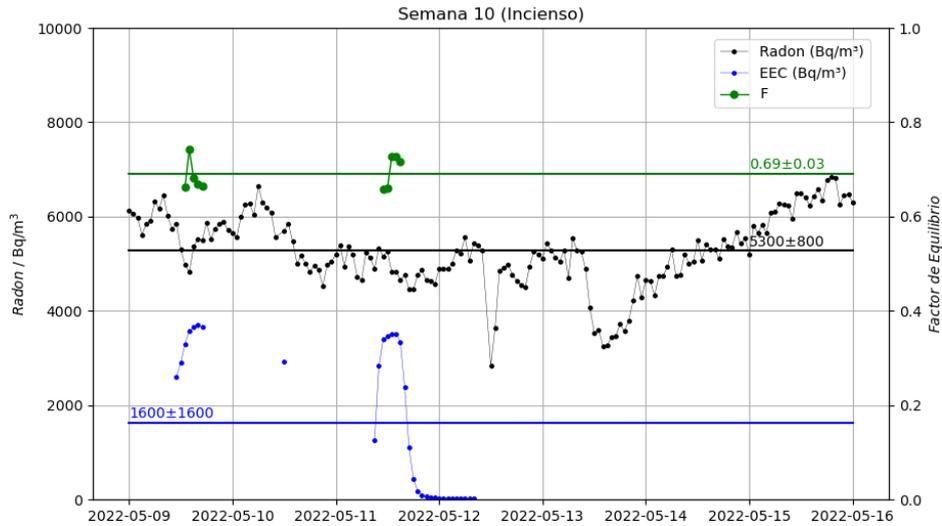


Figura 17: Serie temporal de la Semana 10 de las medidas realizadas desde el 2022/05/09 hasta 2022/05/16, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. En esta semana se quemó incienso en el sótano de las medidas. Sólo se tuvieron en cuenta valores de *F* calculados a partir de valores de *EEC* que estuvieran en la cresta de la curva, ya que rápidamente el filtro del poCAMon se saturaba con los aerosoles de incienso.

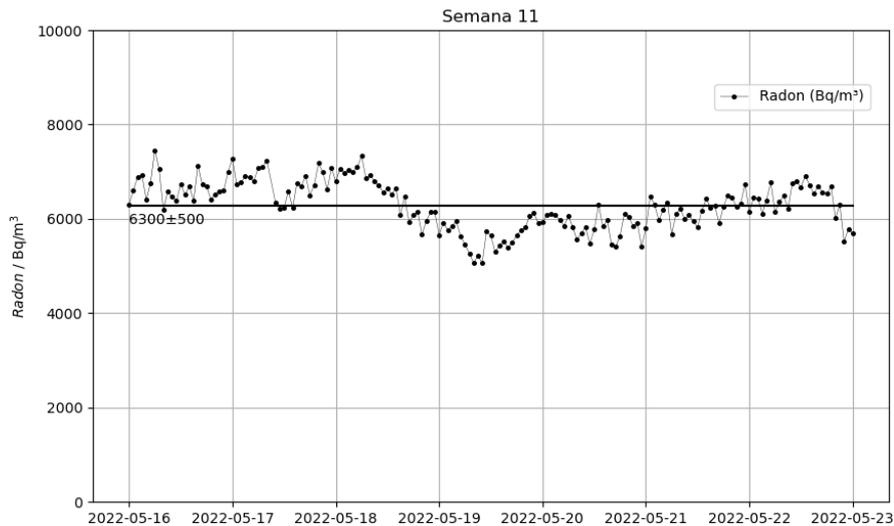


Figura 18: Serie temporal de la Semana 11 de las medidas realizadas desde el 2022/05/16 hasta 2022/05/23, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de *F*.

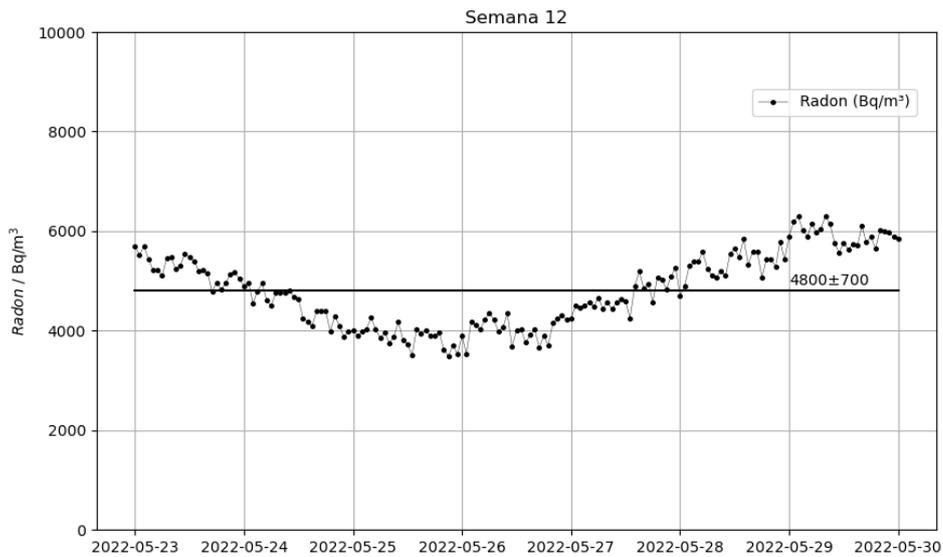


Figura 19: Serie temporal de la Semana 12 de las medidas realizadas desde el 2022/05/23 hasta 2022/05/30, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de F .

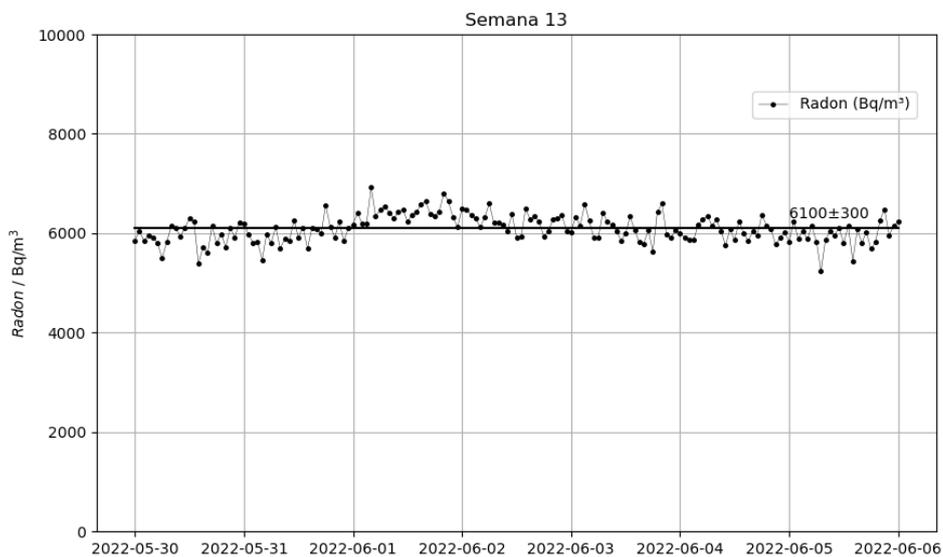


Figura 20: Serie temporal de la Semana 13 de las medidas realizadas desde el 2022/05/30 hasta 2022/06/06, en la que se muestra el valor medio de las concentraciones de radón con el error tomado como la desviación estándar. No hubo medidas con el dispositivo poCAMon, por lo que no se pudieron obtener medidas de F .

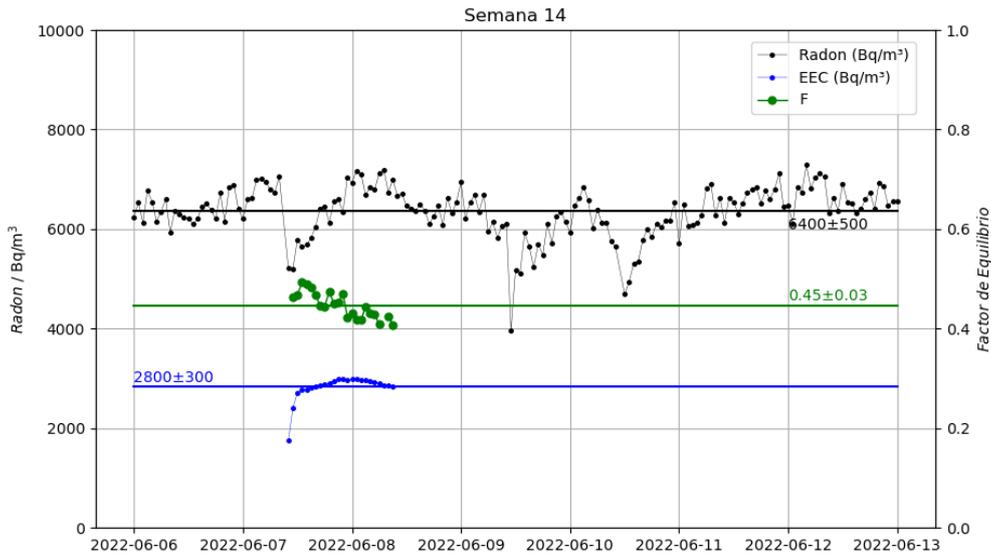


Figura 21: Serie temporal de la Semana 14 de las medidas realizadas desde el 2022/06/06 hasta 2022/06/13, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Sólo se tuvieron en cuenta los valores de *F* calculados una vez los valores de *EEC* se estabilizaron.

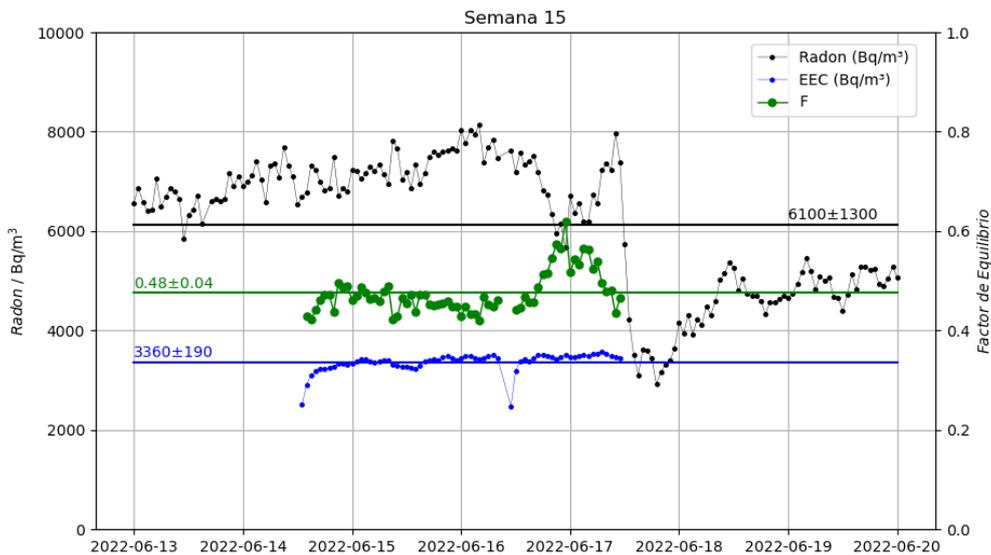


Figura 22: Serie temporal de la Semana 15 de las medidas realizadas desde el 2022/06/13 hasta 2022/06/20, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (*EEC*) medidos, así como los valores de *F* calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. Sólo se tuvieron en cuenta los valores de *F* calculados a partir de valores de *EEC* alrededor de 3350 Bq/m³.

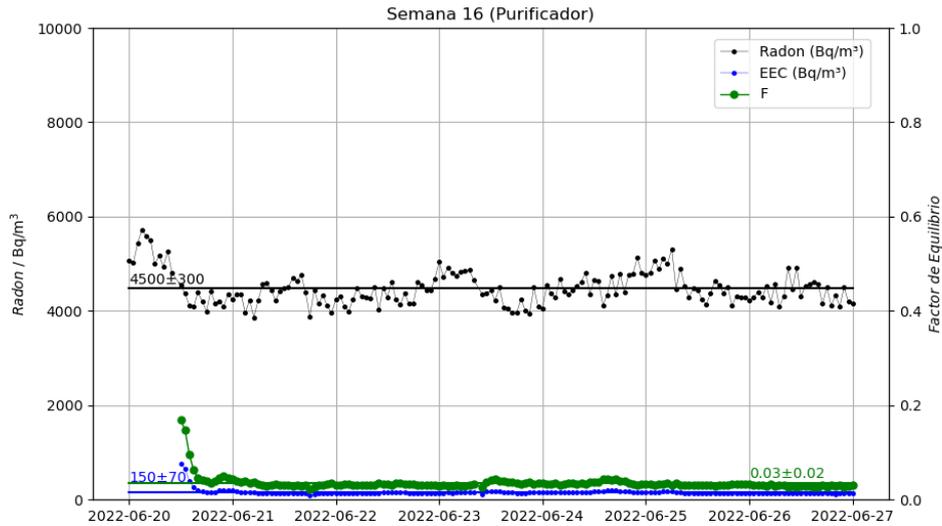


Figura 23: Serie temporal de la Semana 16 de las medidas realizadas desde el 2022/06/20 hasta 2022/06/27, en la que se muestran los valores medios de las concentraciones de radón y concentraciones equivalentes (EEC) medidos, así como los valores de F calculados a partir de la Ecuación (2). Los errores son las desviaciones estándar. En esta semana se usó un purificador en el sótano de las medidas. Se tuvieron en cuenta todos los puntos.

3.2 Medidas instantáneas de F

En la Tabla 5. se presenta un resumen de las medidas y datos obtenidos en las series temporales. Es decir, semanalmente, desde 7/03 hasta 27/06, se presentan las medias de las concentraciones de radón, concentraciones equivalentes y factores de equilibrio, con sus errores (desviaciones estándar de las medidas de la semana). Cabe recordar que aunque, F se calcula a partir de C y EEC (Ecuación (2)), los datos de la tabla no tienen porque corresponderse a la división de las medias, ya que lo que se hizo fue calcular puntualmente, mediante la Ecuación (2), los F de una semana de medidas y más tarde tomar la media de esa semana.

Semanas	$C / \text{kBq/m}^3$	$EEC / \text{kBq/m}^3$	F
S1: 7/03 - 14/03	3.7 ± 1.0	2.10 ± 0.17	0.52 ± 0.05
S2: 14/03 - 21/03	3.8 ± 0.7	2.0 ± 0.2	0.56 ± 0.07
S3: 21/03 - 28/03	4.8 ± 0.3	-	-
S4: 28/03 - 4/04	3.7 ± 0.9	-	-
S5: 4/04 - 11/04	4.0 ± 0.6	1.8 ± 0.1	0.50 ± 0.05
S6: 11/04 - 18/04	4.5 ± 0.5	-	-
S7: 18/04 - 25/04	3.9 ± 0.5	-	-
S8: 25/04 - 2/05	4.5 ± 0.6	2.41 ± 0.18	0.50 ± 0.06
S9: 2/05 - 9/05	4.6 ± 0.5	2.6 ± 0.7	0.59 ± 0.03
S10: 9/05 - 16/05	5.3 ± 0.8	1.6 ± 1.6	0.69 ± 0.03
S11: 16/05 - 23/05	6.3 ± 0.5	-	-
S12: 23/05 - 30/05	4.8 ± 0.7	-	-
S13: 30/05 - 6/06	6.1 ± 0.3	-	-
S14: 6/06 - 13/06	6.4 ± 0.5	2.8 ± 0.3	0.44 ± 0.04
S15: 13/06 - 20/06	6.1 ± 1.3	3.36 ± 0.19	0.47 ± 0.05
S16: 20/06 - 27/06	4.5 ± 0.3	0.15 ± 0.07	0.03 ± 0.02

Tabla 5: Resumen de las medidas presentadas en el apartado 3.1 de las series temporales. Valores medios con desviaciones estándar de concentraciones de radón (columna 2), concentraciones equivalentes (columna 3) y factores de equilibrio (columna 4) para las correspondientes semanas de medida.

3.3 Exposiciones de CR39 abiertos

Grupos	E / h	$D / \text{tr/mm}^2$	$C / \text{kBq/m}^3$	$CF / \text{kBqmm}^2\text{h/m}^3\text{tr}$
G1: 12/04 - 21/04	216	91 ± 4	4.3 ± 0.5	10.2 ± 1.3
G2: 12/04 - 29/04	408	142 ± 3	4.3 ± 0.6	12.4 ± 1.7
G3: 21/04 - 29/04	192	89 ± 4	4.2 ± 0.6	9.1 ± 1.4
G4: 29/04 - 9/05	240	121 ± 7	4.5 ± 0.6	8.9 ± 1.3
G5: 9/05 - 13/05	96	45 ± 4	5.3 ± 0.6	11.3 ± 1.6
G6: 13/05 - 26/05	312	150 ± 4	5.6 ± 1.0	11.6 ± 2.1
G7: 26/05 - 20/06	600	130 ± 29	6.0 ± 0.9	27.7 ± 7.0
G8: 20/06 - 27/06	168	102 ± 8	4.5 ± 0.3	7.4 ± 0.8

Tabla 6: Resumen de las medidas y datos obtenidos para los 8 grupos de detectores CR39. Para los periodos de exposición, se presentan las medias de las densidades de trazas de los detectores abiertos, las medias de las concentraciones de radón y por último, los factores de calibración para detectores abiertos.

En la Tabla 6 se presentan las medidas obtenidas por los 8 grupos distintos de detectores CR39. Las densidades de trazas D , se obtuvieron como la media de las densidades de trazas dadas para los correspondientes detectores abiertos de cada grupo, cuyos errores se tomaron como las desviaciones estándar. También se dan las medias de concentraciones de radón, medidas con el RadonScout, para los periodos de exposición de los grupos de detectores, tomando las desviaciones estándar como los errores. Y por último, los factores de calibración CF para los detectores abiertos, calculados a partir de la división de C por D . Los errores de los factores de calibración se obtuvieron por propagación de errores de las medidas anteriores.

3.4 Ajuste calibración CF vs F

Por último, sólo queda realizar el ajuste de calibración. Para ello, se presentan en la Figura 24. los valores de F y CF que se tienen y el periodo en el que se obtuvieron.

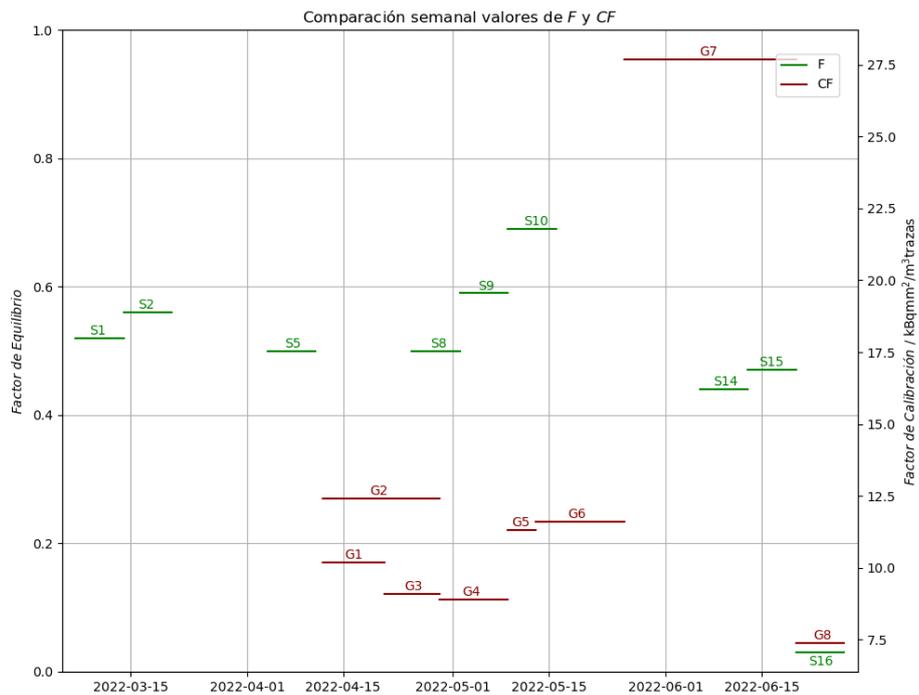


Figura 24: Comparación semanal de los valores de Factores de Equilibrio presentados en la Tabla 5. y Factores de Calibración dados en la Tabla 6.

A partir de esta gráfica, se pueden emparejar valores de F con CF . El G1 está entre los valores S5 y S8, sin coincidir con ninguno, pero, dado que ambos F son iguales se le asoció este valor. Para el grupo G2, igual que G1 pero esta vez sí que coincidía con S8, por lo que se juntó con este. G3 coincidía con S8. Sin embargo, G4 coincidió con S8 y S9, por lo que se asoció una media de estos dos valores de F . El grupo 5 coincidió con el inicio de S10,

semana en la que se quemó el incienso. G6 coincidió brevemente con S10, semana en la que se quemó el incienso. Se estimó que el valor medio de F no disminuiría significativamente con respecto al dado en S10, por lo que se le asoció a este. Para G7, se procedió igual que con G4, uniéndolo a la media de los valores de S14 y S15. Por último, G8 coincide perfectamente con S16, que fue la semana que se colocó el purificador. El resumen de los emparejamientos pueden verse en la Tabla 7. Una vez se tuvieron estos emparejamientos de (CF, F) , se representaron en una gráfica y se realizó un ajuste por mínimos cuadrados siguiendo la Ecuación (4). Los puntos y el ajuste pueden verse en la Figura 25.

Grupos	$CF / \text{kBqmm}^2\text{h}/\text{m}^3\text{tr}$	F
1	10.2 ± 1.3	0.50 ± 0.05
2	12.4 ± 1.7	0.50 ± 0.05
3	9.1 ± 1.4	0.50 ± 0.05
4	8.9 ± 1.3	0.55 ± 0.07
5	11.3 ± 1.6	0.69 ± 0.03
6	11.6 ± 2.1	0.69 ± 0.03
7	27.7 ± 7.0	0.46 ± 0.06
8	7.4 ± 0.8	0.03 ± 0.02

Tabla 7: Resumen de los emparejamientos CF y F .

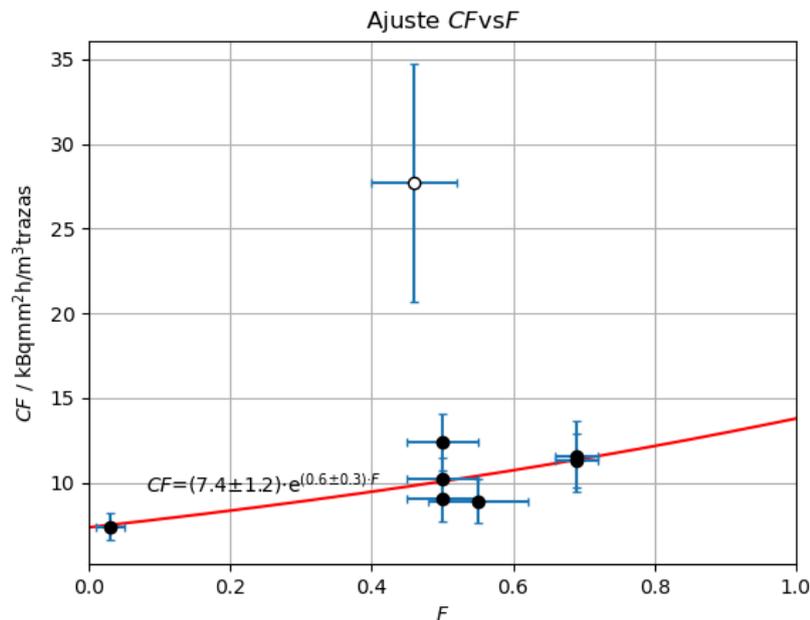


Figura 25: Representación gráfica de los puntos emparejados F y CF presentados en la Tabla 7. El punto blanco no se ha tenido en cuenta para el ajuste. Ajuste realizado por mínimos cuadrados que da $CF = (7.4 \pm 1.2) \cdot e^{(0.6 \pm 0.3) \cdot F}$. Coeficiente de correlación $R = 0.732$.

Notar que en la Figura 25. el punto blanco se desvía mucho de los demás. Este punto es el correspondiente al grupo 7, presentado en la Tabla 7. Con este punto en cuenta el ajuste hubiese quedado: $CF_2 = (11 \pm 6) \cdot e^{(1.2 \pm 1.1) \cdot F}$ y $R_2 = 0.117$. Un ajuste muy malo y, dado que era el único que en aparentes condiciones normales había dado un valor excesivamente mayor al del resto, se decidió no tener en cuenta. El valor tan distinto al resto se debe a la medida de los CR39, que daban valores muy dispares como puede verse en el error de la densidad de trazas en la Tabla 6. Este valor es muy pequeño teniendo en cuenta el tiempo de exposición que estuvieron los detectores. También puede deberse al largo periodo de exposición (600 h) en la que se realizaron pocas medidas de F en las últimas semanas, por lo que el valor de F podría ser muy distinto.

Excluyendo el punto blanco puede verse que la relación exponencial hipotetizada en el artículo [1], se cumple. Igualmente, harían falta más medidas en los valores de F superiores a 0.7 y en los intermedios entre 0.05 y 0.50 para tener una mayor certeza.

Como el objetivo del trabajo es tener el método para obtener el factor de equilibrio. Para ello se sustituyen los valores de los parámetros del ajuste en la Ecuación (5), siendo $A = 7.4 \pm 1.2$ kBqmm²h/m³trazas y $B = 0.6 \pm 0.3$, dando lugar a:

$$F = \frac{1}{0.6 \pm 0.3} \cdot \ln \frac{CF}{7.4 \pm 1.2} \quad (6)$$

3.5 Prueba del ajuste con los detectores cerrados

Del grupo 2 de los detectores CR39 se destinaron dos detectores a realizar medidas con la tapa cerrada. Esto permite validar el ajuste de medida a la vez que demostrar como operar para obtener un valor de F a partir de medidas de un detector abierto y otro cerrado.

La media de las densidades de trazas dadas por estos dos detectores cerrados fue: 50.5 ± 0.6 trazas/mm². Multiplicado esto por el CF_C para detectores cerrados dado por el fabricante (41.95), se pudo obtener el valor de la exposición de gas radón. Con este valor y las densidades de trazas de los detectores abiertos, dada en la Tabla 6. se pudo obtener el CF_A para los detectores abiertos: 14.9 ± 0.4 kBqmm²h/m³traza. Este último cálculo puede resumirse en la siguiente ecuación:

$$CF_A = \frac{D_C CF_C}{D_A} \quad (7)$$

Acudiendo a la Ecuación (6), se puede obtener el valor de F , dando lugar en este caso a $F = 1.166 \pm 0.65$. Teniendo en cuenta que el valor de F asociado a G2 es 0.50 ± 0.05 , el valor esta comprendido dentro de una desviación estándar. Aun así, el valor obtenido tiene un error relativo mayor al 50 %, por lo que no es una buena medida. Esto se debe principalmente al error enorme que tiene la variable B , error relativo del 50 %. Este error tan grande viene principalmente de que en el ajuste hay tres valores con idénticos de F pero con CF distintos, los primeros tres grupos de la Tabla 7. Para arreglar esto habría

que haber tomado más valores de F en ese periodo, lo que hubiera hecho que se pudieran diferenciar los F individuales.

4 Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un ajuste para un sistema de determinación de factor de equilibrio basado en detectores de trazas nucleares (CR39). Para ello, se realizaron medidas, desde 7/03/2022 hasta 27/06/2022, de concentraciones de radón y sus descendientes mediante los dispositivos de medida: RadonScout, poCAMon y detectores CR39. Estas medidas dieron ocho pares de valores de Factores de Equilibrio F y Factores de Calibración para detectores abiertos CF con los que se realizó el ajuste. Hubo uno de estos valores que salió muy diferente al resto, con una incertidumbre muy grande en la densidad de trazas D , que no se tuvo en cuenta en el ajuste. La curva se obtuvo por mínimos cuadrados siguiendo la Ecuación (4). Con lo que se pudo corroborar la ley exponencial predicha en el artículo [1]. Finalmente, el método de medida pudo resumirse en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{0.6 \pm 0.3} \cdot \ln \frac{CF}{7.4 \pm 1.2}$$

El método se puso a prueba gracias a medidas que se realizaron con detectores cerrados y se obtuvo un valor de F que, aunque contenía al valor de referencia que se quería obtener, era un dato con un error relativo mayor al 50%. Este error relativo tan grande provenía de la variable B (0.6 ± 0.3) del ajuste, que tiene un error relativo del 50%. Se concluye que este es el principal punto débil del trabajo experimental realizado, y que podría mejorarse si se obtuvieran más y más precisos pares de valores de CF y F , tanto con detectores abiertos como cerrados.

Referencias

- [1] Domanski, T., Chruscielewski, W., & Zórawski, A. (1984). Method of radon and decay products equilibrium factor measurement with the use of passive track detectors. *Radiation protection dosimetry*, 8(4), 231-238.

- [2] Frutos Vázquez, B., et al. (2022). Mitigación de radón mediante técnica de despresurización: Avances en el diseño y aplicación. *Monografías del Instituto Eduardo Torroja*, 436, 1-26.

- [3] Degu Belete, G., Alemu Anteneh Y. (2021). General Overview of Radon Studies in Health Hazard Studies. *Journal of Oncology*, doi: 10.1155/2021/6659795

- [4] Martinez-Ferri, JE., Juste Vidal, BJ., Ortiz Moragón, J., Martorell Alsina, SS., Verdú Martín, GJ. (2017). Air radon equilibrium factor measurement in a Waste Water Pre-Treatment Plant. *Radiation Physics and Chemistry*. 140, 20-24. doi:10.1016/j.radphyschem.2017.03.011

- [5] Directiva 2013/59/EURATOM del consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom. *Diario Oficial de la Unión Europea*, de 17 de enero de 2014. <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>

- [6] 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. *Boletín Oficial del Estado*, 305, de 21 de diciembre de 2022. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/20/1029/dof/spa/pdf>

- [7] UNSCEAR 2000. (2000). Sources and effects of ionizing radiation. *United Nations Scientific committee on the Effects of Atomic Radiation*, 102-105. UNITED NATIONS PUBLICATION. ISBN: 92-1-142238-8.

- [8] ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

- [9] World Health Organization. (Junio, 2023). WHO: Radon. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- [10] United States Environmental Protection Agency (EPA). (Junio, 2023). EPA: Health Risk of Radon. <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>
- [11] Fomento, M. de, 2019. CTE. Sección DB HS-6. Protección frente a la exposición al radón, in: Código Técnico de La Edificación. España, pp. 1–49.
- [12] Consejo de Seguridad Nuclear. (Junio, 2023). CSN: Mapa de exposición de radón en España. <https://web.archive.org/web/20160304200247/https://www.csn.es/mapa-de-exposicion-al-radon-en-espana>
- [13] Organización Mundial de la Salud. (Junio, 2023). Vive sin radón. <https://vivesinradon.org/oms/>
- [14] Real Academia Española. (Junio, 2023). RAE: Aerosol. <https://dle.rae.es/aerosol>
- [15] U.S. Department of Energy. (Junio, 2023). DOE: Working Level (WL). https://www.directives.doe.gov/terms_definitions/working-level-wl#:~:text=Definition,MeV%20of%20alpha%20particle%20energy.
- [16] SARAD. (Junio, 2023). RadonScout/RadonScout Plus: Instrumento para medir Radón. https://www.sarad.de/product-detail.php?p_ID=37&cat_ID=1
- [17] SARAD. (Junio, 2023). poCAMon: Continuous Air Monitor (CAM) portátil. https://www.sarad.de/product-detail.php?p_ID=60&cat_ID=2