



*Facultad
de
Ciencias*

**ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD AL GAS
RN-222 EN DIFERENTES LÁMINAS USADAS
EN LA CONSTRUCCIÓN**

Trabajo de Fin de Carrera
para acceder al título de

LICENCIADA EN FÍSICA

Autora: Mónica García Pérez

Director: Carlos Sainz Fernández

Julio - 2013

Agradecimientos:

Quería expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado para llegar hasta aquí; en especial a mi familia y mis amigos, que tanto han tenido que aguantarme durante estos años. Sin olvidarme, por supuesto, de todos mis compañeros de clase; en especial de mis físicas, que han sido uno de los pilares más importantes en mi estancia universitaria.

Finalmente, y no por ello menos importante, quería agradecer la dedicación de Carlos Sainz Fernández, director de proyecto, y José Luis Gutiérrez Villanueva, por conseguir que un proyecto de fin de carrera deje de ser "una asignatura más" y se convierta en algo verdaderamente apasionante.

ÍNDICE

1.	Introducción	5
2.	La radiactividad.....	7
2.1.	Introducción	7
2.1.1.	Radiación alfa.....	8
2.1.2.	Desintegración beta	9
2.1.3.	Radiación gamma.....	10
2.1.4.	Ley de la desintegración radiactiva.....	10
2.2.	Cadenas radiactivas.....	11
3.	El radón	13
3.1.	Isótopos del radón	13
3.2.	Riesgos para la salud.....	13
3.2.1.	Irradiación por inhalación de radón y descendientes	13
3.2.2.	Interacción de la radiación con la materia viva	14
3.2.3.	Riesgos por inhalación de radón	14
3.3.	Fuentes de radón.....	15
3.3.1.	Corteza terrestre	15
3.3.2.	Materiales de construcción.....	16
3.3.3.	Agua	16
3.4.	Transporte de radón.....	17
3.5.	Prevención y mitigación en viviendas.....	18
3.5.1.	Ventilación interior	20
3.5.2.	Sistemas de extracción	20
3.5.3.	Sistemas de presurización	21
3.5.4.	Barreras	21
4.	Materiales y método	23
4.1.	Contenedores.....	23
4.2.	Fuentes de radón.....	23
4.3.	Detector Radon Scout.....	25
4.4.	Materiales.....	26
4.5.	Métodos de análisis	29
4.5.1.	Método utilizado en el LaRUC	29
4.5.2.	Descripción de los métodos de adquisición de datos	31
4.5.2.1.	RnIter2008.....	33

4.5.2.2.	RnTrans2011	35
5.	Resultados y análisis	36
5.1.	Analíticos	36
5.1.1.	Determinación del término fuente.....	39
5.1.2.	Determinación del coeficiente de difusión y permeabilidad	40
5.2.	Simulación.....	41
5.2.1.	RnIter2008.....	41
5.2.2.	Análisis comparativo de los dos métodos empleados	41
5.2.3.	RnTrans2011	43
5.3.	Evaluación de los criterios de aceptación de membranas	46
6.	Conclusiones	47
7.	Bibliografía	48
	APÉNDICE 1: Propagación de errores en la determinación del término fuente.	49
	APÉNDICE 2: Propagación de errores en el cálculo del coeficiente de difusión, adsorción y permeabilidad.	49

1. Introducción

El radón (Rn-222) es un gas radiactivo cuyo periodo de desintegración es de 3.82 días, y que se origina, por desintegración del radio (Ra-226), en el seno de la corteza terrestre. Al tratarse de un gas, se mueve por los poros del suelo hasta que alcanza la superficie donde se incorpora a la atmósfera.

En el caso particular de un recinto cerrado tal como viviendas o puestos de trabajo, las concentraciones de radón pueden ser varios órdenes de magnitud superiores a las del aire libre debido al reducido espacio disponible y la escasa ventilación.

Teniendo en cuenta que numerosos estudios han demostrado que la inhalación del gas Rn-222 está vinculada al riesgo de contraer cáncer de pulmón, queda justificado que el radón haya empezado a considerarse como un factor a tener en cuenta tanto en la construcción de nuevas viviendas, como en viviendas y algunos lugares de trabajo ya existentes.

En muchos países ya existe una regulación que asigna unos niveles límite de concentración en las edificaciones, lo que implica que será necesario llevar a cabo ciertas actuaciones en aquellos que superen dichos niveles. Así, el control de la exposición a radón en interiores debe enfocarse de dos maneras. Por un lado, con acciones de remedio para casas ya construidas, y por otro, con el objetivo de prevenir altas concentraciones en las nuevas construcciones. En cualquier caso, las soluciones adoptadas frente a este problema varían desde una simple ventilación interior de la vivienda hasta la instalación de un sistema de extracción de aire o colocación de barreras frente al paso del gas radón.

El objetivo de este proyecto es caracterizar la permeabilidad de varias membranas usadas en la construcción como barreras frente a la entrada del gas Rn-222 mediante la determinación de su coeficiente de difusión y adsorción.

Asimismo, se compararán estos resultados con dos programas de simulación basados en la metodología empleada por el grupo del Dr. Martin Jiranek de la Universidad Technica de Praga (República Checa), referencia internacional en este tipo de determinaciones: RnIter2008 y RnTrans2011. El primero reproduce los perfiles de concentración en los dos compartimentos y determina el coeficiente de difusión resolviendo iterativamente la ecuación de transporte del radón, y el segundo simula la concentración de este gas con el espesor de la membrana.

La estructura del trabajo es la siguiente: En el segundo capítulo se explican ciertos conceptos básicos de radiactividad que se nombrarán a lo largo del trabajo. En el tercero nos centraremos en el gas radón explicando su procedencia, los riesgos que entraña, las recomendaciones que establece la Unión Europea así como los métodos de prevención y mitigación más usados. Además, se detallarán cuáles son las fuentes de radón y se explicará cómo es su transporte hacia la atmósfera. En el cuarto capítulo se

describirá el dispositivo experimental utilizado en la realización del trabajo y el procedimiento que se ha llevado a cabo. En el quinto capítulo se expondrán y analizarán los resultados obtenidos enumerando, en el capítulo sexto, las conclusiones a las que se ha llegado y las posibles líneas futuras de actuación que presenta este proyecto. Finalmente, en el séptimo capítulo se detallará la bibliografía utilizada en su realización.

2. La radiactividad

2.1. Introducción

Las radiaciones ionizantes son aquellas capaces de ionizar; es decir, de arrancar electrones y por tanto modificar la materia.

Todo el mundo, por el hecho de vivir en este planeta, está expuesto a la radiación ionizante de origen natural. Ésta procede de los rayos cósmicos del espacio exterior y de las sustancias naturales radiactivas que provienen de la corteza terrestre. En el caso de la radiación artificial, ésta proviene de las actividades humanas como pueden ser los exámenes médicos, restos de accidentes nucleares, etc.

Más del 80% de la exposición a la radiación ionizante es de origen natural, dentro de los cuales aproximadamente un 50% es atribuible a la presencia del radón en la atmósfera.

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), la dosis media mundial de radiación ionizante es de 3,7 mSv/año. De estos, 2,4 mSv son debidos a la radiación natural, y por ello, 1.2 mSv provienen del radón [1].

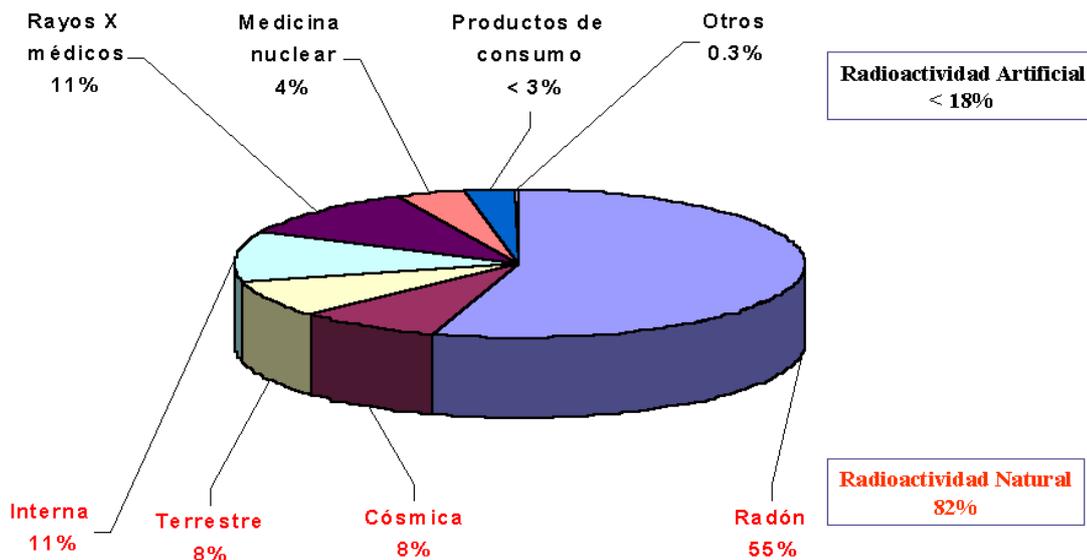


Figura 1: Contribución de las distintas fuentes de exposición, de origen natural y artificial, a la dosis recibida por la población.

La radiactividad es una propiedad que presentan los núcleos inestables. Los núcleos son agregados de nucleones (neutrones y protones) que se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte y se caracterizan por dos números.

El número atómico Z , que es el número de protones de un elemento, y el número másico A , que es el número de nucleones. Así, de forma general, todo núcleo puede expresarse como ${}^A_Z X$.

En la naturaleza, existen ciertos núcleos inestables con un exceso de masa o energía que tienden a emitir espontáneamente partículas transformándose así, en otro núcleo más estable que el original.

Cuando el número atómico es pequeño ($Z < 30$), la estabilidad se consigue cuando el número de protones es igual al número de neutrones. Sin embargo, según va aumentando este valor, las repulsiones de los protones en el núcleo se hacen mayores, por lo que la estabilidad se consigue con un mayor número de neutrones y la relación $N/Z=1$ deja de cumplirse.

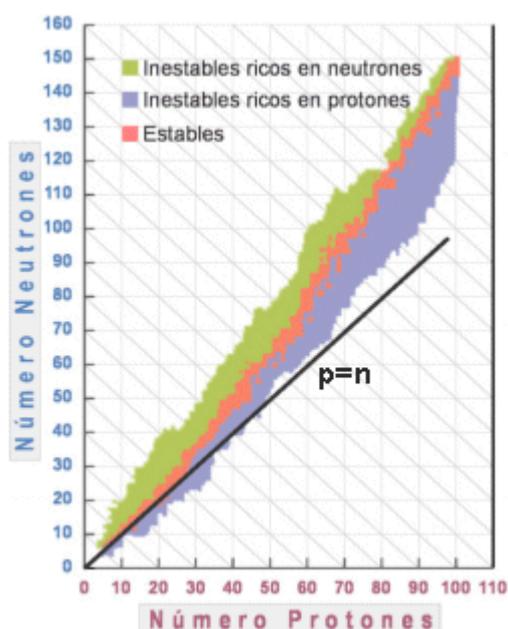


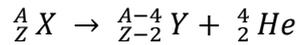
Figura 2: Diagrama de estabilidad de los núcleos atómicos

Las partículas emitidas para alcanzar la estabilidad pueden ser de varios tipos. Si se trata de núcleos de helio se habla de radiactividad alfa, y si son electrones o positrones de radiactividad beta (negativa o positiva respectivamente). La radiación gamma consiste en una emisión de fotones procedentes del núcleo, cuando éste se halla en un estado excitado. A continuación se explican brevemente cada una de ellas:

2.1.1. Radiación alfa

Consiste en la emisión espontánea de partículas alfa, constituidas por la unión de dos protones y dos neutrones fuertemente ligados (núcleos de He-4).

En estos procesos, el número atómico disminuye en dos unidades y su número másico en cuatro de la siguiente forma:



La emisión de partículas alfa se debe a la inestabilidad de un elemento debido a la repulsión eléctrica entre los protones del núcleo. Este efecto tiene mucha más importancia en el caso de núcleos pesados pues la fuerza eléctrica repulsiva crece con $Z(Z-1)$ y la fuerza nuclear, que es la que mantiene la estructura de los nucleones, crece, en primera aproximación, con A [2].

Se puede comprobar que la suma de las masas de la partícula emitida y el núcleo hijo es inferior a la masa del núcleo padre. Esta diferencia en masa equivale a la energía que se ha liberado en el proceso y que ha servido para ganar estabilidad:

$$Q_\alpha = (m_X - m_Y - m_\alpha) \cdot c^2$$

Asimismo, como los productos de la desintegración están dotados de una energía cinética, ésta debe ser igual a la liberada en el proceso:

$$Q_\alpha = E_Y + E_\alpha$$

Suponiendo que el núcleo original esté en reposo, por conservación del momento debe cumplirse que $P_Y = P_\alpha$.

Dado que la energía de la partícula alfa es del orden de los MeV, y por tanto no relativista, se puede afirmar que $E_\alpha = P_\alpha^2 / 2m_\alpha$.

De donde finalmente, se obtiene que la energía esta partícula será:

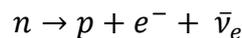
$$E_\alpha = \frac{Q_\alpha}{\left(1 + \frac{m_\alpha}{m_Y}\right)}$$

Es importante conocer esta energía ya que algunos detectores usados para medir la concentración de radón lo hacen a partir de dicho valor, como se verá más adelante.

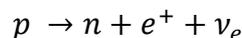
2.1.2. Desintegración beta

Consiste en la emisión de un electrón o positrón (desintegración beta negativa o positiva, respectivamente).

En el primer caso, se produce una transformación de un neutrón a un protón; con la emisión de un electrón y un antineutrino.



En el segundo caso, es un protón el que se transforma en un neutrón, emitiendo a su paso un positrón y un neutrino.



En cualquiera de los dos casos, el número atómico varía; pues aumenta o disminuye en una unidad; pero el número másico A se mantiene constante.

2.1.3. Radiación gamma

La emisión de radiación gamma es un proceso mediante el cual un núcleo que se encuentra en un estado excitado pasa a otro de menor energía emitiendo radiación electromagnética. En general, la energía de los fotones gamma se encuentra entre los KeV y los MeV.

El espectro energético de un radionucleido emisor gamma es discreto, formado por una o varias líneas monoenergéticas cuyas energías e intensidades son específicas de cada radionucleido. Esta propiedad tiene una gran importancia ya que permite el análisis isotópico de una muestra radiactiva.

2.1.4. Ley de la desintegración radiactiva

Ya se ha visto que cuando un núcleo se desintegra, desaparece como tal, emitiendo una partícula y transformándose en otro núcleo. Este comportamiento se refleja en la ley del decaimiento radiactivo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Siendo N_0 el número de núcleos en $t=0$ y λ la constante de desintegración, que es la probabilidad que tiene un núcleo de desintegrarse por unidad de tiempo.

A partir de la ec.(1) se define una magnitud denominada $T_{1/2}$ que indica el tiempo que tendrá que transcurrir para que el número total de núcleos se reduzca a la mitad.

Asumiendo que $T_{1/2}$ es el tiempo que hace que N sea $N_0/2$ se deduce que:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

En el caso del Rn-222, el período de semidesintegración es de 3.82 días, lo que implica que su constante de desintegración es de $7.56 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$.

Asimismo, una magnitud que está relacionada con λ y por tanto con $T_{1/2}$ es la vida media. Ésta da una idea del tiempo que tardan los átomos de un elemento en desaparecer.

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

A partir de la ley del decaimiento radiactivo, se puede obtener:

$$A = -\frac{dN}{dt} = N\lambda$$

A esta expresión se la conoce como actividad de una muestra, e indica el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional, la unidad es el Becquerelio (Bq) que equivale a una desintegración/s.

2.2. Cadenas radiactivas

La serie de desintegraciones que necesita un núcleo para volverse estable se denomina cadena radiactiva. En la naturaleza se encuentran tres; cuyo nombre proviene del elemento inicial: Uranio-238, Uranio-235 y Torio-232.

Todas las cadenas presentan varias características en común. Una de ellas es que todas acaban en isótopos del plomo y otra es la presencia de isótopos del radón (Rn-222, Rn-220 y Rn-219, respectivamente) tratándose del único elemento gaseoso de toda la cadena.

Nos centraremos únicamente en la cadena del U-238 pues es donde se encuentra el isótopo Rn-222, que es el que ocupa lugar en este trabajo por razones que se explicarán posteriormente.

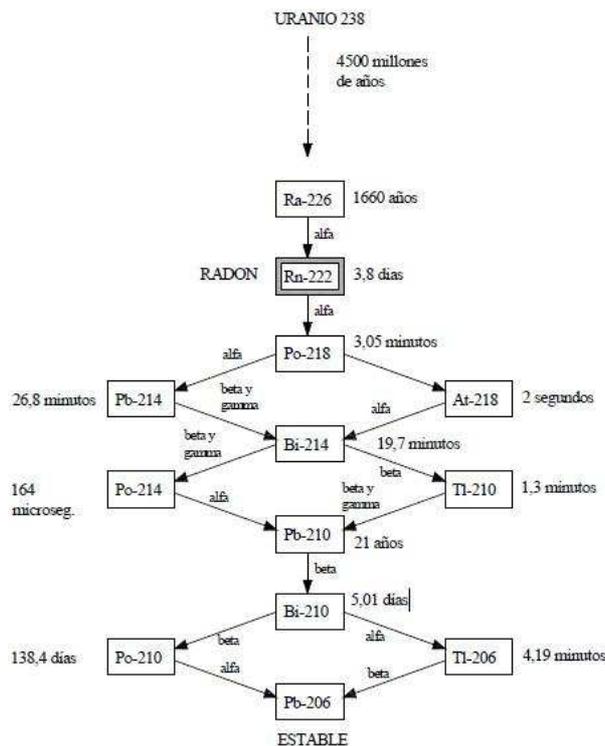
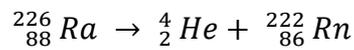


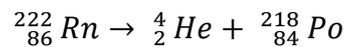
Figura 2: Cadena radiactiva del U-238

Empecemos considerando la radiactividad del Ra-226. Este núcleo inestable consta de 88 protones y 138 neutrones y es un producto de desintegración del U-238, con un periodo de semidesintegración de 1602 años.

Para alcanzar una mayor estabilidad emite una partícula alfa y se transforma en su núcleo hijo, el Rn-222.



Este núcleo, también radiactivo, emite otra partícula alfa, para convertirse en Polonio-218.



Al polonio se le conoce como uno de los descendientes sólidos del radón y tiene un especial interés debido a su riesgo para la salud, como se detallará en el siguiente capítulo.

3. El radón

3.1. Isótopos del radón

El radón es un elemento químico de número atómico $Z=86$. En la naturaleza, existen tres isótopos naturales: Rn-222, Rn-220 y Rn-219 cuyos nombres son radón, torón y actinón respectivamente y sus periodos de desintegración $3.3 \cdot 10^5$ s, 55 s y 4 s. Teniendo en cuenta estos valores, una mezcla de todos los isótopos supondría que, transcurrido algo más de un minuto, encontraríamos únicamente Rn-222. Es por eso que en este trabajo nos referimos únicamente a dicho isótopo.

El radón es un gas inerte que se origina en el seno de la corteza terrestre donde exista radio, y por tanto, minerales de uranio. Por tratarse de un gas noble, posee unas ciertas propiedades: es inodoro, incoloro y presenta una reactividad química muy baja, lo que quiere decir que es muy estable e interacciona poco químicamente. Además, es un gas muy denso y con una alta solubilidad [3].

El hecho de que el radón sea un gas, le otorga una gran movilidad. Por eso es capaz de moverse a través de poros o grietas hasta alcanzar la superficie terrestre, convirtiéndose ésta en una fuente superficial de este gas. Esta fuente vierte continuamente radón a la atmósfera, en el seno de la cual se diluye y dispersa. Gracias a ciertos efectos como las condiciones de dispersión del medio, la velocidad del viento y los movimientos convectivos, el radón se encuentra bien mezclado con los demás componentes atmosféricos.

3.2. Riesgos para la salud

3.2.1. Irradiación por inhalación de radón y descendientes

Al inhalar radón, éste, por tratarse de un gas noble, no se metaboliza y se exhala del organismo. Sin embargo, dado que se trata de un núcleo inestable que da lugar a isótopos de periodo de semidesintegración muy corto, en una muestra radiactiva se encuentran otros emisores alfa como son el Po-218 y 214 y emisores beta y gamma como el Pb-214, Bi-214 y Pb-210.

Los descendientes sólidos del radón se fijan al tracto respiratorio constituyendo fuentes de radiación intensas y por tanto peligrosas para el organismo. Es preciso matizar que el radón en sí no implica un alto riesgo, sino que son sus descendientes los que lo presentan, siendo los más importantes el Po-218 y 214 por ser emisores alfa como su progenitor [3].

El poder de penetración de las partículas alfa es muy pequeño; esto quiere decir que pierden mucha energía por unidad de recorrido, y por eso se frenan en unos pocos cm en el aire, y la epidermis actúa de blindaje; sin embargo, cuando la fuente de partículas alfa penetra en el organismo, en general por inhalación, las partículas emitidas producen ionizaciones en el seno de la materia, de forma que las células

irradiadas pueden experimentar modificaciones en su material genético, o dar lugar a una creación de radicales libres. En cualquier caso, una sola partícula alfa puede causar un daño en la célula y por eso es improbable que haya un umbral de radiación por debajo del cual el radón no suponga un riesgo para la salud. Si bien, es cierto, que la probabilidad de que esta partícula alfa interactúe directamente con un tramo del ADN encargado de la división celular es muy pequeña.

3.2.2. Interacción de la radiación con la materia viva

Una de las características más importantes de las radiaciones ionizantes es su capacidad de penetrar en la materia e interactuar con ella. En estas interacciones, la radiación pierde parte de su energía cediéndola al medio que atraviesa mediante distintos mecanismos que dependen del tipo de radiación, de su energía y de las propiedades del medio material con el que interactúa.

La acción directa de la radiación se produce cuando la partícula ionizante interactúa con una molécula biológica (ADN, ARN, proteínas, etc) cediéndole toda su energía. Como consecuencia, esta molécula quedará ionizada o excitada, produciendo cambios en su composición química.

La acción indirecta implica la absorción de la energía disipada en el medio intracelular de la célula. En este caso, se da lugar a la formación de radicales libres (átomos o moléculas con un electrón desapareado), que pueden unirse a otro electrón de otro átomo y producir reacciones químicas que causen cambios en la composición química de la célula.

Las consecuencias de la acción directa o indirecta de la radiación dependerán del tipo de célula sobre la que incida, pues cada tipo celular presenta un grado diferente de sensibilidad al daño producido por la radiación ionizante.

3.2.3. Riesgos por inhalación de radón

El compendio de los estudios epidemiológicos más relevantes a nivel mundial realizado por la Organización Mundial de la Salud [4] indica que el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco; asimismo señala que es mucho más probable que se produzca esta enfermedad en personas fumadoras, o que han fumado en un pasado, que en las no fumadoras. Además, advierte que el riesgo de padecer cáncer es directamente proporcional a la concentración de radón a la que nos vemos sometidos, estimando que entre el 3% y el 14% de la población que padece esta dolencia se debe a haberse visto sometido a concentraciones medias o incluso bajas de radón; aunque estos porcentajes dependen de la concentración media de radón del país y del método de cálculo.

3.3. Fuentes de radón

Las principales fuentes de radón en los espacios interiores son: la corteza terrestre, los materiales de construcción, y las aguas subterráneas.

3.3.1. Corteza terrestre

De manera general, los suelos y rocas sobre los que se asientan las viviendas suelen constituir la principal fuente de entrada de radón en el espacio interior. La emisión o exhalación de radón desde las rocas y el suelo al aire vienen está influenciada por varios factores [5]:

- La actividad de la fuente de radón en la roca o suelo que se trate, la cual viene fijada por la concentración de Ra-226 que se encuentre en esa zona.
- La fracción de radón que se genera en los granos del material y que es capaz de escapar de los poros del suelo o la roca (poder de emanación).
- La existencia de grietas o vías que faciliten el movimiento de radón hacia la superficie.
- El contenido en humedad de la tierra, por tratarse de un gas soluble en agua y líquidos afines.

La concentración de radio en los suelos varía según el tipo de roca. En general, la corteza terrestre es un material poco compacto donde existen diferentes granos que lo forman poros (pequeñas cavidades llenas de aire y rodeadas de partículas de mineral, que pueden contener en su superficie o interior átomos de radio).

La aglomeración de estos poros es lo que cambia de un suelo a otro y determina si en esa zona se va a producir una mayor concentración de radón o no. Además, también influye la posición del átomo de radio dentro del poro de la roca ya que sólo el radón que se encuentre cercano a su superficie tendrá la suficiente energía cinética para escapar.

El átomo de radio que se desintegra en la partícula alfa y el átomo de radón, originalmente se encuentra prácticamente en reposo. Por tanto, por conservación del momento lineal, las velocidades de la partícula alfa y del núcleo de radón deben tener sentidos opuestos. Estos irán perdiendo su energía cinética por ionización y excitación atómica, de manera que el átomo de radón, denominado de retroceso, puede penetrar más en el interior del grano del material, o por el contrario, salir hacia la superficie del poro. Cuanto mayor sea la distancia recorrida por el átomo de radón mayor será la probabilidad de que se incorpore al aire del poro. Si no es así, quedará retenido en el grano del mineral.

Este efecto está cuantificado por una magnitud que se denomina poder de emanación y se define como la fracción de radón generado en los granos de material entre lo que se incorpora a los poros que los rodean.

Este valor está determinado por el tamaño y distribución de los granos en el interior del mineral. Si el Ra-226 estuviera distribuido homogéneamente en los granos del mineral, entonces el poder de emanación disminuiría a medida que el tamaño de estos aumentase. Por otro lado, si el radio se concentrara en las proximidades de la superficie de los granos, el poder de emanación del radón aumentaría ya que sería necesario poca energía cinética para que el radón llegase a los poros.

En general, en rocas muy compactas, como puedan ser las volcánicas, la porosidad es pequeña, lo que implica que los átomos de radón encontrarán dificultades en traspasarlos, y por tanto, la exhalación de radón a la atmósfera será menor. Sin embargo, si hablamos de rocas muy fracturadas, aunque sean compactas, serán una vía de escape del radón, permitiendo su transporte hacia la superficie.

3.3.2. Materiales de construcción

Dado que los materiales con los que se construyen los edificios provienen de la corteza terrestre, según el contenido de radio que posean los materiales, la exhalación de éstos será mayor o menor.

Los principales elementos radiactivos presentes en los materiales de construcción son el radio (Ra-226), el torio (Th-232) y el potasio (K-40), con unas concentraciones que varían en función de distintos factores como la propia concentración de radio en el material, su porosidad, la preparación de la superficie o el acabado exterior. Algunos de los materiales de construcción que liberan radón emplean, en su composición, residuos industriales como las escorias de alto horno, las cenizas volantes, u otros materiales tales como las piedras naturales, como el granito o la pizarra, los ladrillos, el cemento portland, la arena, la grava, el yeso natural y, en niveles mínimos en España, la madera. Además, es importante tener en cuenta que pueden existir productos como los ladrillos y los hormigones con concentraciones elevadas de radón si los materiales base de los que están compuestos se han extraído de zonas con alta radiación natural. [6]

3.3.3. Agua

El agua puede contener radón disuelto en grandes cantidades cuando proviene de acuíferos subterráneos y no se ha tratado adecuadamente.

Para que los niveles de radón en las aguas subterráneas sean elevados, es necesario que dicha agua esté en contacto con rocas que presenten altas concentraciones de Ra-226. Sin embargo, la aireación que se produce durante diferentes tratamientos del agua en superficie, hace que la pérdida de radón sea prácticamente completa.

La mayor contribución a la actividad de este gas en el aire, puede llegar a ser una importante fuente de contaminación en instalaciones de determinados balnearios pero la agitación que se produce en las duchas y los grifos hace que el radón se desorba, con lo que el mayor riesgo se debe a la inhalación y no a la incorporación por ingestión.

3.4. Transporte de radón

Los mecanismos que gobiernan el transporte de radón desde la corteza terrestre hacia la atmósfera son complejos y suelen ser difíciles de modelar.

El radón, se mueve principalmente por dos mecanismos [3]:

- Difusión: movimiento del gas debido a diferencias de concentraciones, desde un área de alta concentración a otra de baja concentración. Esta magnitud viene determinada por el coeficiente de difusión D , medido en m^2/s y que depende de cómo es el medio en el que se difunde el gas.
- Convección: movimiento del fluido en el que se encuentra el gas por gradientes de temperaturas o presiones. Este es el mecanismo predominante en los suelos sobre los que se asientan las viviendas.

El contenido de humedad del suelo también es un factor importante que afecta al poder de emanación (aumentándolo si hay poca presencia de humedad) y al transporte de radón (dificultándolo ya que la presencia de agua favorece el frenado de los átomos de radón que escapan de los granos, originando una disminución tanto en el coeficiente de permeabilidad como el de difusión).

Una de las propiedades más interesantes del radón es su capacidad de ser adsorbido por una gran variedad de sólidos. La adsorción consiste en la acumulación superficial de un gas en un material y es consecuencia de la facilidad que tenga un gas para diluirse y condensarse en el sólido.

3.5. Prevención y mitigación en viviendas

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Organización Mundial de la Salud (WHO) y la Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA) han instado a los países la creación de programas nacionales de radón donde se incluyan mapas de radón indicando los niveles de concentración de este gas [4].

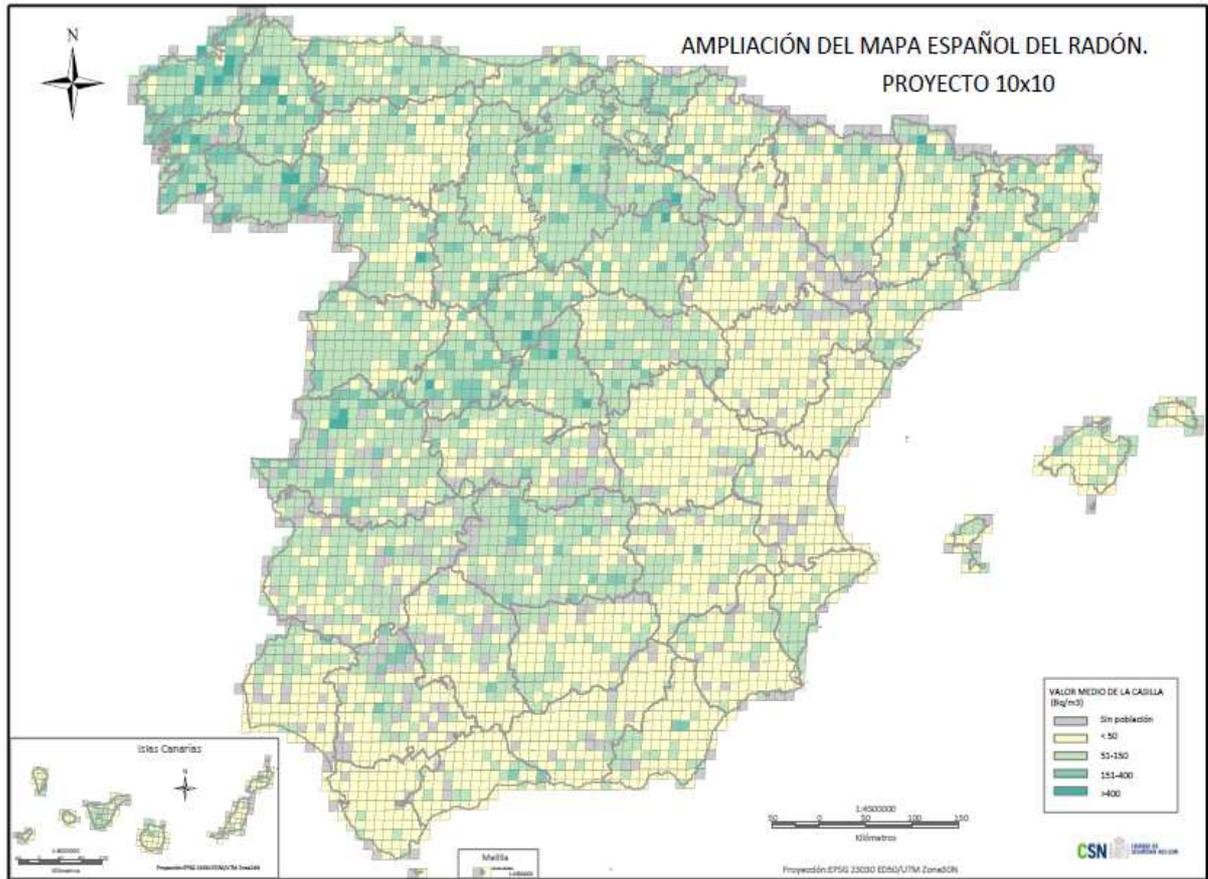


Figura 3: Mapa nacional de concentración de radón [7]

Asimismo, en estos programas se han de incluir límites en la concentración e introducción de acciones de prevención y remedio.

Los elementos clave para garantizar la eficacia de las acciones de prevención y mitigación de un programa nacional de radón son las siguientes [4]:

- Las acciones de control de radón deben considerar la combinación de diferentes tipos de construcciones bien viviendas ya existentes o las que sean de nueva construcción. Asimismo, deben tenerse en cuenta los lugares en los que las personas puedan pasar largos periodos de tiempo, como lugares de trabajo, escuelas, etc.
- Es necesario tener en cuenta la relación coste-beneficio en las distintas estrategias de prevención y remedio aplicadas a cada tipo de construcción.

- Debe considerarse la contribución de las distintas fuentes de entrada de radón en interiores (suelo, agua, materiales de construcción) ya que puede variar de una región a otra.
- Finalmente, una de las bases para garantizar que dichas medidas tengan éxito se fundamenta en la formación de profesionales en este campo.

Las vías de entrada de radón en una vivienda pueden ser muy variadas (fig. 4). Esto implica que deben realizarse estudios previos, tanto desde el punto de vista arquitectónico como de caracterización de las fuentes principales de este gas.

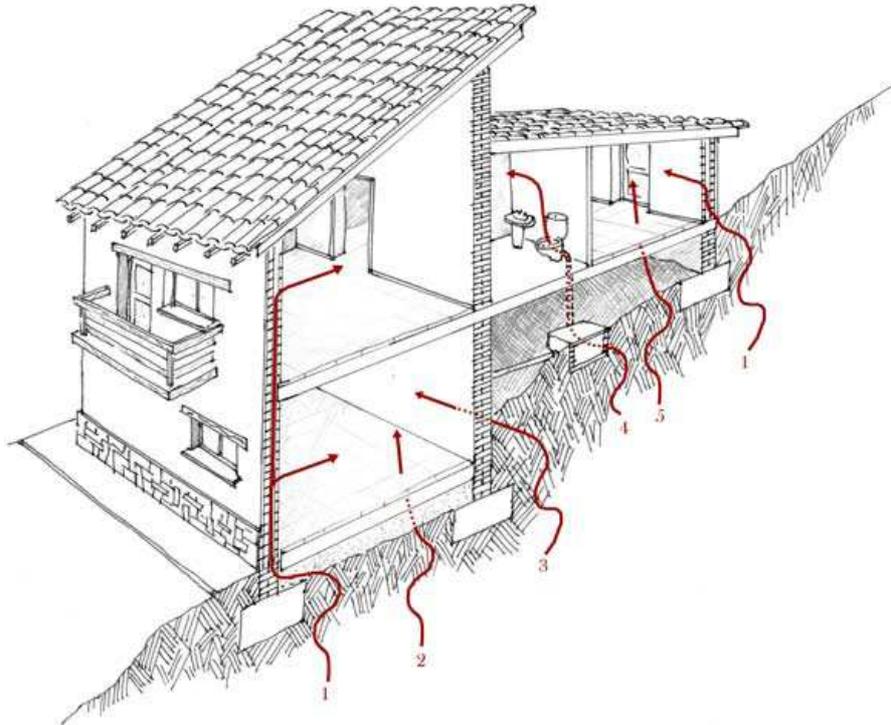


Figura 4: Posibles entradas de radón al interior de los edificios

Los niveles de acción para la concentración de radón aconsejados por la Comisión Europea por encima de los cuales se deben tomar medidas de actuación son[4]:

- 200 Bq/m³ para viviendas nuevas.
- 400 Bq/m³ para viviendas existentes.

En cualquier caso, las soluciones para prevenir la entrada del gas a viviendas nuevas como las correctores para viviendas ya existentes se basan en los mismos principios.

3.5.1. Ventilación interior

Se puede pensar que una ventilación de la vivienda puede reducir la concentración de radón, sin embargo, una ventilación mal diseñada puede provocar una presión negativa en el interior del espacio habitado, lo que lleva a una concentración mayor en el espacio interior en comparación con la que había antes de la ventilación.

Por otro lado, en concentraciones elevadas de radón, la ventilación tiene que ser alta y esto entra en conflicto con el capítulo de ahorro energético del código técnico de edificación que establece que a mayor renovación de aire, mayor será el aporte de calorías para conseguir las condiciones de confort en el interior de la vivienda [8].

3.5.2. Sistemas de extracción

Estos sistemas se basan en extraer el aire que se encuentra en el terreno sobre el que se apoya la vivienda y expulsarlo al exterior antes de que pase al interior de la vivienda.

El punto de captación es un espacio ubicado debajo de la vivienda que permite el paso de gases del terreno a su interior. En él se coloca un tubo extracción por el que se evacuarán los gases al exterior del edificio. En situaciones en las que la movilidad del radón sea escasa, como ocurre en los terrenos compactos, será necesario colocar un extractor mecánico para facilitar la entrada de radón.

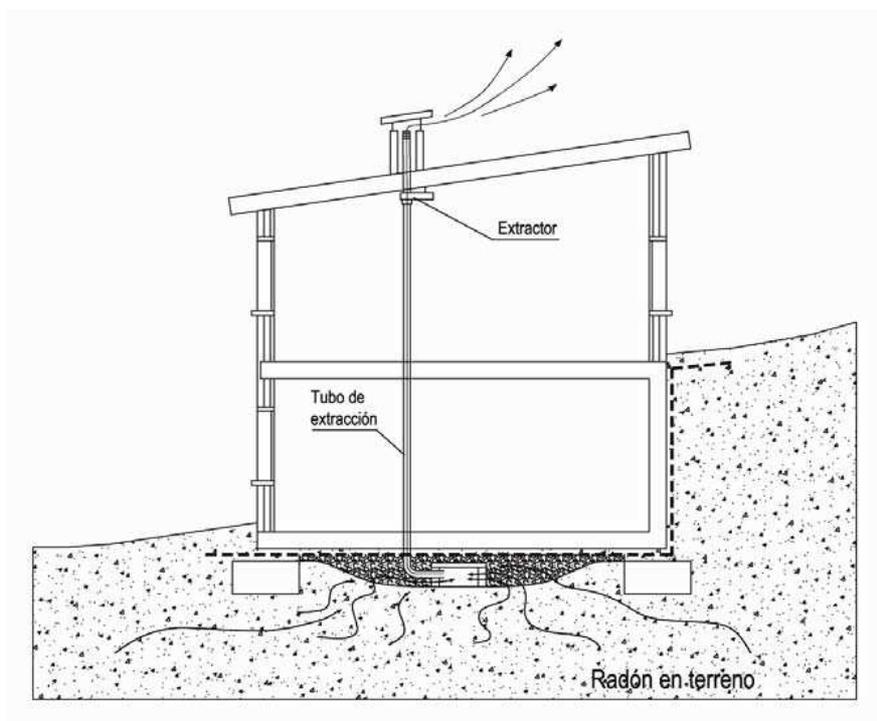


Figura 5: Esquema de funcionamiento de un sistema de extracción

3.5.3. Sistemas de presurización

Este sistema funciona a la inversa que el anterior. Se introduce aire a través de un tubo insertado en el terreno. De esta forma, se crea una diferencia de presiones entre el aire de debajo de la vivienda y el aire de los poros del terreno que obliga al radón a recorrer otro camino.

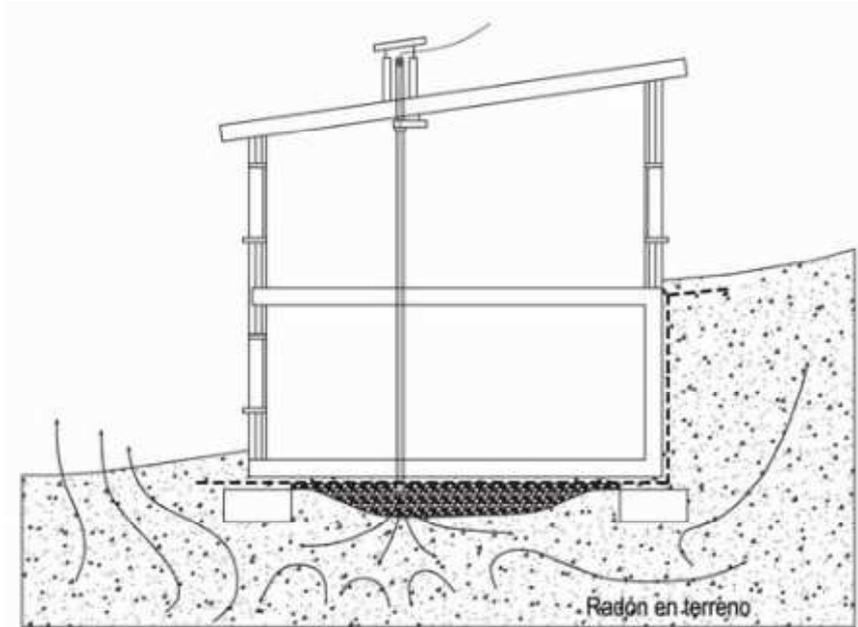


Figura 6: Esquema de funcionamiento de un sistema de presurización

3.5.4. Barreras

Las barreras frente al paso de radón más utilizadas son las membranas. Éstas deben cumplir unas ciertas propiedades relacionadas con sus propiedades difusivas frente al paso de radón, así como de estanqueidad, durabilidad del material y resistencias mecánicas.

Dado que la lámina va a colocarse sobre el terreno, deberá soportar el peso de la estructura y no romperse con irregularidades de la misma y del propio terreno. También debe ser resistente al proceso constructivo de la vivienda; con lo cual se exigirá que posea una alta resistencia a punzarse, al desgarrar y a la tracción para evitar fisuras y alargar su vida útil.

Normalmente la barrera debe colocarse en todo el cerramiento del edificio, por eso es tan importante sellarla bien y prestar mucha atención a todos los puntos que puedan dar lugar a una disfunción de la barrera.

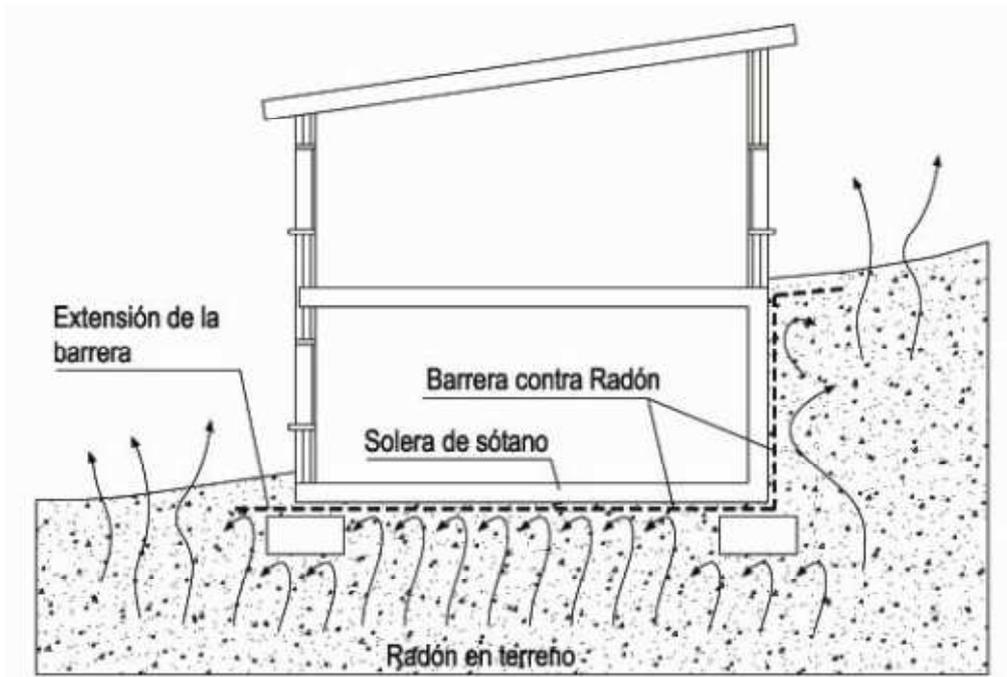


Figura 7: Esquema de funcionamiento de un sistema de extracción

4. Materiales y método

4.1. Contenedores

El modelo estándar para testear el aislamiento de una membrana al paso de radón consiste en encerrar la membrana entre dos cámaras de aire del mismo o distinto volumen (fig. 8).

Los contenedores utilizados son unas cámaras de aluminio, ya que es un material muy impermeable al radón, en forma de cubo, con un volumen $V=0.025\pm 0.001\text{ m}^3$.



Figura 8: Imagen de las cámaras (primaria y secundaria) utilizadas.

4.2. Fuentes de radón

En una de las cámaras, llamada primaria, se introduce una fuente de radón, con un factor de producción determinado (Bq/h) que genere altas concentraciones de este gas. Esta fuente puede ser una tierra con un alto contenido en Ra-226 (fig. 9) o una fuente que genere radón a una tasa constante como puede ser una fuente Pylon (fig. 10).



Figura 9: Perspectiva de la cámara primaria en la que se encuentra la tierra con un factor de producción de radón alto, y el detector Radon Scout SARAD.



Figura 10: Fuente de radón Pylon

Llamando N a la concentración de radón en un instante t , transcurrido un dt , el valor de N habrá variado en un dN . Esta variación es debida a dos procesos. Por un lado, a la producción de radón: Qdt siendo Q la producción por unidad de tiempo; y por otro lado a su desaparición: $N\lambda dt$:

$$dN = Qdt - N\lambda dt$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtiene:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} + \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Siendo N_0 la concentración inicial de radón para $t = 0$

En nuestro caso, se ha supuesto que inicialmente la concentración de radón es nula por lo que la expresión a utilizar será:

$$N(t) = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

Siendo $Q = \frac{f}{V}$ y f el factor de producción de radón.

$$f = E \cdot S$$

La ec.(2) describe la evolución de la concentración de radón en función del tiempo. Suponiendo que el equilibrio se alcanza cuando $t \rightarrow \infty$, entonces la concentración de radón será constante:

$$N = \frac{Q}{\lambda} = \frac{f}{\lambda \cdot V} \quad (3)$$

Lo que implica que el radón se está formando al mismo tiempo que está desapareciendo.

Conocida la concentración en el equilibrio, N , a partir de la ec.(3) puede determinarse el factor de producción de radón de la muestra.

4.3. Detector Radon Scout

Por otro lado, son necesarios dos detectores de radón, denominados Radon Scout, que nos monitoricen la concentración de radón con el tiempo en las dos cámaras:

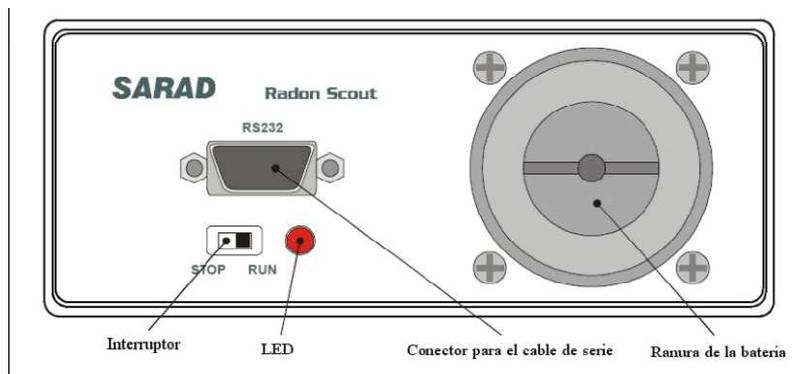


Figura 11: Esquema del detector Scout Sarad [9]

La concentración de radón se mide a partir de sus productos de desintegración de vida de corta [10]. Justo después de la emisión alfa, el Po-218 se vuelve una carga positiva por un corto periodo de tiempo debido a que algunas capas electrónicas se han dispersado por la emisión de esta partícula. Estos iones son recogidos en la superficie del detector del semiconductor por fuerzas eléctricas. El número de Po-218 recogidos será directamente proporcional a la concentración de radón dentro de la cámara.

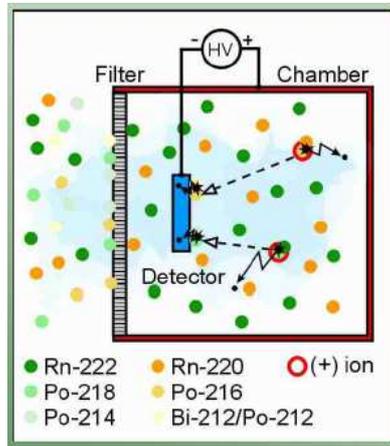


Figura 12: Cámara de ionización de radón

Por espectrometría alfa se pueden diferenciar los Po-218 de los Po-214, ya que las partículas alfas emitidas poseen distintas energías. De hecho, estos detectores ofrecen dos modos de calcular la concentración de radón: uno a partir de ambos isótopos, y otro que sólo incluye el Po-218.

4.4. Materiales

Las muestras a testear son membranas de las cuales se desconoce la composición química exacta:



Figura 13: Ejemplo de membranas a testear

En este trabajo se estudiarán concretamente cuatro membranas, que se muestran en la fig.14:



Figura 14: Membranas testeadas. Arriba a la izquierda lámina de Aluminio-Papel; a la derecha, lámina de polietileno. Abajo a la izquierda membrana con poliolefinas, y derecha lámina de bitumen.

La lámina a testear se sitúa encima de la cámara primaria y se precinta para minimizar las fugas por los laterales, que se han estimado como $\lambda_v=0,01 \text{ h}^{-1}$.

A continuación, se sitúa encima otro detector Scout y se coloca la segunda cámara encima.

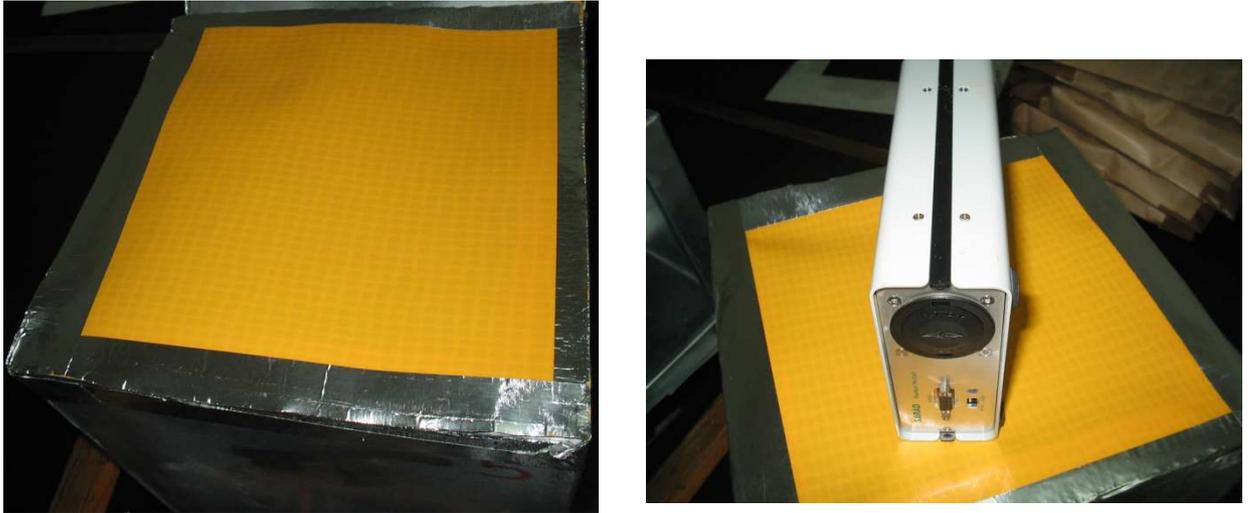


Figura 15: Sellado de la membrana a la cámara primaria y colocación del detector Scout dentro de la cámara secundaria.

Una vez colocada la cámara secundaria, se sellan las dos y se deja midiendo durante un mes aproximadamente; tiempo necesario para que la membrana se sature y se vuelva ella misma una fuente de radón en la cámara secundaria.



Figura 16: Disposición final del dispositivo experimental

4.5. Métodos de análisis

4.5.1. Método utilizado en el LaRUC

El LaRUC es el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria, y se encuentra en la Facultad de Medicina; lugar donde se ha realizado el trabajo experimental.

Inicialmente, el radón se mueve por difusión incrementando su concentración en la cámara primaria, hasta que llega a la membrana a testear donde se adsorbe y difunde a través de ella hasta la cámara secundaria donde se desorbe provocando un aumento de la concentración con el tiempo.

Los dos detectores Radon Scout SARAD monitorizan la evolución de las concentraciones con el tiempo así como la temperatura y humedad en ambos compartimentos.

La membrana puede quedar caracterizada por su coeficiente de permeabilidad, una constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo que sale de la membrana y el ratio entre la diferencia de radón a ambos lados de la membrana y su espesor y que tiene en cuenta los efectos conjuntos de difusión y adsorción.

Para determinar las concentraciones de radón en el equilibrio, y los flujos dentro y fuera de la membrana es necesario resolver la ecuación de difusión del radón:

$$D \frac{d^2C}{dz^2}(z) - \lambda C(z) = 0$$

Donde $C(z)$ es la concentración de radón en el equilibrio a una profundidad z de la membrana y D el coeficiente de difusión en dicho material.

La solución general de la ecuación anterior debe cumplir las condiciones de contorno que expresan el balance entre la entrada y la pérdida de radón en la cámara primaria:

$$f + DS \frac{dC}{dz}(0) - \frac{\lambda V_1}{\beta} C(0) = 0$$

Y en la secundaria:

$$-DS \frac{dC}{dz}(d) - \frac{\lambda V_2}{\beta} C(d) = 0$$

con:

d espesor de la membrana (m)

f factor de producción de radón (Bqh^{-1})

V_1, V_2 son los volúmenes de las cámaras primaria y secundarias (m^3)

Resolviendo la ecuación de transporte del radón [11] se puede obtener el coeficiente de difusión D y el coeficiente de adsorción β de las siguientes expresiones:

$$\cosh\left(\frac{d}{L}\right) = \frac{C_1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1 \right) + 1} \right) \right] \quad (4)$$

$$\beta = \frac{V_2 \sinh(d/L)}{SL \left(\frac{C_1}{C_2} - \cosh(d/L) \right)} \quad (5)$$

donde C_1 y C_2 son las concentraciones de equilibrio en la cámara primaria y secundaria respectivamente y L es la longitud de difusión en la membrana:

$$L = \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

De la ec. (4) se obtiene la longitud de difusión, y con la ec. (6) puede obtenerse el valor del coeficiente de difusión. De la ec.(5) se obtiene directamente el coeficiente de adsorción.

El coeficiente de permeabilidad es el que mejor caracteriza una membrana, ya que tiene en cuenta los dos efectos. Éste puede ser calculado a partir de la ec.(7) [11]:

$$P = \frac{\lambda \beta d L}{\sinh\left(\frac{d}{L}\right)} \quad (7)$$

Cuando $\lambda \rightarrow 0$; es decir, en el caso de gases no radiactivos, la ec.(7) se reduce a la expresión $P = \beta D$ y para un gas radiactivo de vida corta pequeña, esta expresión también tiene en cuenta que la longitud de difusión del gas puede ser del mismo orden que la magnitud o incluso más pequeña que el espesor de la membrana.

El coeficiente de difusión de una membrana puede variar hasta ocho órdenes de magnitud desde 10^{-15} m²/s hasta 10^{-8} m²/s. En general, los más pequeños se obtienen en membranas con aluminio y los mayores en polímeros o poliolefinas como el plástico[12]; sin embargo, dado que se desconoce la composición exacta de la membrana, puede haber algún otro componente que modifique este valor.

El coeficiente de difusión se ha adoptado en varios países (República Checa, Alemania, España, Holanda, Irlanda, etc.) como un parámetro útil para el diseño de membranas resistentes al radón. Sin embargo, la aplicación de este parámetro varía de un país a otro.

En general, existen distintos criterios para validar el uso de un determinado material como barrera frente al radón:

1. El coeficiente de difusión D debe estar por debajo de un valor estricto. En una casa unifamiliar estándar con una concentración de radón en suelo estándar, y colocando una membrana de espesor tipo, el máximo valor del coeficiente de difusión debería ser $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Como consecuencia, se podría pensar que la protección al radón podría resolverse con una membrana de aluminio; sin embargo, estas membranas tienen muy poca elongación con lo cual es muy fácil que pierdan las propiedades de barrera efectiva [12].
2. El espesor d de la membrana debe ser al menos tres veces mayor que la longitud de difusión del radón, calculada según la ec.(6).
3. El espesor de la membrana se calcula para cada casa teniendo en cuenta el coeficiente de difusión en la membrana, la concentración de radón en el suelo y ciertos parámetros de la casa como el estado de ventilación o el área en contacto con el suelo.

4.5.2. Descripción de los métodos de adquisición de datos

La determinación del coeficiente de difusión de una membrana puede llevarse a cabo por tres métodos distintos [13].

Método A - Determinación del coeficiente de difusión en condiciones no estacionarias

Después de colocar la muestra entre la cámara primaria y secundaria, se cierran ambas cámaras de manera que la concentración de radón empieza a aumentar en la cámara primaria. Desde este momento se empieza a medir la concentración en ambas cámaras.

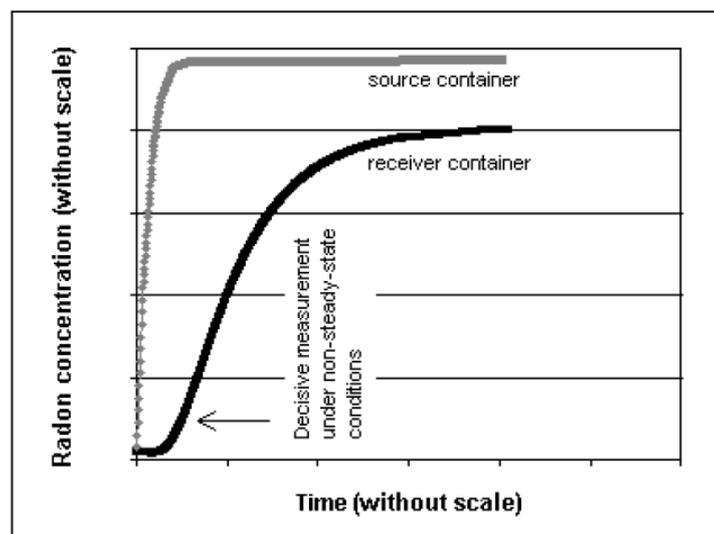


Figura 17: Método de cálculo del coeficiente de difusión según el método A

Método B - Determinación del coeficiente de difusión en condiciones estacionarias

Después de colocar la muestra entre la cámara primaria y secundaria los dos contenedores se cierran y la concentración de radón empieza a aumentar en la cámara primaria. Se monitorizan las concentraciones de radón con el tiempo en ambas cámaras y cuando la membrana comienza a saturarse; es decir, cuando se alcanzan las condiciones estacionarias a través de la muestra, se ventila la cámara secundaria con un aire empobrecido en radón hasta que se alcanza una concentración menor a 1 kBq/m^3 .

En este momento se empieza a contabilizar el tiempo usado para el cálculo del coeficiente de difusión.

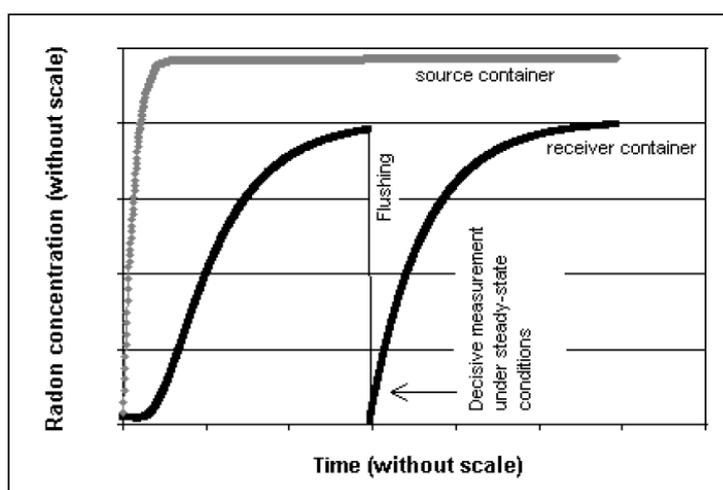


Figura 18: Método de cálculo del coeficiente de difusión según el método B

Método C - Determinación del coeficiente de difusión en condiciones estacionarias establecidas durante la ventilación de la cámara primaria

Después de situar la muestra entre la cámara primaria y secundaria, esta última se ventila con un aire empobrecido en radón, de forma que la concentración del gas en el recipiente no supere 1 kBq/m^3 . De esta manera la concentración de radón empieza a aumentar en la cámara primaria, mientras que la secundaria está ventilando.

En el momento en que se alcanza la saturación de la membrana; es decir, en las condiciones estacionarias, se deja de airear la cámara secundaria y se empieza a contabilizar el tiempo a partir del cual se determinará el coeficiente de difusión de la membrana.

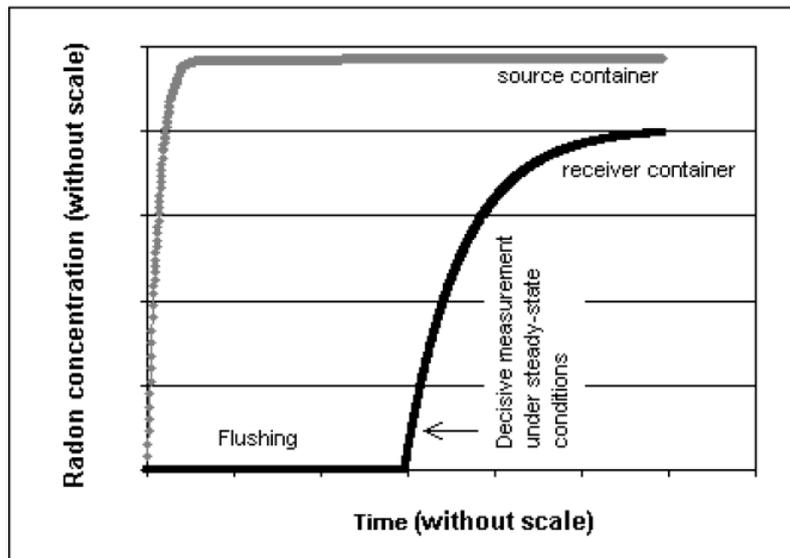


Figura 19: Método de cálculo del coeficiente de difusión según el método C

4.5.2.1. RnIter2008

El software RnIter2008 es una herramienta para determinar el coeficiente de difusión de membranas resistentes al radón. Este programa puede calcular el coeficiente de difusión a partir de los datos obtenidos de las medidas en condiciones no estacionarias (Método A) así como en las condiciones estacionarias (Métodos B y C) [14].

Los datos de entrada son:

- Área de la muestra: $S= 841\pm 1 \text{ cm}^2$
- Volumen de la cámara: $V= 25000\pm 1000 \text{ cm}^3$
- Límite superior e inferior de los coeficientes de difusión: Estos valores se estiman a partir de la composición de la membrana [15]
- Pasos entre sucesivos coeficientes de difusión: En general, se escoge entre 1/10 y 1/20 del rango entre el límite inferior y superior.
- Factor de fugas: En nuestro caso, lo tomamos como $0,01 \text{ h}^{-1}$
- Coeficiente de transferencia de radón: Parámetro del programa y que se asume que es 0.1 m/s .

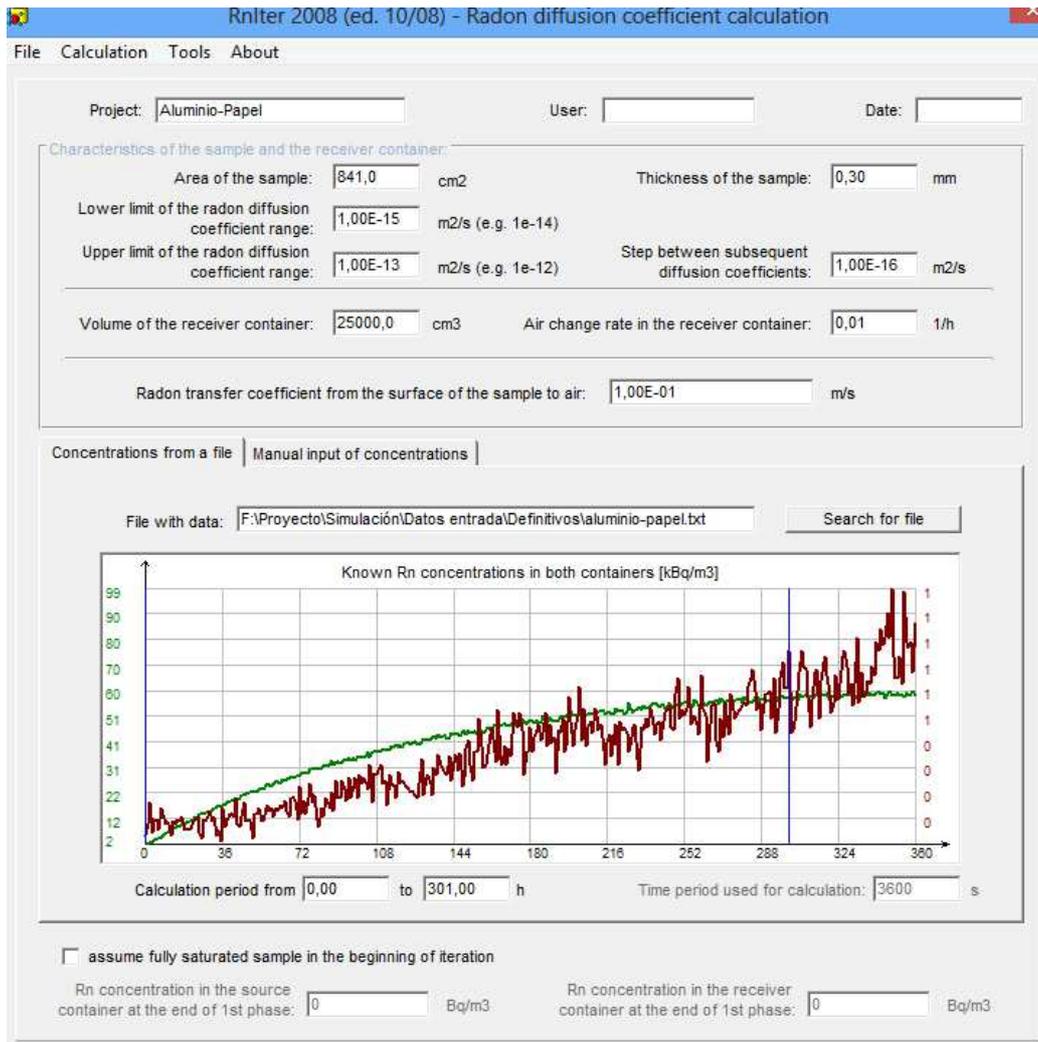


Figura 20: Datos a introducir en el software RnIter2008 y visualización de la variación de concentración con el tiempo de la membrana Aluminio-Papel.

Este software resuelve la ecuación de transporte del radón suponiendo inicialmente que el coeficiente de difusión en la membrana es el límite inferior introducido; con este valor, calcula la concentración teórica que habría en la cámara secundaria y la compara con los datos experimentales. Así, va probando con más coeficientes de difusión en función de los pasos que se hayan introducido y da como valor más exacto del coeficiente de difusión aquel que presente las mínimas diferencias en las concentraciones de la cámara secundaria entre los valores teóricos calculados y los experimentales.

4.5.2.2. RnTrans2011

Este programa resuelve la ecuación de transporte a través de materiales situados entre el contenedor primario y secundario, calculando la dependencia de la concentración con el tiempo dentro de la muestra y las concentraciones en la cámara secundaria.

Los datos de entrada son los mismos que en el caso anterior, añadiendo además:

- El coeficiente de difusión
- El intervalo de impresión de los resultados

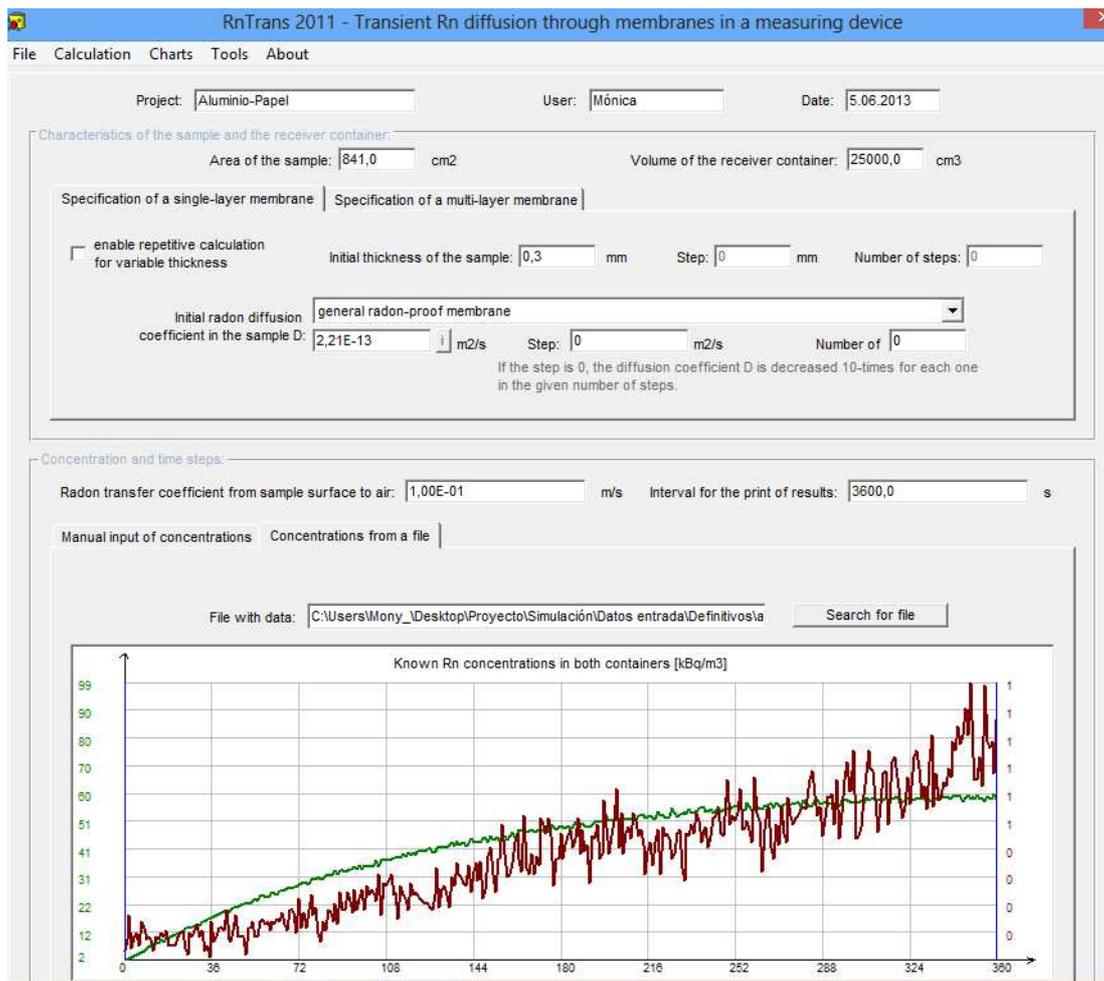


Figura 21: Datos a introducir en el software RnTrans2011 y visualización de la variación de concentración con el tiempo de la membrana Aluminio-Papel.

En este caso, es necesario meter al programa el coeficiente de difusión del radón en la lámina, determinado analíticamente o con el programa RnIter2007. Conocido dicho valor, el software resuelve la ecuación de transporte de radón dentro de la membrana, y simula el perfil de la concentración con el espesor de la lámina.

5. Resultados y análisis

5.1. Analíticos

En una primera parte se han determinado los coeficientes de difusión, adsorción y permeabilidades de 4 membranas de las que no se conoce su composición exacta.

Para ello, se necesitan conocer las curvas de concentración de radón, en la cámara primaria y secundaria, con el tiempo. Esta información nos la da el detector Scout Sarad (fig.22), además de otros parámetros que también se monitorizan como la humedad y la temperatura.



Figura 22: Captura de pantalla de la información que nos aporta el programa de detección Scout Sarad.

Este programa nos proporciona los resultados en un archivo de texto con varias columnas en las que se detalla la concentración de radón en cada hora; de manera que al representarlo gráficamente se obtienen las siguientes curvas:

1. Lámina aluminio-papel

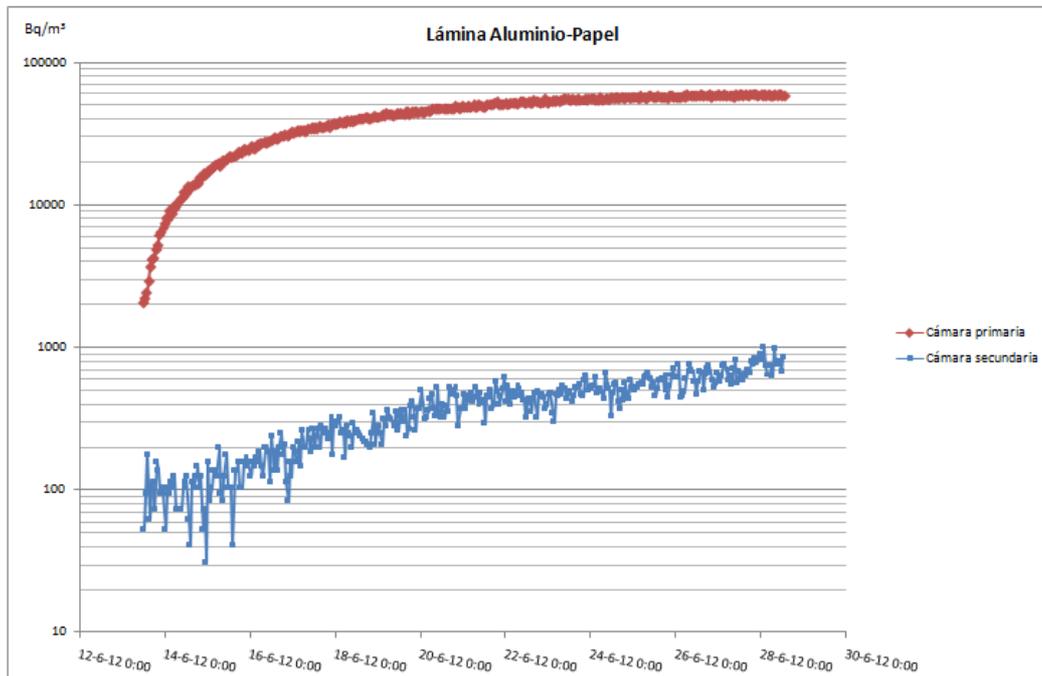


Figura 23: Variación de la concentración en la cámara primaria (curva roja) y en la secundaria (curva azul) con el tiempo para la lámina de Aluminio-Papel.

2. Lámina de un polietileno (amarilla)

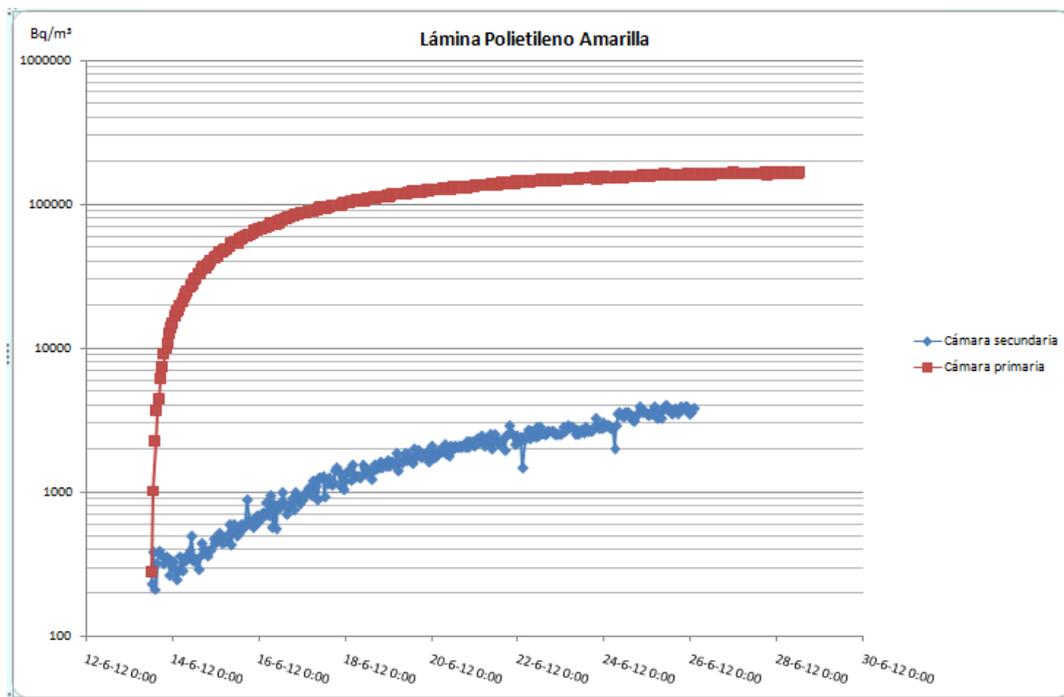


Figura 24: Variación de la concentración en la cámara primaria (curva roja) y en la secundaria (curva azul) con el tiempo para la lámina de polietileno amarilla.

3. Lámina de un polietileno (azul)

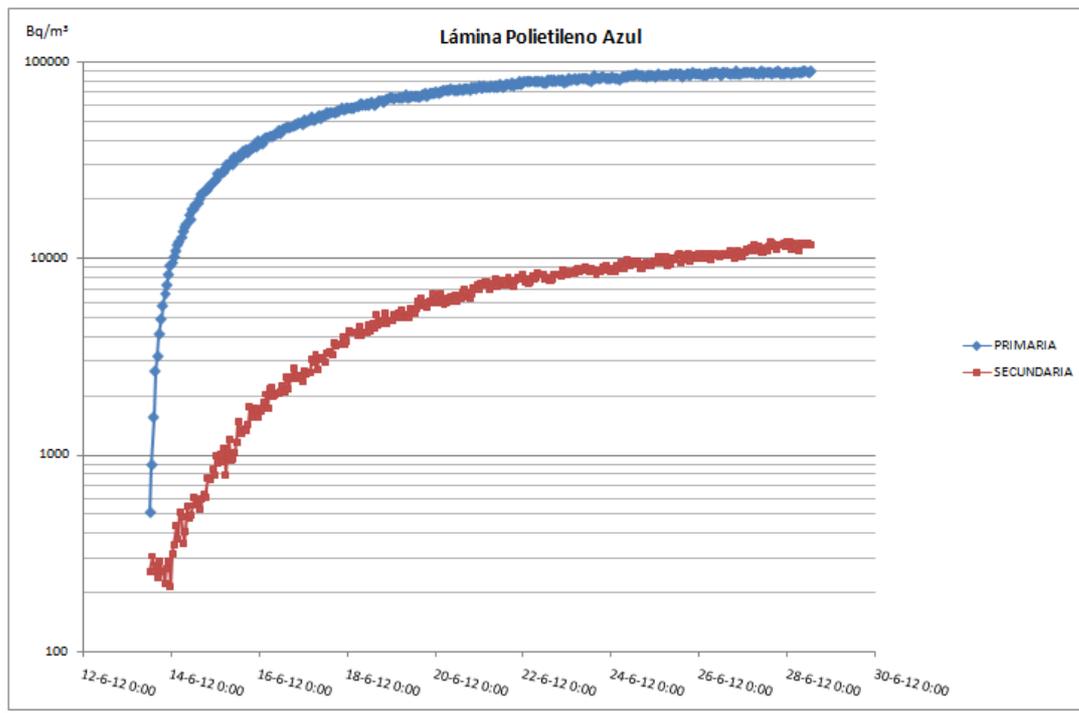


Figura 25: Variación de la concentración en la cámara primaria (curva azul) y en la secundaria (curva roja) con el tiempo para la lámina de polietileno azul

4. Lámina de un betún modificado con polímero

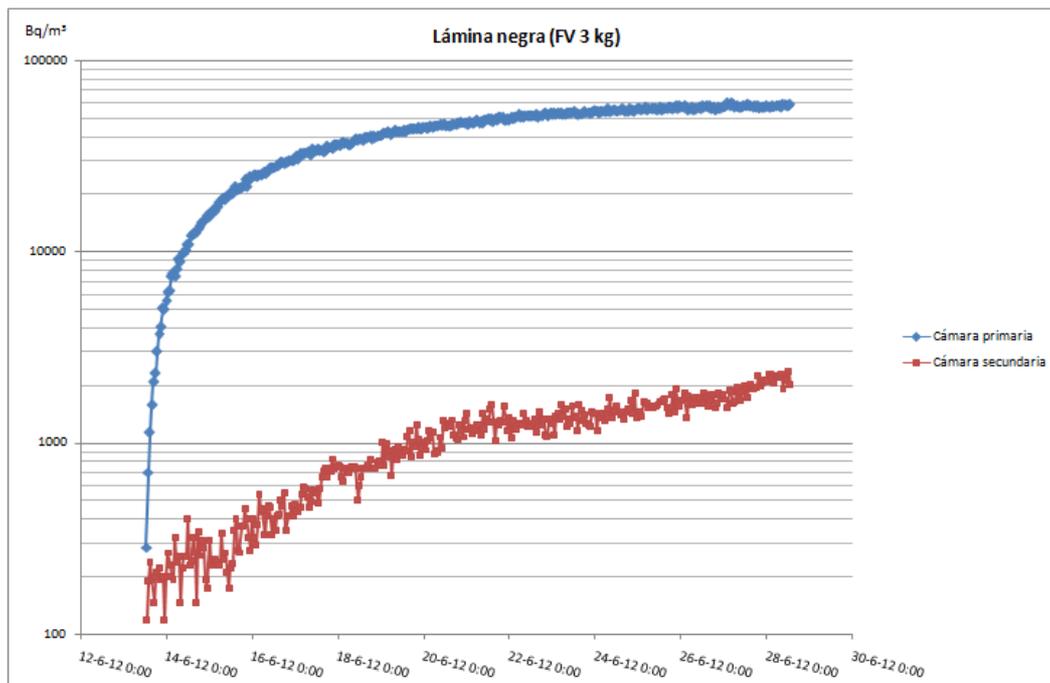


Figura 26: Variación de la concentración en la cámara primaria (curva azul) y en la secundaria (curva roja) con el tiempo para la lámina de betún

5.1.1. Determinación del término fuente

Dado que en cada experimento se ha utilizado una tierra distinta, es necesario calcular el factor de producción de radón para cada caso. Por simplicidad, se explicará cómo se ha realizado con la membrana negra.

Método 1: Es necesario suponer que durante las primeras horas en las que se toman las medidas hay una relación lineal entre la concentración (Bq/m^3) y el tiempo (h). Si hacemos el ajuste tomando las cinco primeras horas se obtiene:

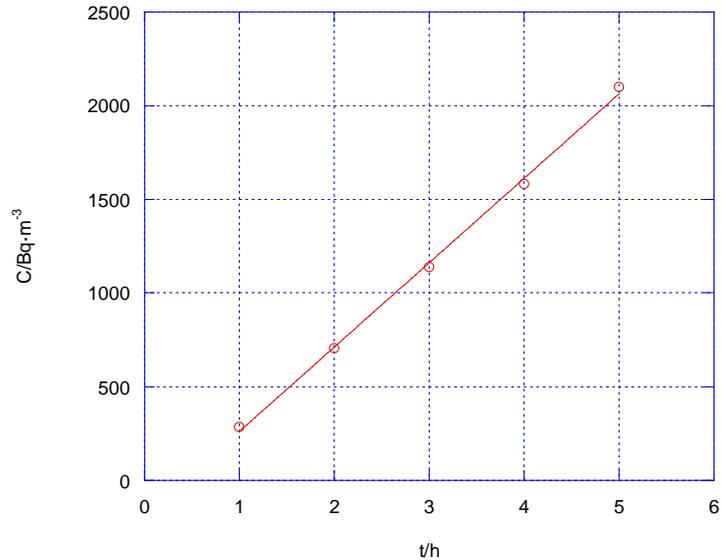


Figura 27: Pendiente de la concentración de radón en la cámara primaria con el tiempo de la membrana negra, las 5 primeras horas de toma de medidas.

La ecuación de ajuste es:

$$C = (450 \pm 11) \cdot t - (189 \pm 35)$$

De donde se obtiene que el factor de producción será:

$$f = (11.3 \pm 0.5) \text{ Bq/h}$$

Método 2: Si tomamos un tiempo muy grande, ($t \rightarrow \infty$), entonces el valor de la concentración de radón en equilibrio será:

$$C_{eq} = \frac{Q}{\lambda} = \frac{f}{\lambda \cdot V}$$

A partir de la fig.26, se deduce que la concentración de equilibrio en la cámara primaria se da en $C_{eq} = 60000 \pm 5000 \text{ Bq/m}^3$, de donde se obtiene que

$$f = (11 \pm 1) \text{ Bq/h}$$

Podemos observar que ambos métodos dan resultados coherentes entre sí; sin embargo, este último no siempre es fiable ya que si consideramos un estrato infinitesimal de la frontera superior de la tierra, puede ocurrir un fenómeno que se denomina difusión inversa, de manera que, el radón en vez de salir de la tierra, entre hacia ella.

Se resumen en la tabla 1 los factores de producción obtenidos para las cuatro tierras empleadas:

Membrana	Método 1/ Bqh^{-1}	Método 2/ Bqh^{-1}
Aluminio-Papel	11.3 ± 0.5	11 ± 1
Amarilla	30 ± 2	32 ± 4
Azul	19.2 ± 0.9	18 ± 1
Negra	12.1 ± 0.6	11 ± 1

Tabla 1: Factores de producción de radón de la tierra utilizada en cada caso. Los errores asociados se han determinado por propagación de errores (ver apéndice 1).

5.1.2. Determinación del coeficiente de difusión y permeabilidad

A continuación, en la tabla 2, se detallan los parámetros utilizados para el cálculo de los coeficientes de difusión, adsorción y permeabilidad.

Para reducir las incertidumbres, se han tomado como factores de producción los calculados a partir del método 1.

Membrana	d/mm	C_1/ Bqm^{-3}	C_2/ Bqm^{-3}
Aluminio-Papel	0.30 ± 0.01	60000 ± 5000	800 ± 250
Amarilla	0.30 ± 0.01	170000 ± 20000	5000 ± 500
Azul	0.05 ± 0.01	90000 ± 5000	12000 ± 2500
Negra	2.00 ± 0.01	60000 ± 5000	3000 ± 250

Tabla 2: Parámetros necesarios para realizar los cálculos.

La segunda columna es el espesor de la membrana, la tercera y cuarta son las concentraciones de equilibrio en la cámara primaria y secundaria respectivamente.

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 2, se aplican las ecs(4,5,6,7) y se obtienen los siguientes valores:

Membrana	L/m	D/m ² s ⁻¹	β	P/ m ² s ⁻¹
Aluminio-Papel	$(1.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$	$(2.2 \pm 0.9) \cdot 10^{-14}$	570 ± 210	$(2.9 \pm 0.8) \cdot 10^{-12}$
Amarilla	$(1.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-4}$	$(8 \pm 5) \cdot 10^{-14}$	223 ± 31	$(6 \pm 2) \cdot 10^{-12}$
Azul	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-5}$	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-15}$	1453 ± 342	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-12}$
Negra	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-12}$	39 ± 4	$(7 \pm 3) \cdot 10^{-11}$

Tabla 3: Resultados obtenidos del cálculo de la longitud de difusión (segunda columna), el coeficiente de difusión (tercera columna), adsorción (cuarta columna) y permeabilidad (quinta columna). Los errores asociados se han determinado por propagación de errores (ver apéndice 2).

5.2. Simulación

5.2.1. RnIter2008

En la tabla 4 se recogen los coeficientes de difusión obtenidos a partir del software RnIter2008.

Membrana	D _{RnIter} /m ² s
Aluminio-Papel	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-14}$
Amarilla	$(9 \pm 4) \cdot 10^{-14}$
Azul	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-15}$
Negra	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-12}$

Tabla 4: Valores más exactos del coeficiente de difusión para cada membrana obtenidos con el software RnIter2008. Los errores se han considerado que son de entre el 30-40%.

5.2.2. Análisis comparativo de los dos métodos empleados

A continuación se comparan los valores de coeficientes de difusión para cada membrana analíticamente y a través del software RnIter2008.

Membrana	D/m ² s	D _{RnIter} /m ² s
Aluminio-Papel	$(2.2 \pm 0.9) \cdot 10^{-14}$	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-14}$
Amarilla	$(8 \pm 5) \cdot 10^{-14}$	$(9 \pm 4) \cdot 10^{-14}$
Azul	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-15}$	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-15}$
Negra	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-12}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-12}$

Tabla 5: Tabla resumen de los coeficientes de difusión calculados analíticamente y a partir del software RnIter2008.

Teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas, los valores no difieren significativamente entre sí pues son del mismo orden de magnitud, por lo que se puede afirmar que ambos métodos son perfectamente compatibles para determinar el coeficiente de difusión de una lámina frente al paso de radón.

Si se representan ambos coeficientes con sus correspondientes barras de error, fig.28, se observa que para todas las láminas, los dos valores son coherentes entre sí.

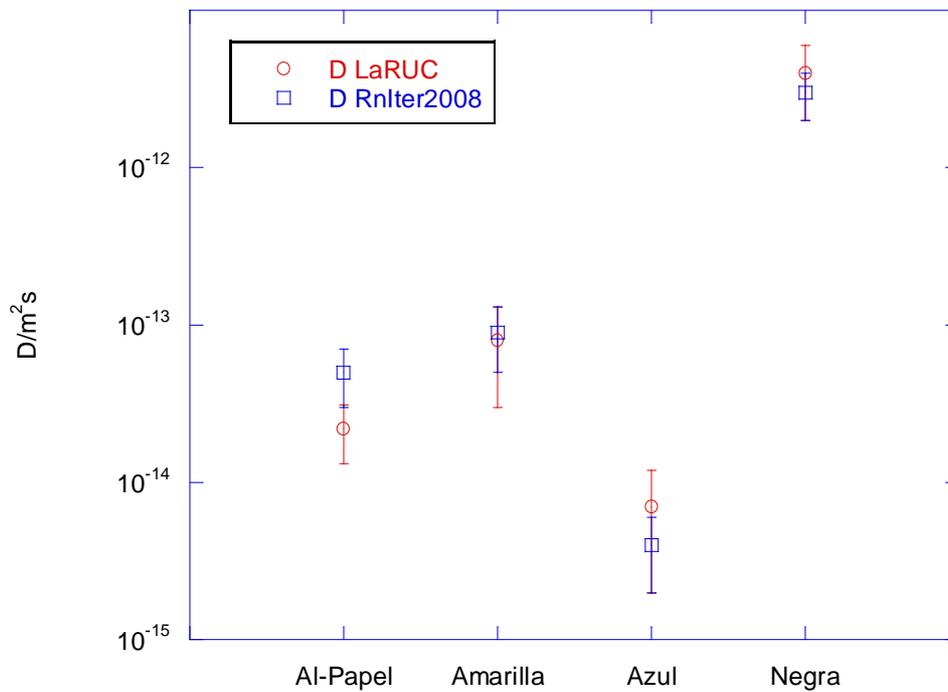


Figura 28: Comparación de los valores obtenidos del coeficiente de difusión por los dos métodos realizados: en el laboratorio de radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC) y con el software de la Universidad Technica de Praga (RnIter2008)

5.2.3. RnTrans2011

A continuación se presentan varias gráficas (fig.29 y fig.30) que describen cómo varía la concentración de la membrana con el espesor de ésta.

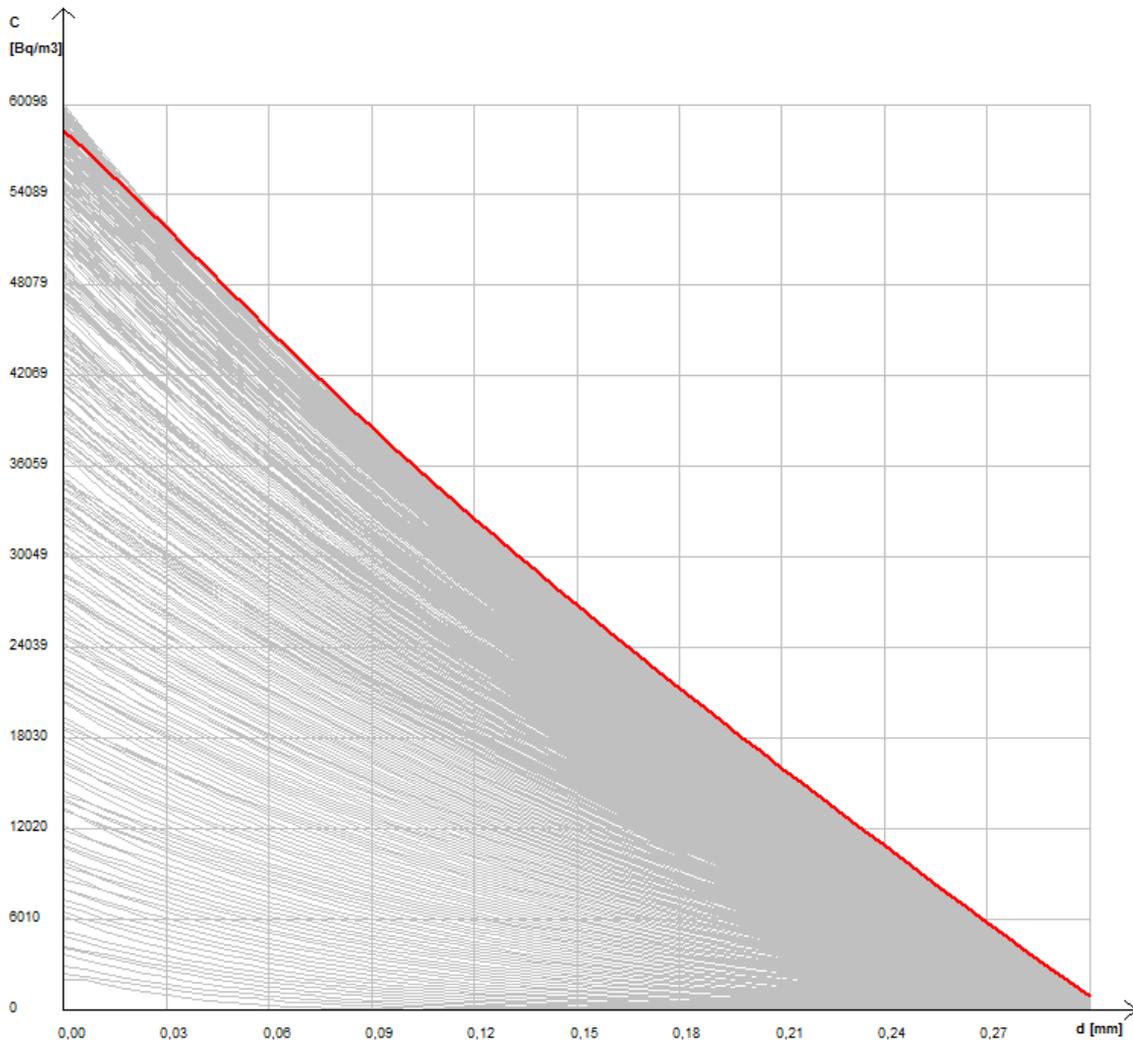


Figura 29: Concentración de radón en la membrana de aluminio-papel con respecto a su espesor.

La lámina se va llenando de radón en estratos infinitesimales; así, se puede observar que al comienzo de la membrana, cuando $d=0$ mm, la membrana presenta su máximo de concentración, alcanzando los 60000 Bq/m^3 , lo que se corresponde precisamente con la concentración de equilibrio C_1 de la cámara primaria.

Asimismo, cuando se alcanza el final de la membrana, se obtiene el mínimo de exhalación; aproximadamente 1000 Bq/m^3 , lo que se corresponde con la concentración de equilibrio en la cámara secundaria, C_2 .

En general, el perfil de la concentración dentro de la membrana tiene la forma de una función exponencial; sin embargo, en algunos casos como membranas muy finas (como es el caso que nos ocupa) o con un coeficiente de difusión alto puede ser casi lineal [16].

Se ha tratado de ajustar la variación de la concentración con el espesor (fig.29) en el estado de equilibrio a la ec.(8) obtenida tras resolver la ecuación de transporte del radón [11]:

$$C(z) = \frac{\beta f}{\lambda} \left(\frac{\beta SL \cosh\left(\frac{d-z}{L}\right) + V_2 \sinh\left(\frac{d-z}{L}\right)}{\beta SL(V_1 + V_2) \cosh(d/L) + (V_1 V_2 + \beta^2 S^2 L^2) \sinh(d/L)} \right) \quad (8)$$

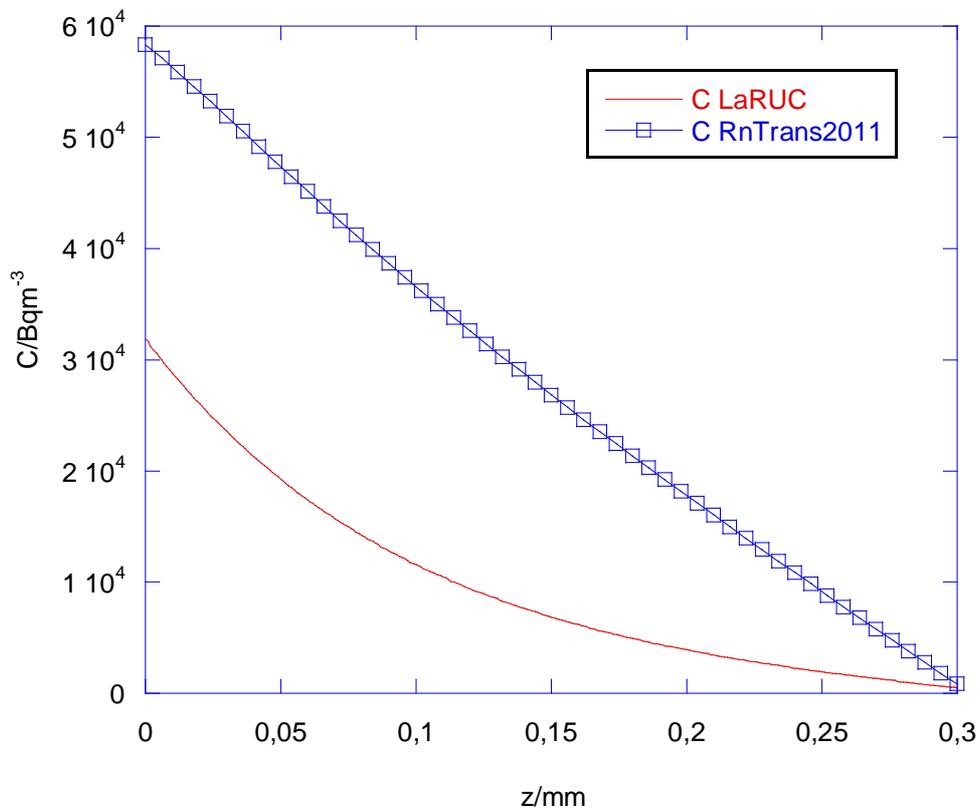


Figura 30: Ajuste de la concentración de equilibrio de la membrana Aluminio-Papel. Los puntos azules son los valores obtenidos a través del software RnTrans2011 y la curva roja es la representación de la ec.(8)

Dado que los valores experimentales no se ajustaban a la ec.(8), se ha ajustado a una ecuación de segundo grado:

$$C = 1.29 \cdot 10^5 X^2 - 2.30 \cdot 10^5 X + 58503$$

Se cree que la razón por la que los valores obtenidos a través del software RnTrans2011 no se ajustan a lo que predice teóricamente la ec.(8) es debido a que el estudio realizado por el LaRUC tiene en cuenta un parámetro adicional; el coeficiente de adsorción de la membrana; mientras que el software RnTrans2011 sólo considera el coeficiente de difusión. De todas maneras, este problema podría estudiarse con más profundidad en un futuro.

Por otro lado, dado que se han estado tomando medidas durante 360 horas (15 días), se va a estudiar también cómo varía la concentración de la membrana en un intervalo de tiempo de 50 horas:

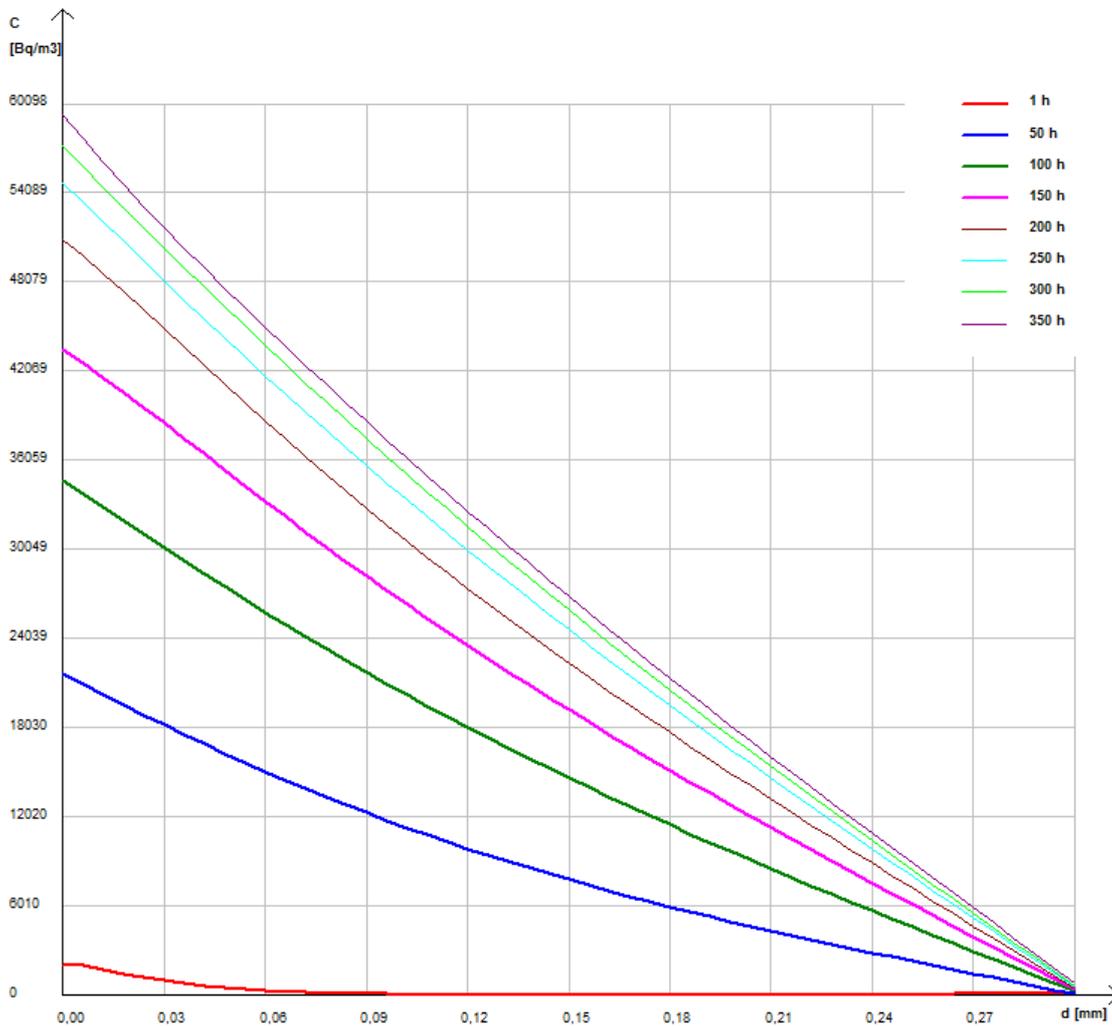


Figura 31: Concentración dentro de la membrana en las horas indicadas en la leyenda.

Es evidente que cuando empieza la toma de medidas la concentración de radón en la membrana es muy pequeña, y en las primeras horas aumenta notablemente. Sin embargo, a partir de las 250 horas la membrana ya comienza a saturarse y la concentración a partir de aquí es prácticamente la misma, tal y como predice la teoría.

En la tabla 6, se comparan los valores que nos proporciona el software RnTrans2011 para $d=0$ mm, según las horas indicadas en la fig.31, con los valores medidos experimentalmente en el LaRUC.

Tiempo/h	$C_{RnTrans2011}(z=0)$	C_{LaRUC}
1	2029	2067
50	21616	21773
100	34638	35411
150	43480	45198
200	50886	52742
250	54753	55411
300	57191	57422
350	59309	58309

Tabla 6: La primera columna es la medida del tiempo en horas. La segunda, las concentraciones obtenidas por el software RnTrans2011 en la parte inferior de la membrana y la tercera las obtenidas experimentalmente.

Se observa que para cada tiempo, teniendo en cuenta que los errores son de aproximadamente el 30-40%, las concentraciones en ambos casos son prácticamente las mismas, que es lo que cabía esperar.

5.3. Evaluación de los criterios de aceptación de membranas

A continuación se evaluarán las membranas testeadas, concluyendo, según los criterios ya explicados, si se trata de láminas aptas o no para impermeabilizar una vivienda a la entrada de radón.

Membrana	d/m	3L/m	Criterio 1	Criterio 2
Aluminio-Papel	$3 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	Sí	No
Amarilla	$3 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	Sí	Sí
Azul	$5 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	Sí	No
Negra	$2 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	Sí	Sí

Tabla 7: Evaluación de cada membrana utilizada para la construcción. La segunda columna indica el espesor de la membrana y la tercera columna es tres veces la longitud de difusión de cada lámina.

A partir de la tabla 7, se deduce que estas membranas podrían ser empleadas en aquellos países que se rigen por el criterio 1; sin embargo, no todas podrían usarse en aquellos que se rigen por el criterio 2. Este último es un criterio mucho más restrictivo ya que, al exigir un espesor superior a tres veces la longitud de difusión del radón, esto implica que la exhalación de radón a través de la membrana será muy pequeña.

Si suponemos que la concentración de radón varía con el espesor de la misma forma que varía con el tiempo, ec.(2); es decir:

$$C(z) = \frac{Q}{\lambda} \left(1 - e^{-\frac{z}{L}}\right)$$

Entonces, para una profundidad de $z=3L$, habrá una concentración del 95% del valor máximo, con lo cual la concentración de radón hacia el interior de la vivienda será sólo el 5% del valor máximo.

El criterio 3, no se ha incluido en esta tabla ya que tiene en cuenta más parámetros, además del coeficiente de difusión, con lo cual, sería necesario hacer un estudio mucho más detallado.

6. Conclusiones

Se ha realizado un estudio de la permeabilidad de varias membranas resistentes al radón empleadas en la construcción, caracterizándolas a través de sus coeficientes de difusión y adsorción. Asimismo, se han comparado estos resultados con el software de la República Checa RnIter2008, llegando a la conclusión de que ambos métodos son perfectamente compatibles para la determinación del coeficiente de difusión de una barrera frente al paso del radón.

Por otro lado, se ha simulado cómo varía la concentración de radón dentro de una membrana a través del software RnTrans2011, obteniendo información novedosa sobre cómo se comporta una lámina como fuente de radón.

En líneas de futuro, se podría realizar un estudio de la dependencia del coeficiente de difusión y adsorción en la concentración de radón a través de la membrana. De esta manera, se podría analizar la discrepancia entre el perfil de concentraciones que nos da el software RnTrans2011 y el obtenido a través de la ec.(8). Por otro lado, realizando un estudio más exhaustivo de cómo es la exhalación de la membrana cuando ésta se convierte en una fuente de radón, se podrían predecir las concentraciones que se llegarían a alcanzar en una vivienda de un modo más realista, lo que permitiría a su vez, poder caracterizar un mayor número de materiales habitualmente usados en la construcción.

7. Bibliografía

- [1] CSN Consejo de Seguridad Nuclear, "Dosis de radiación", 2010.
- [2] "Introducción a la radiación. Naturaleza y tipos de radiación", CSN (2009)
- [3] G. Ruipérez, León, "El radón y sus riesgos" Ed. Oviedo, Servicio de publicaciones, Universidad 1992
- [4] World Health Organization (WHO), "WHO handbook on indoor Radon: a public health perspective", 2009
- [5] Sainz Carlos, Quindós Luis, "Exposición de radón en interiores", Curso de Salud Geoambiental
- [6] Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN • Nº 946 • SEPTIEMBRE-OCTUBRE (2011)
- [7] Proyecto 10x10 Universidad de Cantabria convenio colaboración con CSN
- [8] Manuel O. Adán, Frutos V., Borja, "Sistemas de extracción como técnicas constructivas para evitar la entrada de gas radón en las viviendas"
- [9] User Manual Radon Scout Sarad (2009)
- [10] Radon Scout Sarad, "Measuring principals - Decay statistics - Test Planning" (2007)
- [11] Fernández, Pedro L., Quindós Luis S., Sainz Carlos, Gómez José "A theoretical approach to the measurement of Radon diffusion and adsorption coefficients in radoonproof membranes" (2003)
- [12] M. Jiránek, K. Rovenská, A. Froňka, "Radon diffusion coefficient - A material property determining the applicability of waterproof membranes as radon barriers", Czech Technical University.
- [13] ISO/TC 85/SC2, "Measurement of the radioactivity in the environment - Air: radon 222 - Part 10: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials using activity concentration measurement"
- [14] RnIter & RnTrans Handbook, Software for the simulation of transient radon diffusion through membranes and for the determination of the radon diffusion coefficient
- [15] M. Jiránek, M. Kotrbatá "Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition", Czech Technical University (2011)
- [16] M. Jiranek, Zbynek Svodoba "Transient radon diffusion through radon-proof membranes: a new technique for more precise determination of the radon diffusion coefficient"

APÉNDICE 1: Propagación de errores en la determinación del término fuente.

Método 1:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial C} \Delta C\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V} \Delta V\right)^2} = \sqrt{(V \Delta C)^2 + (C \Delta V)^2}$$

Método 2:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial C} \Delta C\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V} \Delta V\right)^2} = \sqrt{(\lambda V \Delta C e q)^2 + (C \lambda \Delta V)^2}$$

APÉNDICE 2: Propagación de errores en el cálculo del coeficiente de difusión, adsorción y permeabilidad.

1. Error en la longitud de difusión

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial C_1} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial C_2} \Delta C_2\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial C_1}$$

$$= \frac{-d \cdot \left(\frac{1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] + \frac{C_1}{C_2 \cdot f} \left[\lambda V + \lambda V \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \right] \right)}{\left[\left(\frac{C_1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] \right)^2 - 1 \right] \cdot \operatorname{arcosh} \left(\frac{C_1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] \right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial C_2}$$

$$= \frac{-d \cdot \left(\frac{C_1}{C_2^2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] - \frac{2\lambda V}{f} \right)}{\left[\left(\frac{C_1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] \right)^2 - 1 \right] \cdot \operatorname{arcosh} \left(\frac{C_1}{C_2} \left[1 - \left(\frac{1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2}{\frac{V_1}{V_2} \left(\frac{f}{\lambda V_1 C_1} - 1\right) + 1} \right) \right] \right)^2}$$

2. Error en el coeficiente de difusión

$$\Delta D = \frac{\partial D}{\partial L} \Delta L$$

$$\Delta D = 2L\lambda\Delta L$$

3. Error en el coeficiente de adsorción

$$\Delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial C_1} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial C_2} \Delta C_2\right)^2}$$

$$\Delta\beta = \sqrt{\left[\frac{-\sinh\left(\frac{d}{L}\right) \cdot VSL}{C_2 \cdot \left[SL\left(\frac{C_1}{C_2} - \cosh(d/L)\right)\right]^2} \Delta C_1\right]^2 + \left[\frac{\sinh\left(\frac{d}{L}\right) \cdot VSLC_1}{C_2^2 \cdot \left[SL\left(\frac{C_1}{C_2} - \cosh(d/L)\right)\right]^2} \Delta C_2\right]^2}$$

3. Error en el coeficiente de permeabilidad

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \beta} \Delta\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial L} \Delta L\right)^2}$$

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{\lambda d L}{\sinh\left(\frac{d}{L}\right)} \Delta\beta\right)^2 + \left(\frac{\lambda\beta d \cdot \sinh\left(\frac{d}{L}\right) - \lambda\beta d L \cdot \cosh\left(\frac{d}{L}\right) \cdot \left(-\frac{d}{L^2}\right)}{\left(\sinh\left(\frac{d}{L}\right)\right)^2} \Delta L\right)^2}$$