

**Estudio de la instrumentación
de vigilancia radiológica
ambiental y de medida
de radón en condiciones
ambientales extremas**

i+d

Colección Documentos I+D 22.2016

Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica ambiental y de
medida de radón en condiciones ambientales extremas

Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica ambiental y de medida de radón en condiciones ambientales extremas

Coordinación CSN: Jose Luis Martín Matarranz

Colección
Documentos I+D
22.2016

UAB
Universitat Autònoma
de Barcelona

CSN  **CONSEJO DE
SEGURIDAD NUCLEAR**

Colección: Documentos I+D
Referencia: DID-22.16

Copyright 2016, Consejo de Seguridad Nuclear
Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
C/ Justo Dorado, 11. 28040 Madrid. España
www.csn.es
peticiones@csn.es
Maquetación: TAU Diseño S.A.
www.taudesign.com
Depósito legal: M-17418-2016

SUMARIO

Preámbulo	9
I. INTRODUCCIÓN	11
II. ANÁLISIS DE LA INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN CONDICIONES DE LABORATORIO Y CONTROLADAS	13
II.1. Instrumentación	14
II.2. Exposiciones en cámaras de radón	17
II.3. Medida de la exhalación de gas radón	29
III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ESTABLECIDA PARA MEDIR EL GAS RADÓN EN CONDICIONES AMBIENTALES EXTREMAS	31
III.1. Medidas de la concentración de radón en ambientes con altas humedades	32
III.2. Medidas de la concentración de radón en ambientes con alto contenido de aerosoles	49
III.3. Desarrollo de protocolos de vigilancia ambiental exterior e interior, poniendo especial énfasis en la de dosimetría de área para personal expuesto a radiación natural	60
IV. CARACTERIZACIÓN DEL MARJAL DE PEÑÍSCOLA	63
IV.1. Caracterización geológica	66
IV.2. Caracterización radiológica	69
IV.3. Exhalación de gas radón	74
V. CONCLUSIONES	77
VI. PUBLICACIONES Y OTROS DOCUMENTOS	81
VI.1. Tesis doctorales	82
VI.2. Publicaciones en revistas científicas	82
VI.3. Procedimientos Normalizados de Trabajo	83
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

AUTORES:

Responsables del proyecto coordinado

Carmen Baixeras Dívar

Jordi García-Orellana

Investigadores (por orden alfabético)

Joan Bach Plaza

Núria Casacuberta Arola

Lluís Font Guiteras

Rogelio Linares Santiago

Pere Masqué Barri

Victoria Moreno Baltà

Valentí Rodellas Vila

Mario Zarroca Hernández

Técnico

José Amado

Preámbulo

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del Programa de Investigación y Desarrollo del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), período 2009-2011. Siguiendo el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, el CSN decidió subvencionar estudios para evaluar el riesgo asociado a la exposición a fuentes naturales de radiación en general y al radón en particular. En algunos recintos donde se llevan a cabo las medidas de los niveles de radón, las condiciones ambientales pueden ser extremas, como es el caso de los balnearios o cuevas, donde los niveles de humedad relativa pueden llegar al 100%. Condiciones extremas de temperatura, humedad, concentración de aerosoles, etc. pueden afectar a la instrumentación que normalmente se utiliza para la medida de la concentración de gas radón, por lo que es necesario caracterizar la respuesta de la instrumentación a dichas condiciones y adaptarla en caso de ser necesario.

El proyecto consta de dos subproyectos y ha sido desarrollado por la Unitat de Física de les Radiacions (UFR) del Departament de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), en colaboración con la Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia del Departament de Geologia de la misma universidad y con el Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

El primer subproyecto se centra precisamente en el estudio de la respuesta de la instrumentación utilizada para la determinación de los niveles de radón a condiciones ambientales extremas y en la determinación de las medidas necesarias para adaptarla a tales condiciones. Por otra parte, en el segundo subproyecto se lleva a cabo una caracterización geológica y radiológica completa del marjal de Peñíscola por ser una región interesante en la que pueden hallarse niveles altos de radón en condiciones ambientales extremas.

I. Introducción

Las tareas desarrolladas en este trabajo se detallan a continuación.

1. Análisis de la instrumentación de medida de la concentración de radón en condiciones de laboratorio y controladas:

- Evaluación y adaptación de la instrumentación para la medida de la concentración del gas radón en condiciones ambientales extremas.
 - a. Puesta a punto de los sistemas de medida para la realización de medidas puntuales, continuas o integradas, y también de la exhalación de gas radón, inicialmente en condiciones de laboratorio.
 - b. Comprobación de la eficacia de los sistemas en un ambiente de radón controlado en el que se puede cambiar la temperatura, el grado de humedad y el contenido de aerosoles como es la cámara de radón del *Institut de Tècniques Energètiques* (INTE) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC).

2. Aplicación de la metodología establecida para medir el gas radón (^{222}Rn), en condiciones ambientales extremas:

- Recintos con elevada humedad (minas subterráneas y balnearios).
- Actividades laborales con elevadas concentraciones de aerosoles.

y estimación de la dosis recibida por el personal expuesto y, en el caso de los recintos que reciben visitas, la dosis recibida por el público en general.

3. Caracterizar las fuentes de radiación natural del marjal de Peñíscola, entender los mecanismos geoquímicos que las producen y determinar las consecuencias radiológicas.

II. Análisis de la instrumentación de medida de la concentración de radón en condiciones de laboratorio y controladas

En colaboración con el INTE de la UPC se llevó a cabo un estudio con el fin de identificar los filtros más adecuados que había que incorporar en los detectores de radón, para minimizar la influencia de las condiciones ambientales extremas. En particular, se analizó el efecto de elevadas concentraciones de humedad sobre la respuesta de los detectores de radón, tanto de tipo continuo como integrador.(Moreno et al.2013;2015).

II.1. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación de medida de la concentración de radón que se analizó, corresponde a los equipos de medida activos y pasivos de que dispone la UFR de la UAB, a excepción de los detectores pasivos de CR-39, adquiridos especialmente para este estudio.

II.1.1. Los detectores de gas radón

Los monitores activos para la medida de la concentración de radón en aire son:

- el ATMOS 12DPX de Gammadata, basado en una cámara de ionización con bomba de aire interna.
- el AlphaGUARD de Genitron Instruments GmbH, que tiene una cámara de ionización donde el radón entra por difusión.
- la sonda Clipperton diseñada en la Universidad de Montpellier, con un detector de semiconductor usado para las medidas de radón en el suelo.
- el RAD7 de DurrIDGE, otro detector de semiconductor con una cámara de electrodeposición. Este monitor requiere que la humedad en el interior de la cámara de detección sea inferior al 10%, por lo que el aire que entra en el detector debe pasar a través de una columna de desecante (drierita) que absorbe la humedad.

Además, el AlphaGUARD y el RAD7 disponen de distintos accesorios para todo tipo de medidas de radón en suelo y agua. Todos estos detectores activos han sido calibrados en las respectivas fábricas y su correcto funcionamiento es verificado de forma periódica.

Los detectores de tipo integrador estudiados son:

- el Makrofol DE (policarbonato) recubierto con una lámina de Mylar aluminizado y situado en la cámara de difusión FzK FN.
- el CR-39, (policarbonato) situado en la cámara de difusión de Gammadata.
- el LR-115 (nitrato de celulosa) situado en una cámara de difusión para medidas en el suelo y evitar la detección del torón.
- los electretes E-Perm de Rad Elec inc., basados en cámaras de ionización. Las configuraciones del tipo de electrete y de la cámara de ionización utilizados son SLT (electrete Long-Term con cámara S, de 200 mL de volumen), HLT (electrete Long-Term con cámara H, de 960 mL de volumen) y HLT

– ^{220}Rn filter (electrete Long-Term con cámara H y con filtro para evitar la entrada de torón).

Los tres primeros tipos de detectores integradores están basados en el revelado de las trazas nucleares. Los detectores de CR-39 son analizados por Gammadata, mientras que los detectores de Makrofol y LR-115 se montan, revelan y analizan en los laboratorios de la Unidad de Física de las Radiaciones (UFR) de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Ambos detectores fueron calibrados en la cámara de radón de la Health Protection Agency (HPA) en Chilton, UK, obteniendo los factores de calibración, f , que se detallan en la tabla 1.

Detector	f (trazas $\text{cm}^{-2} \text{ kBq}^{-1} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)	Año
Makrofol	0.68 ± 0.04	2010
LR115	0.85 ± 0.03	2008

Tabla 1. Factores de calibración de los detectores integradores que utiliza el GFR de la UAB para medir radón.

La UFR de la UAB participa periódicamente, con los detectores de Makrofol, en la intercomparación de detectores integradores de radón que organizan la HPA y el INTE de la UPC. Los resultados de los últimos años han permitido comprobar el factor de calibración que aparece en la tabla 1. Desde el año 2012 también se ha participado en la intercomparación de detectores pasivos organizada por BfS (Bundesamt für Strahlenschutz), y se ha colaborado en el RIM 2012 (Radon Comparison Measurement at reference sites Czech Republic) con detectores activos para medir la concentración de radón en el terreno.

Asimismo, el laboratorio participó en la intercomparación de medidas de radiación natural en condiciones de campo que organizó la Universidad de Cantabria en las instalaciones de ENUSA de Saelices el Chico (Salamanca) en 2011, en los siguientes ejercicios:

- Medidas de radón en el aire interior y exterior, con detectores activos y pasivos.
- Medidas de radón en agua.
- Medidas de radón en el terreno.
- Medidas de la radiación gamma externa.

La participación en intercomparaciones permite controlar la calidad de los resultados obtenidos.

II.1.2. Las membranas de polietileno (filtros)

Las membranas de polietileno han sido ampliamente utilizadas para evitar la influencia de la humedad sobre los detectores pasivos de radón. La entrada de ra-

dón por difusión a través de un filtro implica un determinado tiempo de retraso, τ_M (s), que depende de las características del filtro (grosor, superficie y coeficiente de difusión) y del volumen de la cámara de difusión del detector.

Las tres membranas o filtros analizados para evitar la entrada de humedad en los volúmenes de detección de los detectores de radón están fabricadas de polietileno, son de fácil adquisición en el mercado y sus nombres comerciales son Tyvek, Treseses y Zipdar (figura 1). En la tabla 2 se presentan sus principales características, así como el código asociado a cada uno de ellos. El código A corresponde a la configuración de detector que no dispone de ningún tipo de filtro, así que a partir de ahora hablamos de 4 tipos de configuración.

Código	Tipo de filtro	Espesor del filtro (μm)	Dimensiones (cm x cm)	Color	Tipo de cierre
A	Sin filtro (aire)	-	-	-	-
B	Tyvek	115 ± 6	13.3 x 23.0 25.5 x 38.0	Blanco opaco	Adhesivo
C	Treseses	33 ± 2	6.5 x 13.5 15.5 x 31.5 29.0 x 42.5	Transparente	-
D	Zipdar	51 ± 2	17.8 x 20.5 26.7 x 28.0	Transparente	Zip

Tabla 2. Características de los diferentes tipos de filtro utilizados en este estudio.



Figura 1. Detectores pasivos de Makrofol (arriba) y de LR115 (abajo) sin filtro (los de la izquierda) y con filtros (el resto).

II.2. EXPOSICIONES EN CÁMARAS DE RADÓN

La calibración de un detector acostumbra a realizarse para una configuración concreta del mismo y en unas determinadas condiciones de temperatura y humedad, que son parecidas a las que se encuentran en el interior de las viviendas o en la mayoría de los lugares de trabajo. Si se cambian los filtros que configuran el detector o las condiciones ambientales donde se pretende utilizar, es posible que el factor de calibración también se vea modificado.

Con el objetivo de comprobar la influencia de introducir un filtro adicional sobre la respuesta de los detectores de radón, se realizaron diversas exposiciones en cámaras de radón, tanto en condiciones de laboratorio como en condiciones controladas de temperatura y humedad.

II.2.1. La cámara de radón de la UAB

La UFR de la UAB dispone de una pequeña cámara de radón (figura 2) donde se exponen sus detectores activos y pasivos, con el fin de llevar un cabo el control de calidad interno del laboratorio. Esta cámara se utilizó en la fase inicial del estudio para exponer detectores de Makrofol con las configuraciones que aparecen en la tabla 2. Las condiciones de temperatura y humedad de la exposición fueron las condiciones habituales del laboratorio y la concentración de radón se midió de forma continua con el monitor AlphaGUARD. Un total de 20 detectores (5 de cada configuración) se expusieron a una elevada concentración de radón durante 22 horas, representando una exposición total $X_{Rn} = (901 \pm 32) \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$.

Inmediatamente después de finalizar la exposición, se abrieron las cámaras de difusión de los detectores para retirar las láminas de Makrofol, con el objetivo de observar el efecto de no tener en cuenta el tiempo de retraso en la entrada del radón por difusión a través de la membrana o filtro. Los resultados para cada tipo de configuración se muestran en la figura 3.



Figura 2. Cámara de radón de la UAB. En su interior se observa el monitor AlphaGUARD, un bote blanco con pechblenda y algunos detectores de Makrofol.

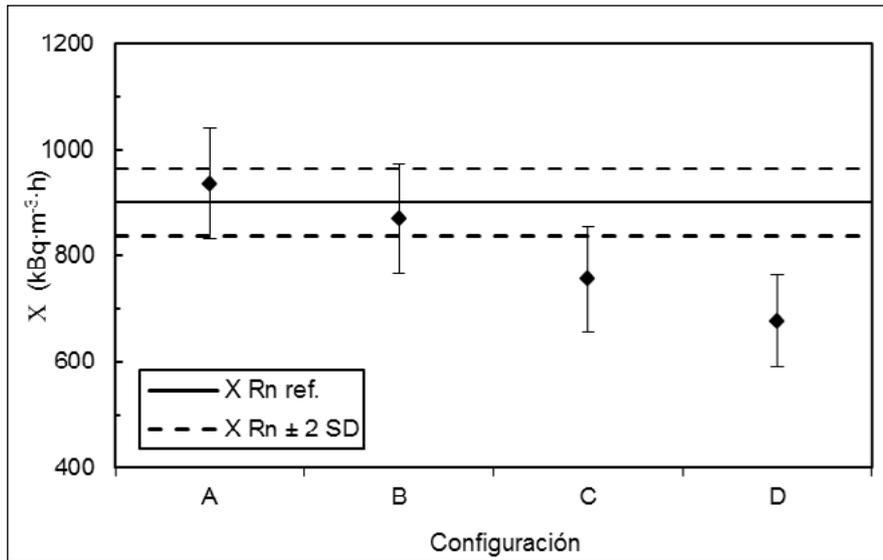


Figura 3. Exposiciones de radón medidas con cada una de las configuraciones del detector de Makrofol expuestas en el interior de la cámara de radón de la UAB. El valor de referencia (línea continua) ha sido obtenido a partir del detector activo AlphaGUARD.

Si el detector se extrae de la cámara de difusión inmediatamente después de finalizar la exposición, la exposición medida puede ser inferior a la real, tal y como se observa con las configuraciones C y D (figura 3). La exposición real se puede obtener a partir de la exposición medida con el detector de Makrofol, X_{Rn}^{cb} , multiplicada con un factor corrector, f_T .

$$X_{Rn} = f_T X_{Rn}^{cb} \quad (1)$$

Este factor depende tanto del tiempo de retraso en la entrada del radón, a través de la membrana, al interior de la cámara de difusión (τ_M (s)), como de la vida media del radón (τ_R) y viene dado por la expresión:

$$f_T = \frac{\tau_M t_0}{\tau(t_0 - \tau)} \quad (2)$$

donde τ es el tiempo de retraso efectivo:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_M} \quad (3)$$

$\tau_R = 1/\lambda$, donde λ es su constante de desintegración radioactiva ($2.1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$).

A partir de las expresiones (1), (2) y (3) se determinan los tiempos de retraso τ y τ_M . El tiempo de retraso τ_M también puede determinarse a partir de las características de la membrana, como el grosor, δ (cm), la superficie, S_f (cm²) y el coeficiente de difusión, D (cm²·s⁻¹), y del volumen de la cámara de difusión, V^{cb} (cm³), según la expresión:

$$\tau_M = \frac{\delta V^{cb}}{D S_f} \quad (4)$$

Así que, si se dispone del valor de τ_M , la expresión (4) permite determinar experimentalmente el coeficiente de difusión, en el caso de que la membrana de polietileno sea utilizada en forma de filtro dentro de la cámara de difusión. En las exposiciones realizadas se utilizaron las membranas en forma de bolsa, desconociendo el volumen total de aire que quedaba cerrado en su interior, así que no se pudo determinar dicho coeficiente.

A partir de τ y τ_M se obtiene el factor τ_M / τ , que corrige el hecho de que las concentraciones de radón finales dentro y fuera de la cámara de difusión siempre son diferentes. El tiempo τ también permite obtener el factor de corrección específico de esta exposición $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$, el cual tiene en cuenta el hecho de haber abierto las cámaras de difusión cuando se termina la exposición. El producto de estos dos factores es el factor corrector total, f_T , de esta exposición. Los valores de todos estos parámetros para cada una de las tres configuraciones de membrana de polietileno aparecen en la tabla 5.

El valor de la concentración de radón obtenido con la configuración D presenta una diferencia significativa respecto al de la configuración con filtro de fibra de vidrio (A) y respecto al valor de referencia de la concentración de radón (figura 3). No es la membrana que tiene mayor grosor pero sí la que supone un tiempo de retraso efectivo más grande, (4.8 ± 0.5) h. Debido a la corta duración de esta exposición, su factor corrector $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ también es importante, 1.28 ± 0.07 . Para tiempos de exposición mayores, este factor corrector disminuye y, entonces, el hecho de no tener en cuenta el tiempo entre la finalización de la exposición y la apertura de la bolsa va perdiendo importancia. Para que este factor corrector sea inferior al 10 %, en el caso de la configuración D , el tiempo de exposición t_0 tiene que ser superior a las 53 horas. Estas condiciones normalmente se dan en el caso de una campaña de medida, pero hay que tenerlo presente en el caso de las exposiciones en una cámara de radón.

II.2.2. La cámara de radón de la UPC

Para controlar la respuesta de los detectores en condiciones ambientales extremas se expusieron los detectores en la cámara de radón del INTE de la UPC, que es de referencia en España. En esta cámara, se llevaron a cabo distintas exposiciones de los detectores de radón descritos anteriormente, variando las condiciones de temperatura ([10-30] °C), humedad relativa ([45-85] %) y exposición de radón ([200-300] kBq·h·m⁻³). En total se realizaron cinco exposiciones en la cámara. En la tabla 3 se dan los valores de la concentración de radón de referencia, el tiempo de exposición y las condiciones ambientales de la cámara, así como el número de detectores activos, de trazas nucleares y electretes de cada configuración estudiada en las distintas exposiciones.

Expo	C _{Rn} Ref. (kBq·m ⁻³)	T (°C)	Hr (%)	t _o (h)	Detectores	Nº de detectores por configuración				
						A	B	C	D	Otro
1	8.5 ± 1.2	20	45	74	Makrofol	6	6	6	6	
					Electret – SLT	4	2	2	2	
					Electret – HLT	4	2	2	2	
					Electret – HLT- ²²⁰ Rn	1	1	1	1	
2	17.0 ± 2.4	20	45	67	Makrofol	6	6	6	6	
					LR115	2	2	2	2	
					Electret – SLT	4	2	2	2	
					Electret – HLT- ²²⁰ Rn	4	2	2	2	
					ATMOS 12DPX	1				
					AlphaGUARD	1				
					RAD7	3				
3	20.0 ± 2.8	20	45	50	Makrofol	6	6	6	6	
					LR115	3	3	3	3	
					CR-39	4	4	4	4	
					Electret – SLT	4	4	4	4	
					AlphaGUARD	2	1	1	1	
					Clipperton	1				1 ^a
4	20.0 ± 2.8	20	85	50	Makrofol	6	6	6	6	
					LR115	3	3	3	3	
					CR-39	4	4	4	4	
					Electret – SLT	4	2	2	2	
					Electret – HLT- ²²⁰ Rn	5	2	2	2	
					ATMOS 12DPX	1				
					AlphaGUARD					1 ^b
					Clipperton					1 ^a
5	20.0 ± 2.8	30	90	50	Makrofol	6	6	6	6	
					LR115	3	3	3	3	
					CR-39	4	4	4	4	
					Electret – SLT	4	2	2	2	
					Electret – HLT- ²²⁰ Rn	5	2	2	2	
					AlphaGUARD					1 ^b
					Clipperton					1 ^a

Tabla 3.
Condiciones de las distintas exposiciones en la cámara de radón del INTE de la UPC y número de detectores de cada configuración.

^a Bolsa de polietileno negra opaca que impide la entrada de luz.

^b Bolsa de polietileno blanca opaca proporcionada por Genitron.

Los resultados de las tres primeras exposiciones (figuras 4, 5 y 6), realizadas en condiciones habituales de laboratorio (20°C de temperatura y 45% de humedad), (i) permitieron comprobar los factores de calibración de los detectores de Makrofol y LR115 que no utilizan bolsa de polietileno y (ii) mostraron la influencia de las bolsas de polietileno sobre la respuesta de los diferentes tipos de detectores.

De los resultados obtenidos se desprende que es necesario aplicar un factor de corrección sobre el factor de calibración para los dos tipos de detectores pasivos. El factor de corrección de los detectores de Makrofol es 1.38 ± 0.18 y para los detectores de LR115 es 0.85 ± 0.15 .

La influencia de las tres membranas de polietileno sobre la respuesta de los detectores es debida a que éstas tienen unos grosores y unos coeficientes de difusión diferentes. Esto implica la necesidad de aplicar unos factores correctores, f_T , sobre los factores de calibración. En general, las concentraciones de radón más bajas se observan con las configuraciones C y D y parece que la configuración B no requiere corrección.

En la primera exposición, la diferencia más significativa entre la respuesta de los detectores y el valor de referencia se observó con los electretes HLT y HLT-²²⁰Rn (figura 4). En la segunda exposición, donde se incorporaron los detectores de LR115, se observó cómo éstos presentaban una gran dispersión de resultados, hasta el 30 %, y que fueron los que mostraban la diferencia más grande, especialmente los de la configuración D, que medía la mitad de la C_{Rn} de referencia (figura 5). En la tercera exposición se incorporaron los detectores de CR-39, que parecían que mostraban unos resultados superiores al valor de referencia (figura 6). Esta discrepancia con el valor de referencia para los detectores de CR-39 podía ser debida a problemas de absorción del radón por parte del plástico de la cámara de difusión. Cuando el detector no se ventila suficientemente y se deja dentro de la cámara de difusión demasiado tiempo después de la exposición, el radón que previamente ha sido absorbido por el plástico de la cámara y después se libera, continúa exponiendo el detector y esto puede afectar de forma significativa al resultado final de la medida. Precisamente los detectores de CR-39 de la tercera exposición se devuelven a Gammadata cerrados dentro de una bolsa de plástico. Una buena ventilación antes del envío evita este problema.

En el caso de los detectores de LR115 también se observó este efecto en la tercera y la cuarta exposición (figuras 6 y 7) ya que quedaron montados dentro de las cámaras de difusión durante algunos días antes de su análisis, y por lo tanto, estas dos exposiciones no se tuvieron en cuenta para determinar los factores correctores. A partir de las tres primeras exposiciones se pueden calcular los promedios de los factores correctores totales, f_T , de las cuatro configuraciones para los detectores de Makrofol y para los electretes SLT y HLT-²²⁰Rn (tabla 4).

En la cuarta exposición (figura 7) y en la quinta exposición (figura 8), donde las condiciones ambientales fueron más extremas, los electretes HLT-²²⁰Rn presentaron el mismo comportamiento, no observándose el efecto de aumento de

la humedad. Además en ambos casos la diferencia más grande respecto al valor de referencia se obtuvo con la configuración D. Por otro lado, los electretes SLT presentaron un comportamiento curioso, ya que en la cuarta exposición la configuración más influyente fue la C y en la quinta lo fué la B. En estas dos últimas exposiciones, la posible influencia del tipo de membrana sobre la respuesta del detector de CR-39 queda enmascarada por la dispersión de los resultados y, por lo tanto, parece que no requieren que se aplique ningún factor corrector (tabla 4). En la quinta exposición (figura 8) los detectores de LR115 volvieron a mostrar la diferencia más grande respecto al valor de referencia con la configuración D. Los factores correctores de todas las configuraciones en las condiciones ambientales de la exposición 5 se presentan en la tabla 4.

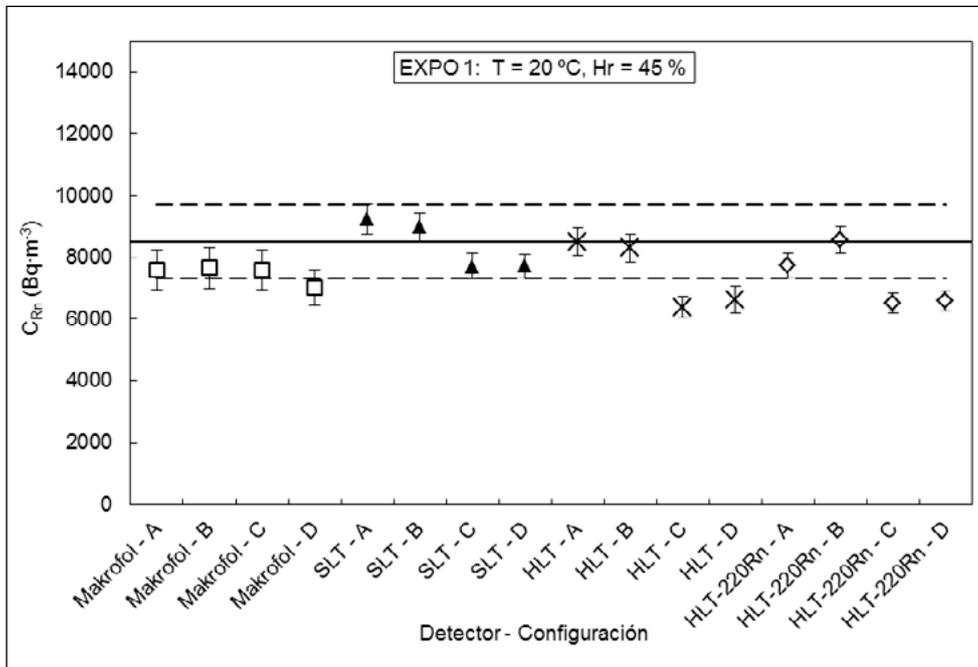


Figura 4. Primera exposición: valores medios de la concentración de radón en función del tipo de detector integrador con las distintas configuraciones de membrana, comparados con el valor de referencia.

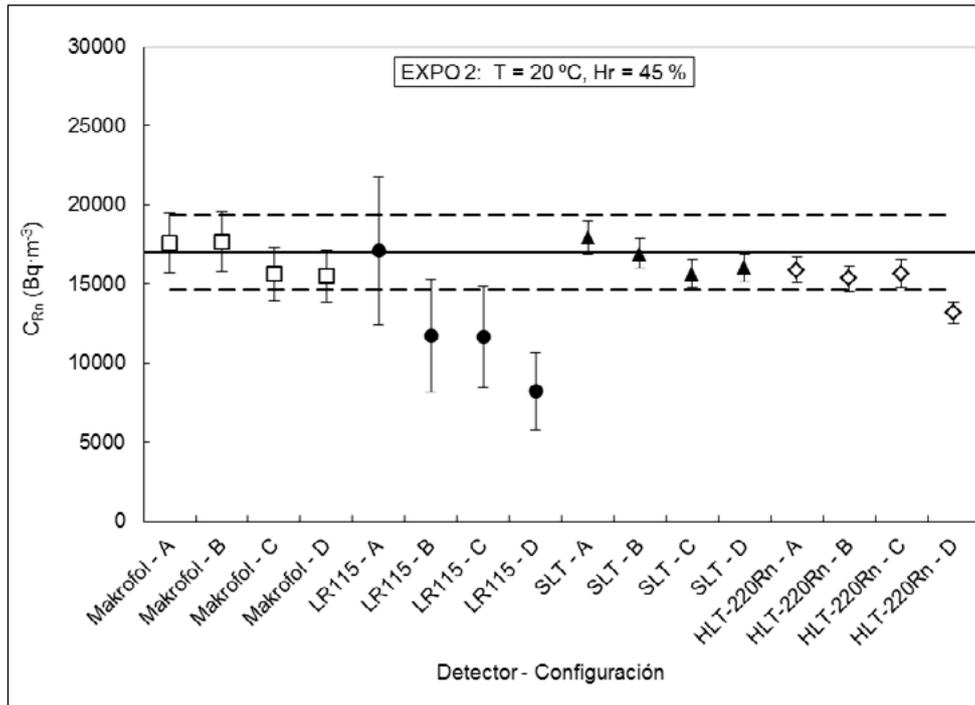


Figura 5. Segunda exposición: valores medios de la concentración de radón en función del tipo de detector integrador con las distintas configuraciones de membrana, comparados con el valor de referencia.

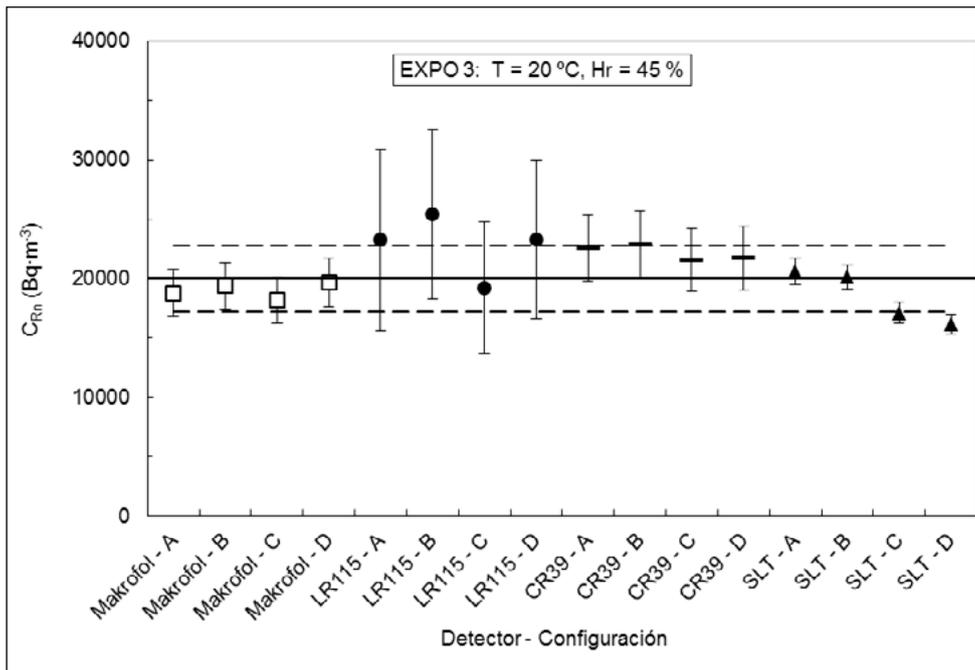


Figura 6. Tercera exposición: valores medios de la concentración de radón en función del tipo de detector integrador con las distintas configuraciones de membrana, comparados con el valor de referencia.

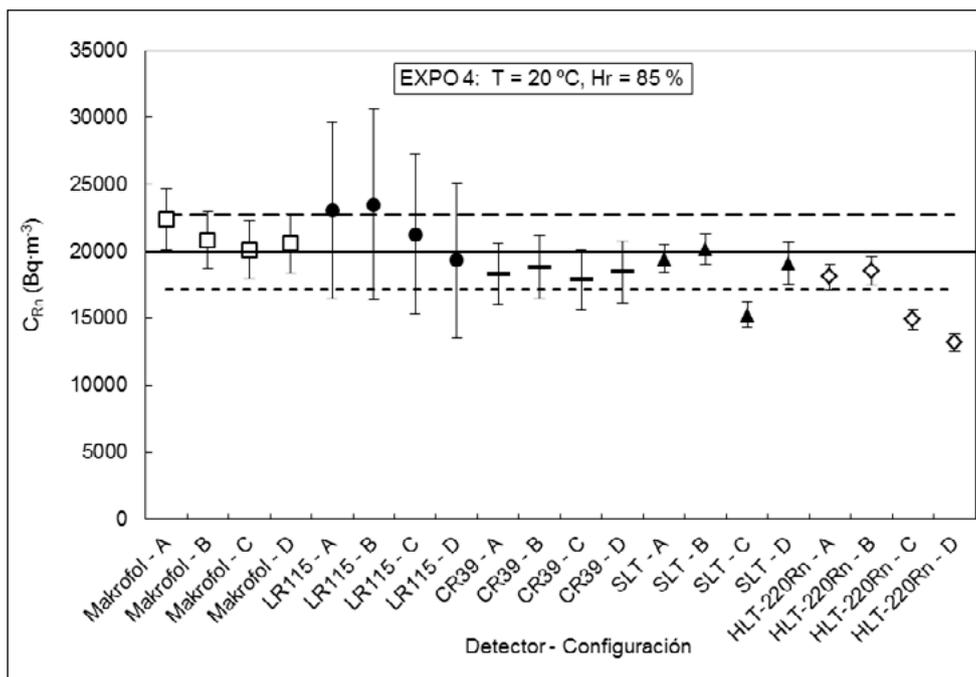


Figura 7. Cuarta exposición: valores medios de la concentración de radón en función del tipo de detector integrador con las distintas configuraciones de membrana, comparados con el valor de referencia.

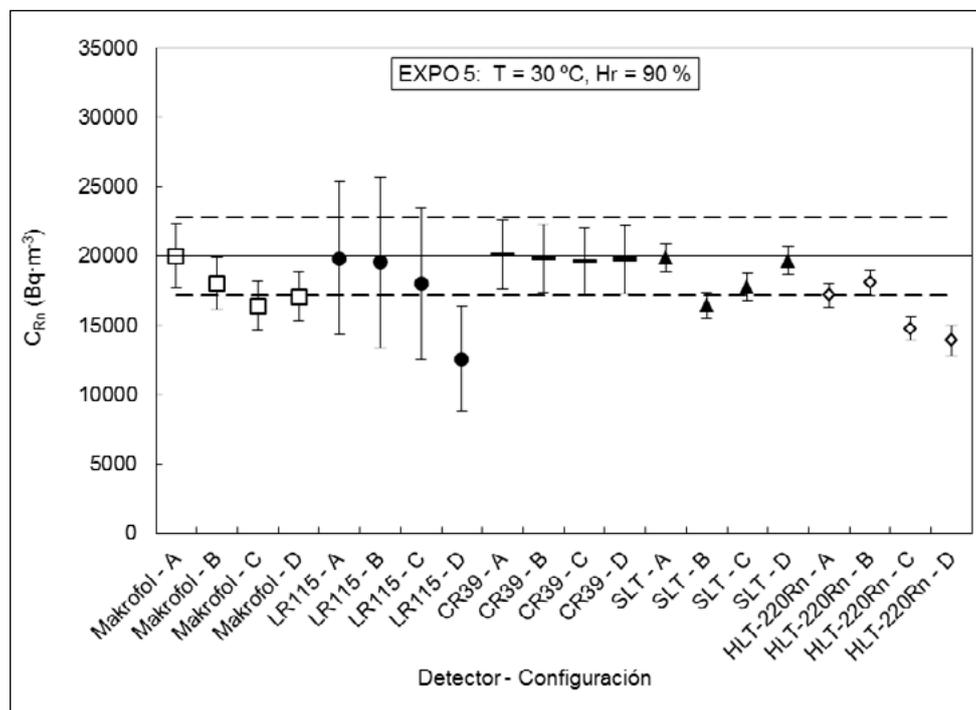


Figura 8. Quinta exposición: valores medios de la concentración de radón en función del tipo de detector integrador con las distintas configuraciones de membrana, comparados con el valor de referencia.

Detector	Expo	Factor corrector total, f_T , para cada configuración			
		A	B	C	D
Makrofol	1, 2 y 3	1.05 ± 0.04	1.03 ± 0.04	1.10 ± 0.01	1.11 ± 0.06
	4	0.89 ± 0.06	0.96 ± 0.07	0.99 ± 0.07	0.97 ± 0.07
	5	1.00 ± 0.07	1.11 ± 0.08	1.22 ± 0.09	1.17 ± 0.08
LR115	2	0.99 ± 0.07	1.45 ± 0.17	1.46 ± 0.16	2.07 ± 0.35
	5	1.01 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.11 ± 0.08	1.59 ± 0.21
CR-39	4	1.09 ± 0.08	1.06 ± 0.07	1.12 ± 0.08	1.08 ± 0.08
	5	1.00 ± 0.07	1.01 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.01 ± 0.07
Electret - SLT	1, 2 y 3	0.95 ± 0.01	0.98 ± 0.02	1.10 ± 0.03	1.13 ± 0.05
	4	1.03 ± 0.07	0.99 ± 0.07	1.31 ± 0.09	1.05 ± 0.07
	5	1.00 ± 0.07	1.21 ± 0.09	1.12 ± 0.08	1.02 ± 0.07
Electret - HLT	1	1.00 ± 0.07	1.02 ± 0.07	1.33 ± 0.09	1.28 ± 0.09
Electret – HLT- ²²⁰ Rn	1 y 2	1.09 ± 0.02	1.05 ± 0.06	1.19 ± 0.11	1.29 ± 0.01
	4	1.11 ± 0.08	1.08 ± 0.08	1.34 ± 0.10	1.51 ± 0.11
	5	1.16 ± 0.08	1.11 ± 0.08	1.35 ± 0.10	1.44 ± 0.11

Tabla 4. Factores correctores totales, f_T , para los resultados de los detectores pasivos de radón con las cuatro configuraciones analizadas en las cinco exposiciones en la cámara del INTE.

Todos los electretes fueron medidos inmediatamente después de la finalización de la exposición, por lo tanto, se pudo determinar el tiempo de retraso efectivo, τ , el tiempo de retraso, τ_M , y los factores correctores τ_M/τ y $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ de forma análoga a la exposición en la cámara de radón de la UAB. Los valores de τ y τ_M , y consecuentemente el factor τ_M/τ , obtenidos para los electretes SLT con las configuraciones C y D (tabla 5) coinciden con los valores de los detectores de Makrofol con la configuración D. En cambio, los factores correctores $\frac{t_0}{(t_0 - \tau)}$ fueron menores porque la duración de la exposición en la cámara del INTE fue más larga. Por otro lado, para los electretes HLT con y sin filtro de torón estos tiempos fueron mayores: alrededor de las 11 h para la configuración D y entre las 7 h y las 14 h para la configuración C. Para la configuración B solo fue posible determinar el valor de estos parámetros para los electretes HLT-²²⁰Rn, ya que para los otros dos

tipos de electretes se obtuvieron tiempos negativos y, por lo tanto, sin significado físico. Con estos resultados se observa una clara influencia del volumen de detección sobre los tiempos τ y τ_M , ya que en aquellos detectores con cámaras grandes (HLT y HLT-²²⁰Rn) estos tiempos son más grandes que en los detectores que tienen cámaras más pequeñas, como los detectores de Makrofol y los electretes SLT.

A diferencia de los electretes, el resto de detectores pasivos expuestos no se sacaron de las cámaras de difusión inmediatamente después de la finalización de la exposición y no se llevó un control exacto del tiempo transcurrido entre la finalización de la exposición y la apertura de las bolsas, aspecto que impidió determinar el correspondiente factor corrector. Nos dimos cuenta de este efecto después de realizar las exposiciones cuando se realizó un análisis detallado y se encontró alguna diferencia entre los distintos detectores. De todas formas en este caso los valores de los factores de corrección son pequeños y quedan en parte enmascarados por la dispersión en los resultados.

Expos	Detector	Conf.	τ (h)	τ_M (h)	τ_M / t	$t_0 / (t_0 - \tau)$
UAB	Makrofol	B	0.7 ± 0.5	0.7 ± 0.5	1.01 ± 0.83	1.03 ± 0.05
		C	3.1 ± 0.5	3.1 ± 0.6	1.02 ± 0.18	1.16 ± 0.06
		B	4.8 ± 0.5	5.0 ± 0.6	1.04 ± 0.12	1.28 ± 0.07
INTE	Electret - SLT	B	-	-	-	-
		C	4.5 ± 0.5	4.6 ± 0.6	1.03 ± 0.01	1.08 ± 0.02
		D	4.8 ± 1.4	5.0 ± 1.5	1.04 ± 0.01	1.09 ± 0.04
	Electret - HLT	B	-	-	-	-
		C	12.6 ± 0.8	13.9 ± 0.9	1.10 ± 0.07	1.20 ± 0.03
		D	11.1 ± 0.7	12.1 ± 0.8	1.09 ± 0.07	1.18 ± 0.02
	Electret - HLT- ²²⁰ Rn	B	2.0 ± 2.4	3.6 ± 2.1	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.04
		C	7.6 ± 4.1	6.7 ± 3.1	1.06 ± 0.04	1.12 ± 0.07
		D	10.9 ± 0.3	10.2 ± 1.8	1.09 ± 0.01	1.18 ± 0.01

Tabla 5. Tiempos de retraso efectivo τ , tiempos de retraso τ_M y factores correctores τ_M / τ y $t_0 / (t_0 - \tau)$ para las tres configuraciones de membrana de polietileno (Conf.) a partir de los resultados de las exposiciones de detectores de Makrofol en la cámara de la UAB y de los electrets en la cámara del INTE en condiciones normales de temperatura (20 °C) y de humedad relativa (45 %).

En todas las exposiciones, la respuesta de los monitores de medida en continuo, AlphaGUARD y ATMOS 12DPX, fue semejante a la del monitor de referencia que tiene el INTE (figuras 9, 10, 11 y 12). Sin embargo, en el caso de los moni-

tores RAD7 aparecieron ciertas discrepancias en los resultados. Concretamente, uno de los tres monitores RAD7, con número de referencia 2545, podría tener un funcionamiento inadecuado de la sonda de humedad. En efecto, los valores de la concentración de radón presentaban un comportamiento diferente al de los demás detectores, especialmente durante las primeras horas de la segunda exposición, como se pone de manifiesto en la figura 9.

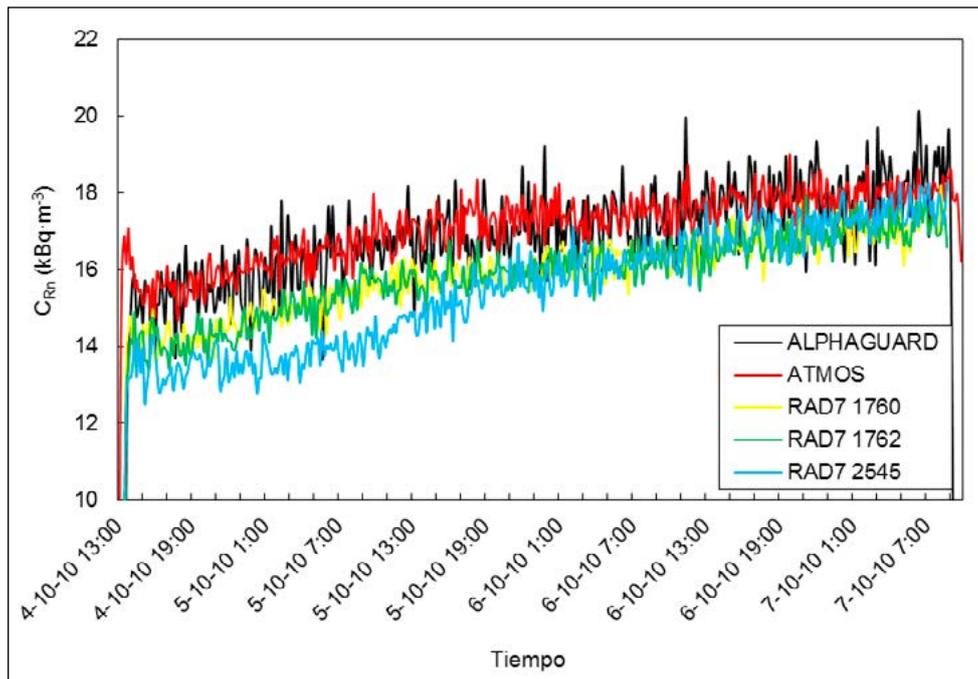


Figura 9. Segunda exposición: Resultados de los detectores que miden en continuo.

En la tercera exposición (figura 10a) se observó que la sonda Clipperton no alcanzaba el valor de la C_{Rn} del AlphaGUARD hasta casi la mitad de la exposición y que sus valores presentaban muchas fluctuaciones. La mayor parte de estas fluctuaciones eran debidas al ruido electrónico y podían ser debidas también a que la observación se realizó durante un tiempo de integración pequeño (10 min) con un umbral de aceptación demasiado grande (10.000 %). Como los niveles de radón normalmente experimentan variaciones más lentas que las provocadas por el ruido electrónico del equipo, para poder discriminar las fluctuaciones correctamente, las medidas deben realizarse con unos tiempos de integración más grandes (≥ 1 h) y unos umbrales de aceptación inferiores (1.000 % o 100 %) (Monnin y Seidel, 1998), tal como se efectuó en las dos exposiciones siguientes (figuras 10b y 10c).

El retraso en la entrada del radón era debido a la bolsa de polietileno negro, de (44 ± 1) mm de grosor, utilizada para evitar la llegada de luz sobre el detector de semiconductor. De forma análoga al caso de los detectores pasivos, la utilización de una membrana también requiere la aplicación de un factor corrector f_T sobre su respuesta. Este factor era (1.34 ± 0.03) para la tercera exposición, (1.33 ± 0.03) para la cuarta exposición y (0.93 ± 0.02) para la quinta exposición. La diferencia

del factor corrector para la quinta exposición, puso de manifiesto la influencia de la temperatura, ya que la tercera y la cuarta exposición se realizaron a 20 °C y la quinta a 30 °C, durante la mayor parte de la exposición. Con el objetivo de provocar la condensación del vapor de agua sobre la superficie de los detectores, cuando faltaban 4 h para la finalización de la quinta exposición se provocó la disminución rápida de la temperatura, desde 30 °C hasta 10 °C. Con los resultados de la sonda Clipperton se observó la influencia significativa de esta bajada de temperatura sobre su respuesta, la cual presentaba un aumento de los valores medidos de la C_{Rn} (figura 10). Para poder cuantificar correctamente esta influencia, la duración de la exposición debería haber sido más larga. Hay que tener en cuenta que en las medidas del nivel de radón en el terreno se utiliza un aislante térmico para evitar que se produzca condensación por variación de la temperatura, además, no se utiliza ninguna bolsa negra, porque en el interior del terreno el detector ya se encuentra en completa oscuridad por lo que no hay necesidad de aplicar ningún factor de corrección.

Observando detalladamente las primeras horas de exposición en los casos donde se encontraban los monitores ATMOS y AlphaGUARD juntos (figuras 9, 10b y 10c) se observó que el monitor AlphaGUARD alcanzaba el valor de la C_{Rn} del monitor ATMOS dos horas después. Este hecho podía ser debido a los diferentes tipos de entrada del radón en los dos equipos: en el AlphaGUARD por difusión y en el ATMOS con una bomba interna. En las tres últimas exposiciones el monitor AlphaGUARD se expuso con la bolsa de polietileno que proporciona la casa Genitron Instruments GmbH y, por lo tanto, parecía que esta membrana no retrasaba la entrada del radón.

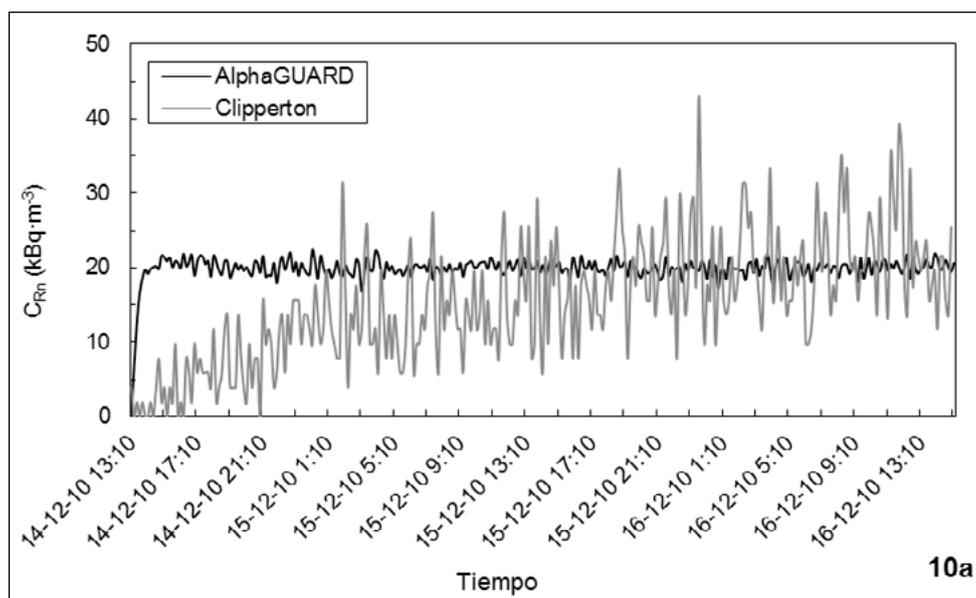
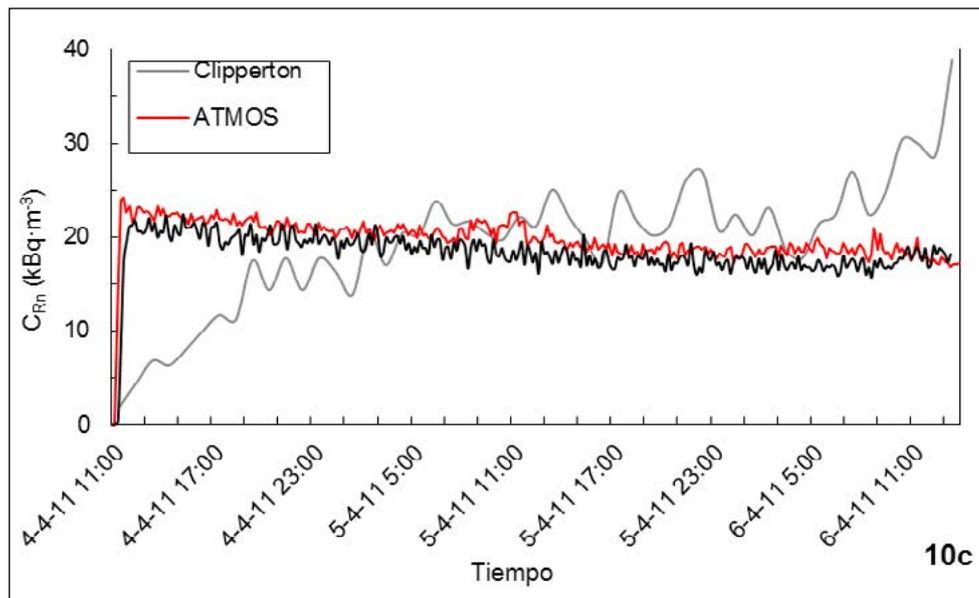
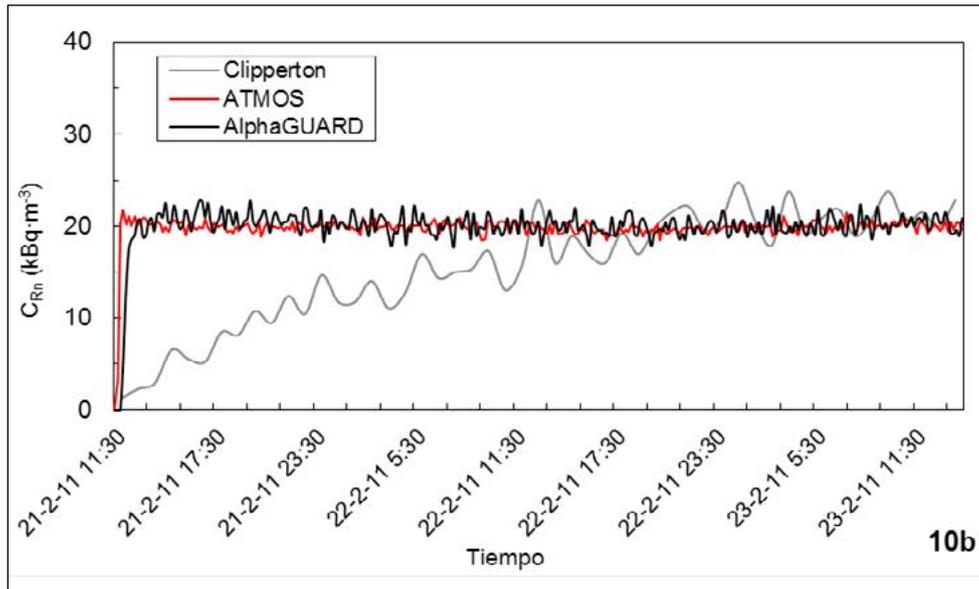


Figura 10. Resultados de los detectores que miden en continuo: de la tercera exposición (10a), de la cuarta exposición (10b) y de la quinta exposición (10c).



II.3. MEDIDA DE LA EXHALACIÓN DE GAS RADÓN.

El flujo de radón se midió en continuo con un monitor activo RAD-7 (Durridge) siguiendo el método acumulativo. Este método permite estudiar la evolución de la concentración de radón en una cámara de acumulación, en nuestro caso de 20 L, situada sobre la superficie del suelo. El monitor se coloca cerca de la cámara y el aire se bombea a una velocidad de $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

La evolución temporal de la concentración de radón en la cámara viene expresada por la ecuación:

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \frac{E_{Rn}}{V^{ch}} - \lambda^0 C(t) \quad (5)$$

donde $C(t=0)$ es la concentración inicial ($Bq\ m^{-3}$), E_{Rn} es la velocidad de exhalación que se define como la cantidad de gas ^{222}Rn que sale del suelo en la unidad de tiempo ($Bq\ h^{-1}$), V^{ch} es el volumen de la cámara de acumulación (m^3) y λ^0 es la suma de la constante de desintegración del ^{222}Rn y la constante de ventilación (h^{-1}), que tiene en cuenta posibles intercambios de aire con el exterior debido a pérdidas en la cámara. La solución de esta ecuación es:

$$C(t) = \frac{E_{Rn}}{\lambda^0 V^{ch}} (1 - e^{-\lambda^0 t}) \quad (6)$$

En el caso de medir durante un corto intervalo de tiempo t y despreciar las pérdidas queda:

$$C(t) = \frac{E_{Rn} t}{V^{ch}} = \frac{FA t}{V^{ch}} \quad (7)$$

donde A (m^2) es la superficie de suelo cubierta por la cámara de acumulación, F el flujo de radón ($Bq\ m^{-2}\ h^{-1}$) y t (h) el tiempo de medida.

III. Aplicación de la metodología establecida para medir el gas radón en condiciones ambientales extremas

III.1. MEDIDAS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AMBIENTES CON ALTAS HUMEDADES

Una vez analizado el comportamiento de los detectores integradores y activos de radón en la cámara del INTE se iniciaron las exposiciones en tres situaciones reales: una mina-museo, un balneario de pequeñas dimensiones y otro con muchas salas.

III.1.1. Mina-museo

Esta mina ya había sido estudiada unos años antes (Font et al. 2008) y desde entonces se habían realizado bastantes modificaciones en el edificio de entrada a la mina, actualmente un museo. En las primeras medidas ya se identificaron unas concentraciones elevadas de radón y humedades de más del 80%, por lo que representaba un buen laboratorio natural para este estudio (Moreno et al., 2012,2015).

Las medidas integradas se realizaron con el detector más utilizado por la UFR de la UAB, el detector basado en Makrofol. Los detectores pasivos se expusieron sin bolsa (A) y con 3 configuraciones distintas de bolsa de polietileno: Tyvek (B), Treseses (C) y Zipdar (D), para poder comprobar el efecto de la humedad sobre la respuesta de los detectores. Un total de 17 detectores fueron expuestos durante 4 días, del 16 al 20 de mayo de 2011.

El detector activo AlphaGUARD fue expuesto durante los mismos 4 días que los detectores pasivos. El detector se mantuvo dentro de la bolsa de Tyvek que proporciona el fabricante del monitor para proteger de las condiciones ambientales extremas. Este detector mide la concentración de radón en continuo, que entra por difusión en el interior y en este estudio se guardó una lectura cada 10 minutos. También se registró la presión atmosférica, la temperatura y la humedad del aire.

En la tabla 6 se dan los resultados de la concentración de radón obtenidos con los detectores pasivos de Makrofol en la mina. Debido a la corta duración de la medida, solo 4 días, la dispersión y las incertidumbres de los resultados fueron elevados, ya que el límite de detección (L_D) para una exposición de 4 días fue de $250 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ y las concentraciones no fueron muy elevadas.

Las variaciones temporales de los valores de la concentración de radón, temperatura, humedad y presión atmosférica medidos en continuo con el monitor AlphaGUARD en el interior de la mina durante 4 días del mes de mayo de 2011, se presentan en la figura 11. Los valores medios y los intervalos de valores de estos parámetros se presentan en la tabla 7.

Código	Lugar	Nivel	Bolsa	Concentración ^{222}Rn ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)
0.0	Exterior	0	-	$< L_D$
0.A	Interior	0	-	1.1 ± 0.5
0.B	Interior	0	Tyvek	0.9 ± 0.3
0.C	Interior	0	Treseses	0.8 ± 0.5
0.D	Interior	0	Zipdar	1.1 ± 0.2
1.A	Interior	-1	-	4.5 ± 0.9
1.B	Interior	-1	Tyvek	3.8 ± 0.7
1.C	Interior	-1	Treseses	3.8 ± 0.5
1.D	Interior	-1	Zipdar	3.8 ± 0.7
2.A	Interior	-2	-	4.4 ± 1.0
2.B	Interior	-2	Tyvek	4.6 ± 0.6
2.C	Interior	-2	Treseses	3.7 ± 0.6
2.D	Interior	-2	Zipdar	5.0 ± 0.5
3.A	Interior	-3	-	8.0 ± 0.6
3.B	Interior	-3	Tyvek	6.9 ± 0.9
3.C	Interior	-3	Treseses	7.9 ± 1.1
3.D	Interior	-3	Zipdar	6.6 ± 0.8

Tabla 6. C_{Rn} medida con detectores de Makrofol durante 4 días de mayo 2011 en la mina-museo.

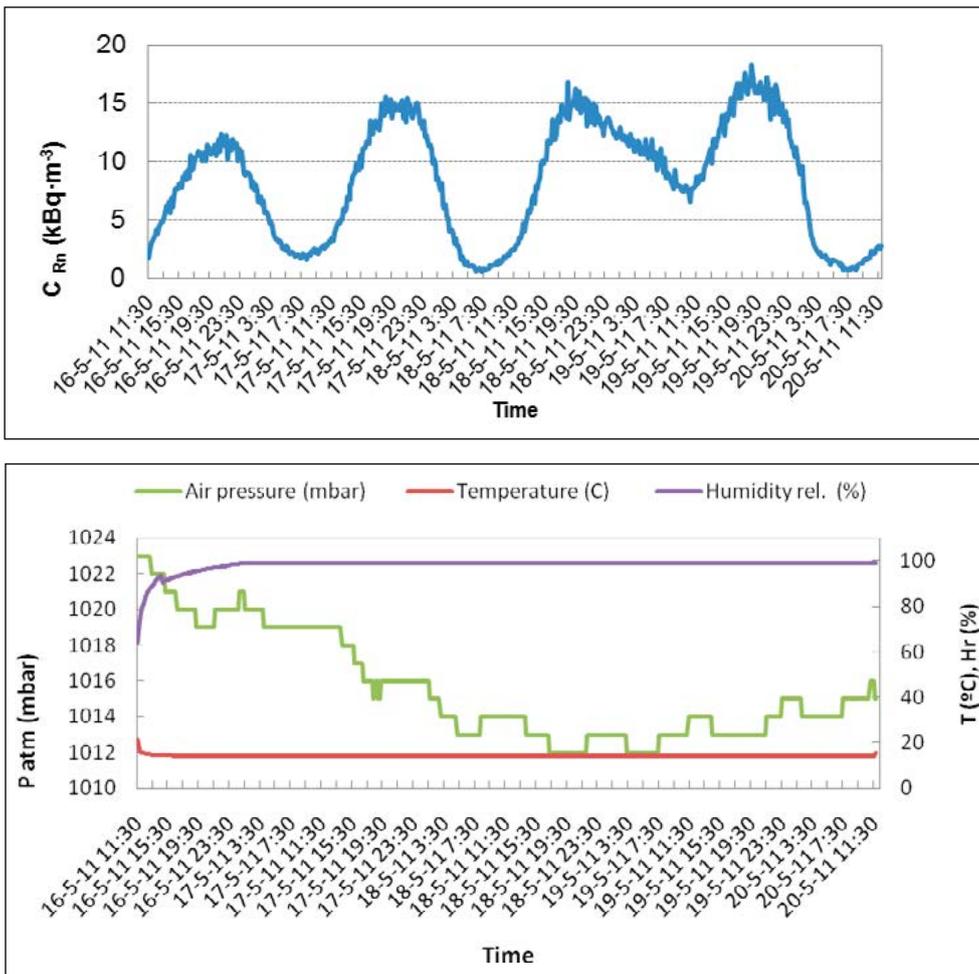


Figura 11. C_{Rn} (arriba) y parámetros ambientales (abajo) medidos con el monitor AlphaGUARD durante 4 días de mayo 2011 en el interior de la mina-museo.

Parámetro	Valor medio	Intervalo de valores
Concentración de radón (kBq·m ⁻³)	8.4 ± 0.3	0.6 – 18.3
Temperatura (°C)	14.2 ± 0.1	14.1 – 21.3
Humedad relativa (%)	98.1 ± 0.5	64.0 – 99.0
Presión atmosférica (mbar)	1016 ± 1	1013 – 1023

Tabla 7. Valores medios e intervalos de valores de los parámetros medidos con el AlphaGUARD.

Los resultados obtenidos con el detector activo indicaban que había una importante variación noche-día de la concentración de radón, observándose máximos alrededor de las 19:30 h y mínimos alrededor de las 7:30 h. Además, la humedad y la temperatura se mantuvieron prácticamente constantes a lo largo de toda la exposición y se observó un leve aumento de la concentración de radón cuando la presión atmosférica disminuía.

Los valores medios de la concentración de radón obtenidos con los detectores pasivos y el monitor activo en el nivel -3 del interior de la mina coincidieron, teniendo en cuenta la incertidumbre de las medidas.

III.1.2. Balnearios

Los dos balnearios analizados se encuentran en zonas geológicas muy distintas de la geografía española. Por motivos de confidencialidad no se mencionan los nombres ni se describen las características de la zona que pueden favorecer su identificación.

III.1.2.1. Balneario de dimensiones reducidas

El balneario dispone de bañeras de hidromasaje, duchas, salas de masajes, piscina, jacuzzi y sauna. En la mayoría de salas se utiliza agua termal que procede directamente del manantial mientras que el agua de la piscina y del jacuzzi tiene un ciclo de renovación de dos días.

Las aguas subterráneas de la zona presentan unas concentraciones elevadas de radón (hasta $345 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$), así que este balneario es un claro ejemplo donde deben realizarse medidas de la concentración de radón en el ambiente, para determinar si los trabajadores pueden estar expuestos a unos niveles superiores a los de referencia. También se llevó a cabo un estudio geofísico para determinar los factores que influían en los niveles de radón en estas aguas. Con este objetivo se realizaron distintas medidas de la concentración de radón, tanto en las mismas aguas como en el terreno, a lo largo de un perfil que discurre por el fondo del valle y que es perpendicular a un par de fallas importantes. Las medidas se llevaron a cabo en dos campañas de medida: la primera realizada durante la primavera de 2010 y la siguiente en septiembre del mismo año.

La concentración de radón de las aguas de 9 fuentes o manantiales se midió mediante el monitor RAD7 y el accesorio RAD H₂O. Simultáneamente, mediante un conductímetro también se midieron la temperatura y la conductividad de dichas aguas. Por otro lado, las medidas de la concentración de radón y torón, la temperatura y la humedad a 70 cm de profundidad de 23 puntos del suelo se realizó mediante el monitor AlphaGUARD y sus accesorios.

Los resultados obtenidos de los distintos parámetros analizados se presentan en la tabla 8 y los resultados de las medidas realizadas en el perfil del suelo se presentan en la figura 12. Se observa una mayor variación de la concentración de radón en el agua que en el suelo.

Medio	Parámetro	1ª campaña
Aguas	C (^{222}Rn) ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.6 - 345
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	6 - 36
	Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	65 - 357
Suelo	C (^{222}Rn) ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	6 - 76
	C (^{220}Rn) ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 - 65
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	12.3 - 31.3
	Humedad (%)	44 - 88

Tabla 8. Medidas realizadas en los alrededores del pequeño balneario.

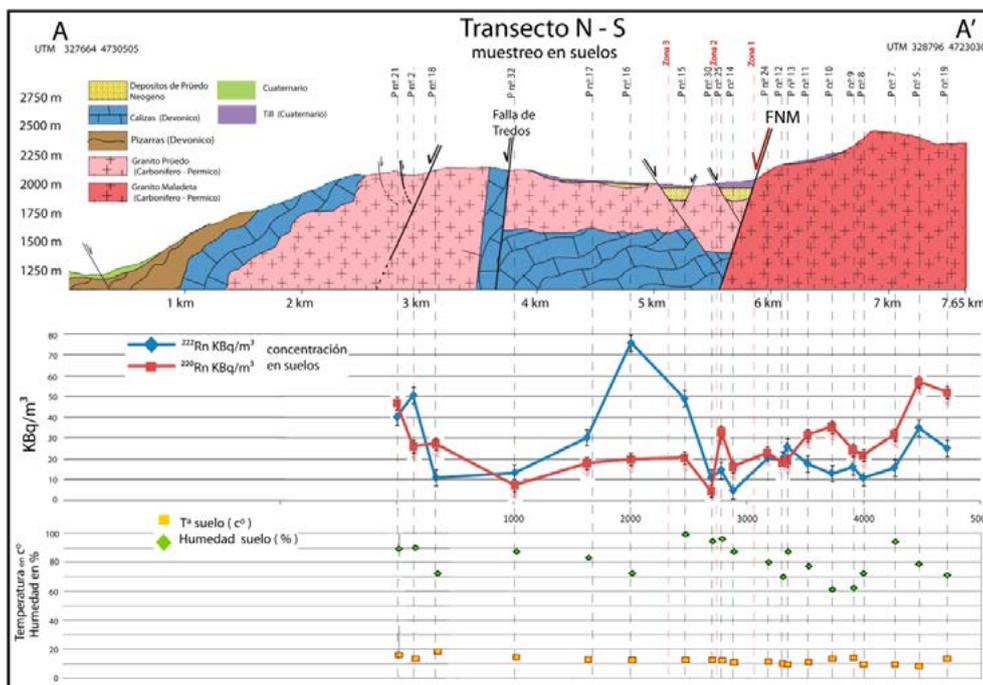


Figura 12. Valores de la concentración de ^{222}Rn y de ^{220}Rn , temperatura y humedad del terreno, a 70 cm de profundidad.

En relación a las medidas en el interior del balneario, se realizaron medidas en tres campañas distintas: (i) en septiembre de 2010, (ii) en abril de 2011, (iii) en junio y (iv) en septiembre del mismo año (Moreno et al., 2015).

La primera campaña consistió en una medida de la concentración de radón del aire interior de una sala húmeda del balneario. En esta sala el cliente recibe un tratamiento de agua caliente ($38\text{ }^{\circ}\text{C}$) procedente de unas duchas durante unos 30 minutos y luego recibe una sesión de masajes. Mientras los grifos de agua están abiertos el ambiente de la sala se calienta y se llena de vapor de agua, lo que supone unas condiciones ambientales extremas para la medida del gas radón de for-

ma permanente. La medida se realizó simultáneamente con los detectores activos ATMOS y RAD7 y la toma de aire de los dos detectores se colocó en un mismo punto de la sala. En la figura 13 se presentan los primeros resultados de las medidas en continuo de los dos detectores y se comprueba que los resultados coinciden. Si no se tienen en cuenta las incertidumbres de las medidas puede parecer que existe una cierta diferencia entre los niveles de radón medidos por los dos equipos pero hay que tener en cuenta que cuanto menor es el tiempo de integración (en el caso del ATMOS 10 minutos y 15 minutos para el RAD7), mayor es la incertidumbre de las distintas medidas.

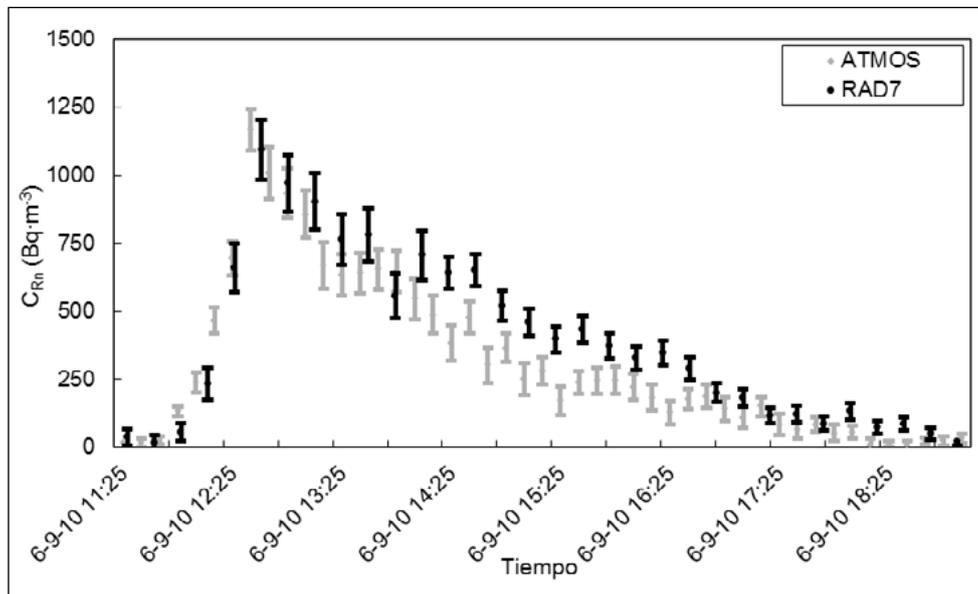


Figura 13. Variación de la C_{Rn} en una sala de tratamiento en septiembre 2010. En los primeros 30 min no salía agua, a continuación se abrieron los grifos durante 30 min.

La segunda campaña se llevó a cabo entre los días 28 y 29 de abril de 2011 y se midió la concentración de radón en cuatro salas distintas del balneario con detectores activos. También se recogieron muestras de agua termal en dos salas de tratamiento distintas para determinar la concentración de radón disuelto en el agua. En la tabla 9 se muestran las principales características de las cuatro salas analizadas, los valores medios de la concentración de radón en el aire y los detectores que se utilizaron. En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de la concentración de radón en las muestras de agua. En la figura 14 se muestra la variación de la concentración de radón de la sala 2, medida durante 25 horas mediante el monitor ATMOS.

Sala	Descripción	Concentración ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Tiempo medida (h)	Detector activo
1	Masajes	198 ± 15	1	RAD7
2	Ducha	692 ± 43	25	ATMOS
3	Bañera hidromasaje	735 ± 54	5	RAD7
4	Piscina, sauna y jacuzzi	41 ± 6	2	RAD7

Tabla 9. Valores de la concentración media de radón en el aire de las salas del balneario.

En la sala 1, donde se realizan masajes y hay una ducha que no estuvo abierta durante la hora que duró la medida, el valor de la C_{Rn} obtenido fue un valor inferior promedio. En la sala 4, donde hay una piscina, un jacuzzi y una sauna, la duración de la medida fue de 2 horas. y en el momento de realizar la medida, el agua termal de la piscina y el jacuzzi hacía un par de días que se estaba aireando. La ventilación de esta sala es mayor que la del resto del balneario, debido a que la estructura de plástico que cubre esta sala tiene aberturas por la parte inferior, que favorecen la circulación del aire exterior. Todo esto puede explicar que la concentración de radón medida en el aire de su interior fuera tan baja. Haría falta realizar una medida en un momento en que el agua acabase de ser renovada para comprobar si existe un incremento significativo de dicha concentración.

Sala	Lugar de muestreo	Concentración ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$)
2	Ducha	26 ± 2
3	Bañera	75 ± 4

Tabla 10. Valores de la concentración de radón en las aguas utilizadas en dos salas del balneario.

La concentración de radón de la sala 2 alcanzó los $1600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ después de que se utilizara la ducha en dos tratamientos de 30 minutos, separados por un intervalo de tiempo de más de dos horas. (Las barras verticales de la figura 14 indican cuando la ducha estaba en funcionamiento). Esta es la misma sala donde se hicieron las primeras medidas en continuo en septiembre de 2010, obteniendo un pico de $1200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ después de abrir la ducha durante 30 minutos. En esta ocasión los valores de la concentración de radón posteriores a los tratamientos, se mantuvieron oscilando alrededor de los $800 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ mientras se mantuvo la sala sin ventilar. En cambio, cuando la puerta se abrió la concentración de radón ya disminuyó por debajo de los $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

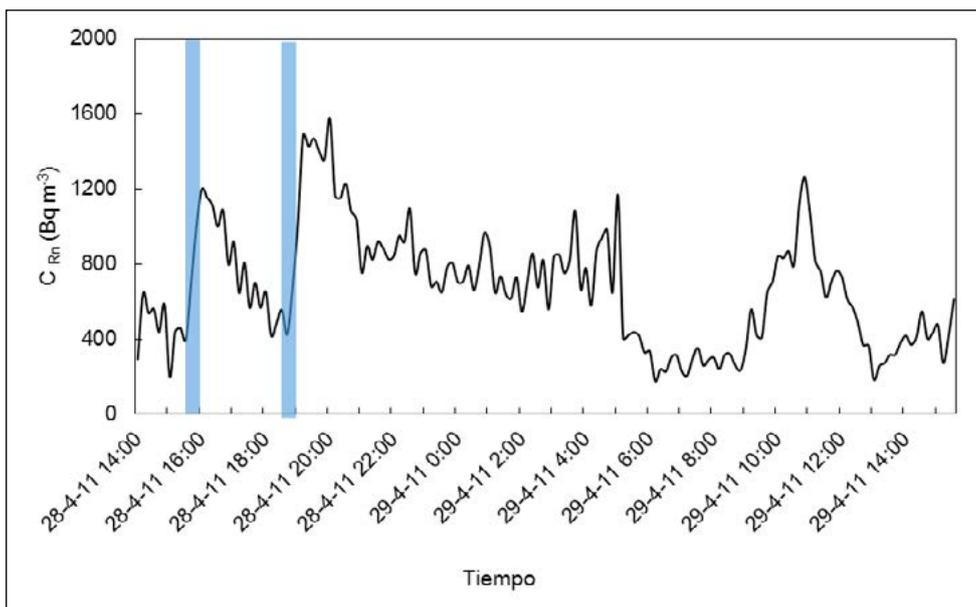


Figura 14. Variación de la concentración de radón en la sala 2 entre los días 28 y 29 de abril de 2011. Las barras verticales indican cuando la ducha estaba en funcionamiento.

En la sala 3, donde hay una bañera de hidromasaje, se midió en continuo la concentración de radón durante 5 horas mediante un monitor RAD7 (figura 15). El valor inicial de la concentración de radón en esta sala ya era de unos $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ antes de empezar a llenar la bañera. En el momento de poner en marcha el sistema de burbujeo y durante todo el tiempo que estuvo funcionando (dos horas), se observó un aumento del nivel de radón, llegando a alcanzar los $1100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Con el sistema de burbujeo cerrado la concentración de radón disminuyó hasta recuperar el valor inicial de $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

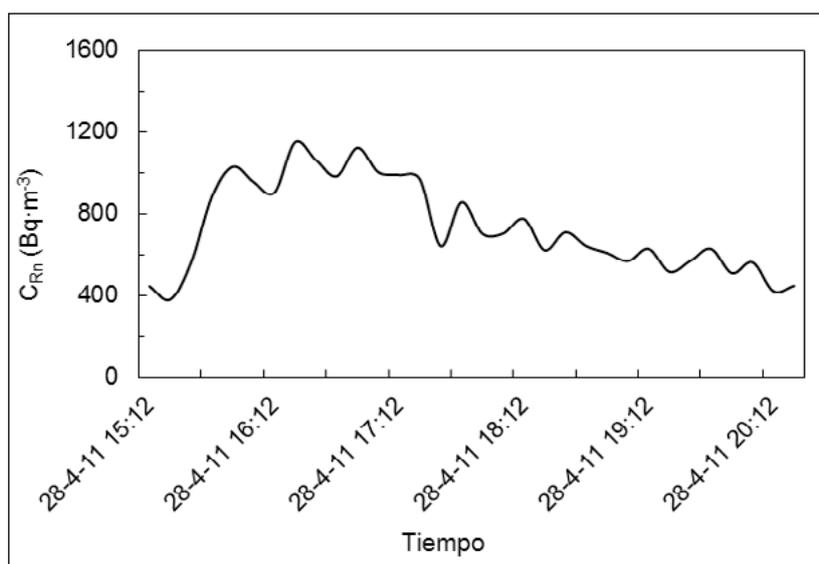


Figura 15. Variación de la concentración de radón en la sala 3 durante 5 horas. Los primeros 30 minutos no se utiliza agua en la sala. A continuación se llena la bañera y durante las dos siguientes horas se producen burbujas. El resto de tiempo el sistema de burbujeo permanece cerrado.

La tercera campaña se realizó durante la primera quincena de junio de 2011, justo cuando el balneario volvía a abrir las puertas al público para la temporada de verano, y consistió en la instalación de 12 detectores pasivos de Makrofol en tres salas distintas. En cada sala se instalaron las 4 configuraciones de detectores, sin bolsa (A) y con bolsas de polietileno Tyvek (B), Treseses (C) y Zipdar (D), con el fin de comprobar el efecto de la humedad sobre la respuesta del Makrofol, así como la influencia de la bolsa de polietileno.

La cuarta y última campaña de medida tuvo lugar durante los días 28 y 29 de septiembre de 2011, momento en que se volvieron a hacer medidas en continuo de la C_{Rn} en las salas 2, 3 y 4. Además, se midió por primera vez en la sala 6, que es la recepción del establecimiento. Esta última sala es un lugar próximo a las salas de tratamiento interiores, donde los trabajadores pasan un tiempo significativo. En todos los casos, se alargaron los tiempos de medida de la C_{Rn} hasta completar 24 horas y mediante la estación meteorológica se realizaron medidas de la temperatura y de la humedad relativa en alguna sala. Los valores medios de la concentración de radón obtenidos en las salas del balneario medidas con el detector de Makrofol (4 meses de verano) y en continuo (24 horas en septiembre) con detectores activos se presentan en la tabla 11 (Moreno et al., 2015).

Cabe destacar que en las salas 2 y 3 los valores medios de la C_{Rn} medidos en continuo fueron aproximadamente de unos $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Además, el valor de la C_{Rn} en la sala 2 medido en continuo con el monitor RAD7 presentó un nivel de radón un factor 2.6 más elevado que el obtenido con la medida integrada durante 4 meses. Para explicar este resultado, se ha tenido en cuenta que esta sala no tiene el mismo uso a lo largo de todos los días que el establecimiento está abierto. Concretamente, durante la medida en continuo de 24 horas de duración se realizaron dos tratamientos (líneas verticales en la figura 16), uno por la mañana y el otro por la tarde. Al terminar cada sesión se dejó la puerta abierta para que se ventilase la sala, pero hay que señalar que el intercambio de aire no se realiza con el exterior sino con el aire del interior del resto del establecimiento.

Al iniciar el segundo tratamiento los valores de la C_{Rn} llegaron a alcanzar los $1660 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, debido a que el valor de partida también era más elevado que en la primera medida, y luego fué disminuyendo progresivamente hasta los $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. En dicha figura 16, también se presenta la evolución de la humedad y la temperatura durante el tiempo de medida. La humedad relativa alcanzó el 90 % y tardó toda la noche en bajar a valores entre el 50 % y el 60 %. La temperatura permaneció constante alrededor de los $22 \text{ }^\circ\text{C}$, a excepción de la hora posterior a cada tratamiento en que llegó a los $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sala	Descripción	C_{Rn} (Bq·m ⁻³) (4 meses)	C_{Rn} (Bq·m ⁻³) (24 h)	T (°C) (24 h)	Hr (%) (24 h)
2	Ducha	222 ± 16	623 ± 65	22 ± 1	77 ± 2
3	Bañera hidromasaje	-	608 ± 41	21 ± 1	65 ± 1
4	Piscina, sauna y jacuzzi	101 ± 15	125 ± 8	-	-
5	Cocina	89 ± 10	-	-	-
6	Recepción	-	128 ± 11	-	-

Tabla 11. Valores medios de la C_{Rn} en el aire de las salas del balneario obtenidos con detectores de Makrofol (4 meses de verano) y con detectores activos (24 horas). También se dan valores medios de la temperatura (T) y humedad relativa (Hr) en el aire de medidas durante 24 h.

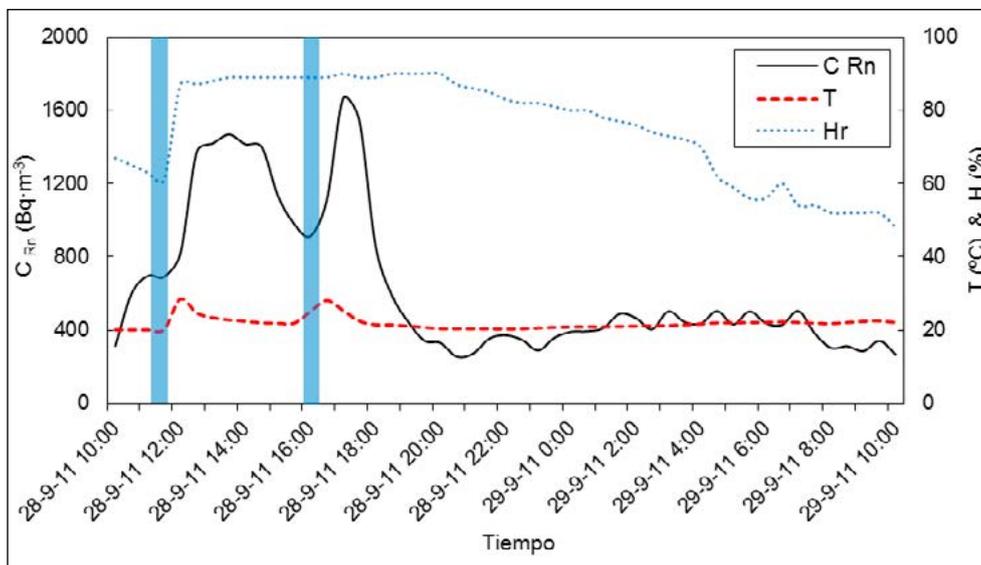


Figura 16. Evolución temporal de la C_{Rn} temperatura (T) y humedad relativa (Hr) en el aire de la sala 2 medida con el monitor RAD7 y la estación meteorológica en septiembre 2011. Las líneas verticales indican la duración de los tratamientos.

En la sala 3 se llenó la bañera de hidromasaje, se dejó que el burbujeo funcionase durante 1.5 h (barra vertical), a continuación la puerta permaneció cerrada durante 2 h y posteriormente se abrió para que se ventilase. La medida en continuo mostró que los valores de la C_{Rn} fueron aumentando hasta llegar a unos 1.000 Bq·m⁻³ y cuando la puerta se abría disminuía hasta unos 550 Bq·m⁻³ (figura 17). La humedad relativa llegó al 86 %, pero al cabo de unas 3 horas volvía a estar alrededor del 60 % que era el valor que tenía al inicio. La temperatura permaneció prácticamente constante alrededor de los 21 °C durante todo el día.

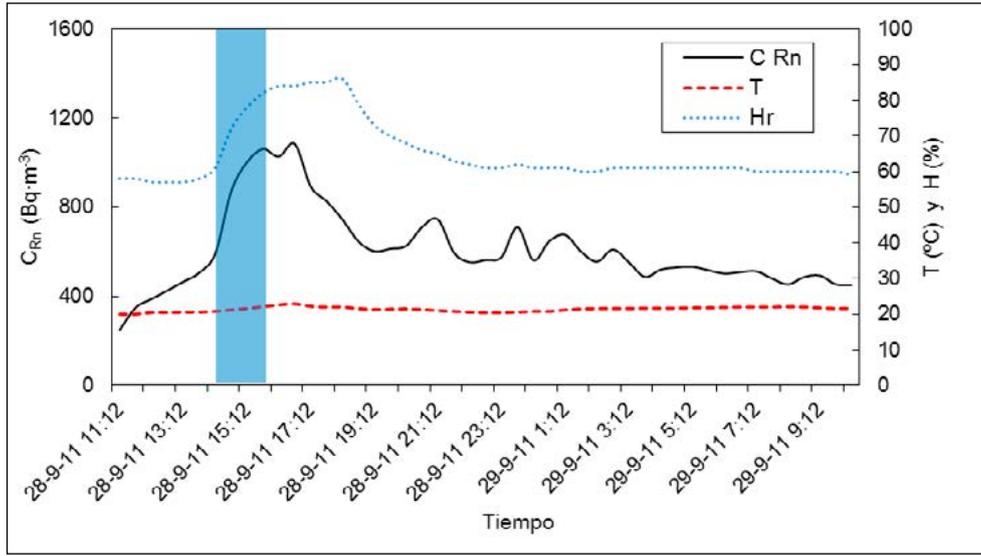


Figura 17. Evolución temporal de la C_{Rn} , temperatura (T) y humedad relativa (Hr) en el aire de la sala 3 medida con el monitor RAD7 y la estación meteorológica en septiembre de 2011. La barra vertical indica el tiempo que dura el burbujeo en la bañera. Después, la puerta estuvo cerrada durante 2 horas.

En la sala 4 los valores de la C_{Rn} fluctuaron entre $60 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ y $224 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (figura 18). Los picos que se observan pudieron ser debidos a usos puntuales del jacuzzi por parte de los clientes del establecimiento durante el periodo de medida, pero en esta sala no se pudo controlar en qué momentos tuvieron lugar dichos usos.

Finalmente, en la recepción del establecimiento (sala 6), la C_{Rn} experimentó picos que superaron los $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, y que podrían estar relacionados con el intercambio de aire entre las salas y la recepción a través del pasillo que las une (figura 19).

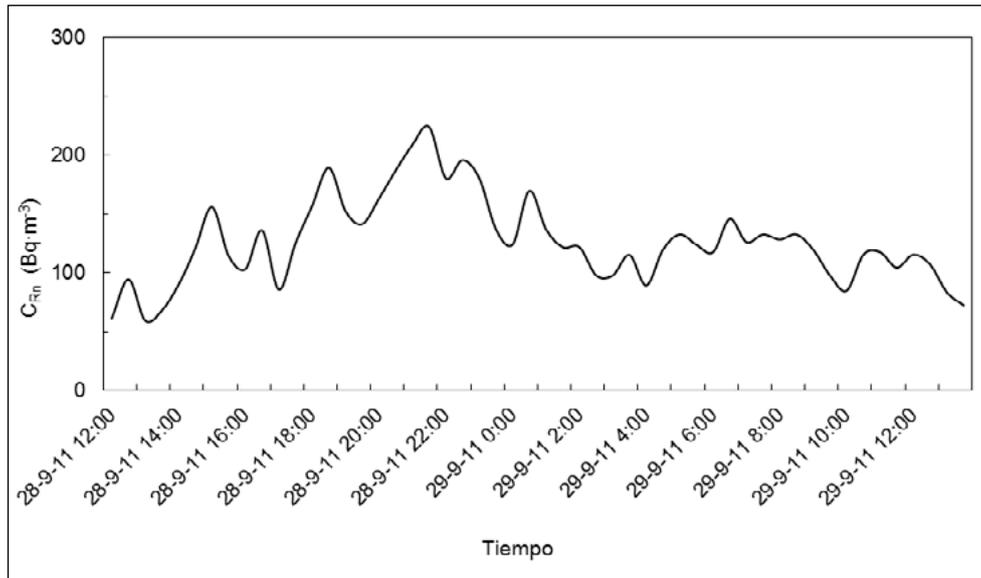


Figura 18. Evolución temporal de la C_{Rn} en la sala 4, medido con el RAD7 en septiembre 2011.

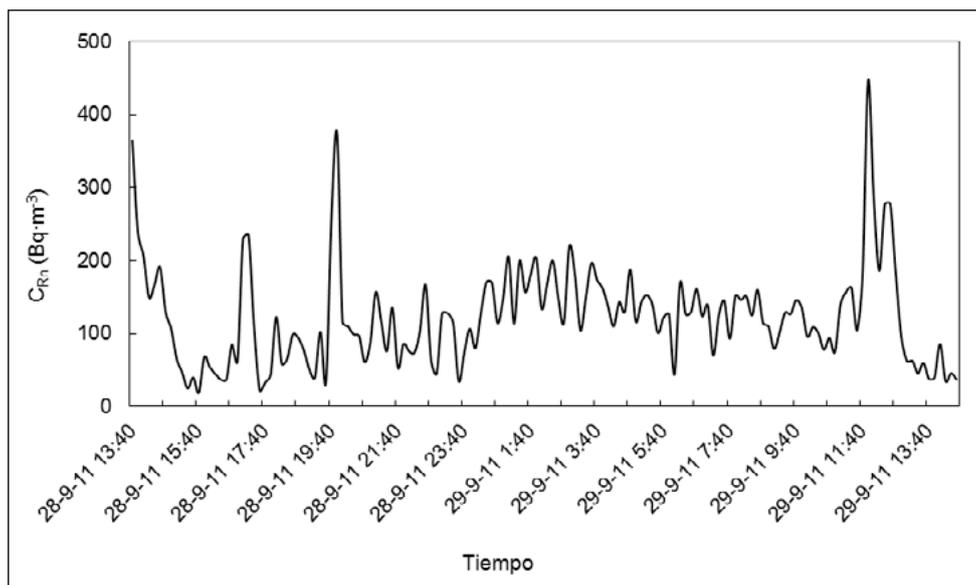


Figura 19. Evolución temporal de la C_{Rn} en el aire de la recepción del balneario medida con el monitor ATMOS entre los días 28 y 29 de abril de 2011.

Como conclusión se puede decir que el origen de los altos valores de la concentración de radón en el aire registrados en las salas de tratamiento de este balneario, fue claramente debido al radón disuelto en las aguas termales utilizadas y que los valores encontrados en puntos donde no se realiza ningún tratamiento fueron debidos al intercambio de aire entre las distintas salas.

III.1.2.2. Balneario de grandes dimensiones

Este balneario también está situado cerca de una falla y las aguas que utiliza emergen con un caudal que oscila entre los 30 y los 50 $L \cdot s^{-1}$ y una temperatura constante de 44 °C. La concentración de radón de dichas aguas está alrededor de los 100 $kBq \cdot m^{-3}$.

Las salas de tratamiento del balneario son: vaporario, baño termal, ducha circular y de chorro, masaje termal y Spa romano. Los tratamientos termales se llevan a cabo por la mañana y el Spa se utiliza por la tarde.

En el interior de estas salas se realizaron medidas puntuales, en continuo e integradas de la concentración de radón en el aire y también se recogieron muestras de 250 mL de agua termal para determinar la concentración de radón disuelto en el agua.

Las medidas puntuales y en continuo se realizaron entre los días 22 y 23 de junio de 2011 mediante los detectores activos indicados en la tabla 12.

Número de detectores	Tipo de detector	Modelo del detector
1	Activo	ATMOS 12 PDX
1	Activo	AlphaGUARD PQ2000 PRO
3	Activo	RAD7

Tabla 12. Detectores activos de radón utilizados para las medidas en el balneario.

Con el detector AlphaGUARD se determinó el nivel de radón en diversos puntos del balneario: (i) Vaporario: medidas puntuales de 30 minutos por la mañana, mientras estaba en funcionamiento, y por la tarde, una vez ventilado; (ii) galería de acceso al Spa romano: medida puntual de 1,5 h por la tarde, cuando éste se estaba usando, (iii) sala de masaje termal: medida de 3 h cuando no se estaba utilizando. Los tres detectores RAD7 se instalaron en un baño termal (figura 20), en una ducha con masaje termal (figura 21) y en una ducha de chorro (figura 22) y estuvieron registrando la concentración de radón durante 20,5 horas los dos primeros y 19,5 horas el último. El monitor ATMOS midió el nivel de radón durante 21 horas en el Spa romano (figura 23).

Para poder determinar los niveles de la concentración media anual de radón en el aire, se instalaron un total de 22 detectores pasivos de Makrofol, con la configuración D de bolsa de polietileno, en las siguientes salas del balneario: Sala de espera, Galerías de acceso, Baños termales, Duchas circulares y de chorro, Duchas cervicales y lumbares, Masajes termales, Vaporarios, Spa romano, Manantial Viejo y Despacho de dirección.

Los detectores estuvieron expuestos 4 meses, desde junio a octubre de 2011, excepto en las dos salas con las concentraciones más elevadas. A partir de los resultados de las medidas puntuales con los detectores activos, se hizo una estimación del tiempo de exposición de los detectores pasivos en estas salas, cuyos detectores fueron retirados al cabo de pocos días de exposición. Antes de terminar el periodo de medida de 4 meses se volvieron a medir estas salas con nuevos detectores pasivos, expuestos durante un periodo inferior a los 30 días.

La concentración de radón medida de forma continua en el aire del interior del balneario permitió determinar que las aguas termales eran la principal fuente de radón en las salas de tratamiento del balneario. En efecto, en las cuatro salas se obtuvieron los valores máximos de la concentración de radón cuando se estaban realizando los tratamientos (figuras 20, 21, 22, 23).

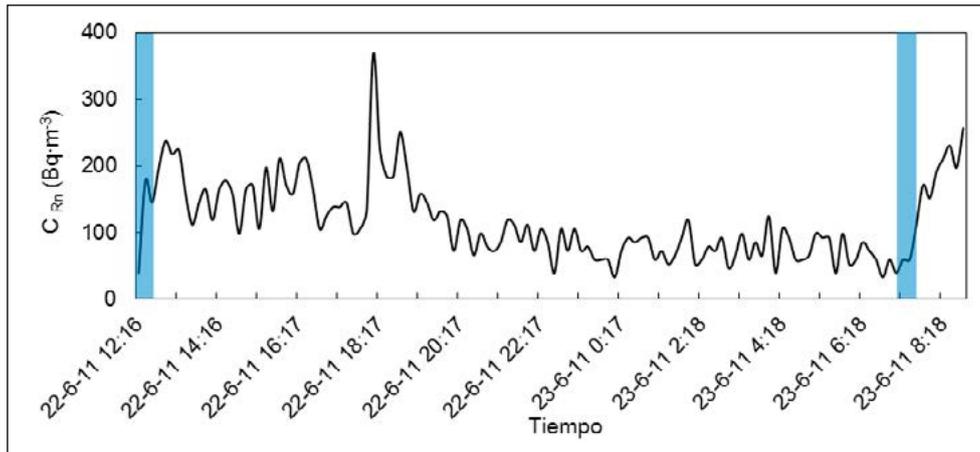


Figura 20.
Concentración de radón medida en un baño termal con un monitor RAD7. Las líneas verticales indican la duración de los tratamientos.

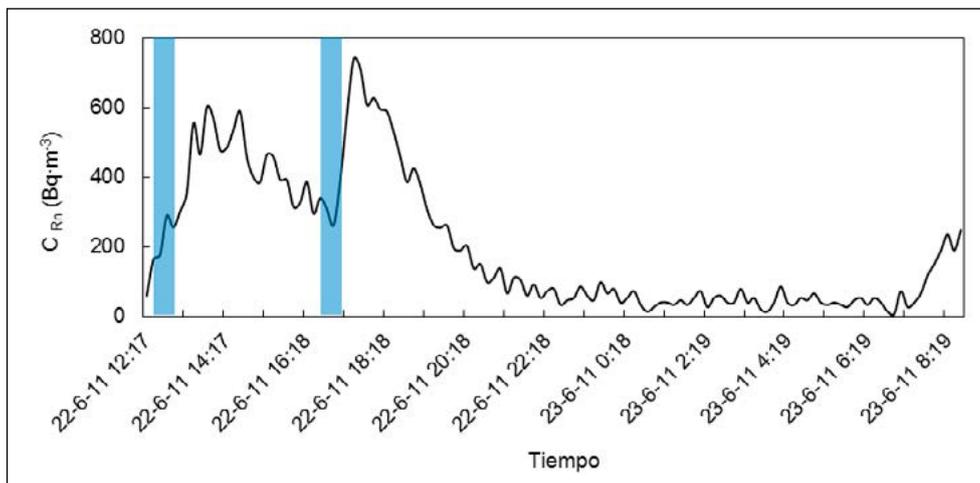


Figura 21.
Concentración de radón medida en una ducha de masaje termal con un monitor RAD7. Las líneas verticales indican la duración de los tratamientos.

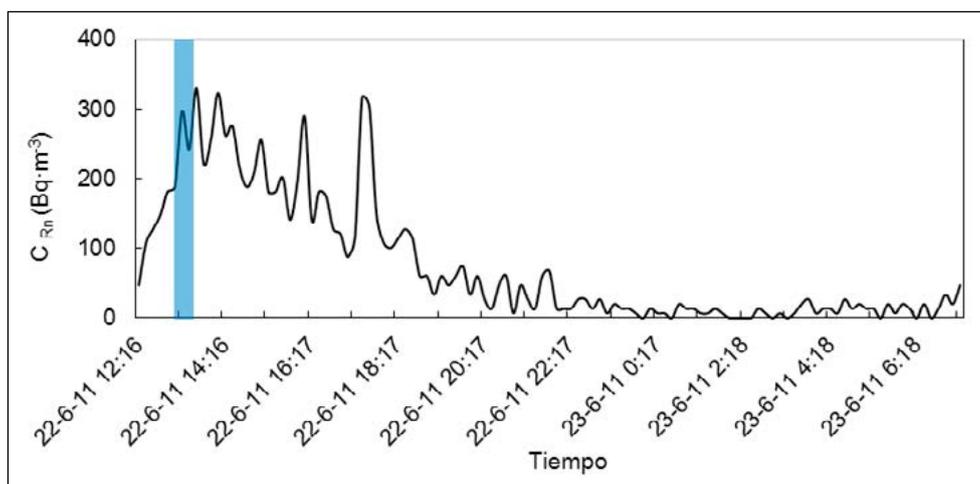


Figura 22.
Concentración de radón medida en una ducha de chorro con un monitor RAD7.

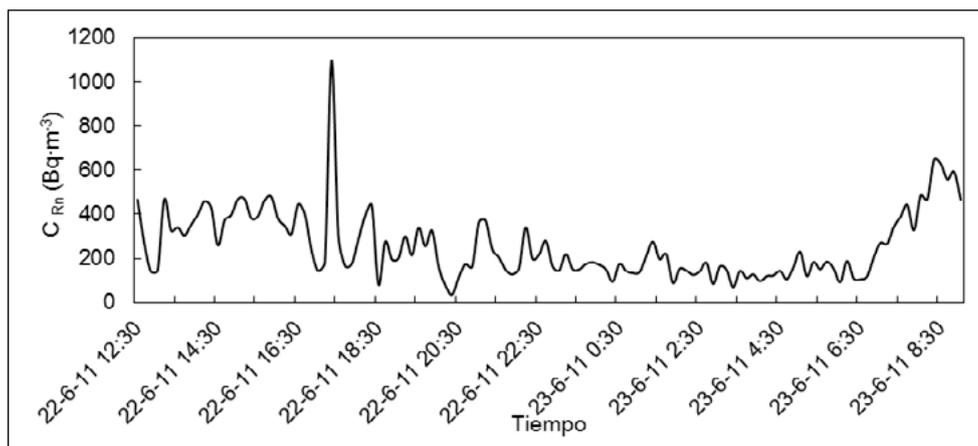


Figura 23.
Concentración de radón medida en el Spa romano con el monitor ATMOS.

Los promedios de las medidas en continuo, realizadas en el baño, ducha y Spa entre los días 22 y 23 de junio de 2011, no superaron los 400 Bq/m³ (tabla 13). Sin embargo, hay que mencionar que en dos de estas salas los valores máximos obtenidos superaron este nivel. La concentración más elevada se obtuvo en el vaporario en funcionamiento, aunque debido al alto grado de humedad no se pudo medir durante un periodo suficientemente largo como para que la lectura se estabilizara.

Concentración de radón en aire entre los días 22 y 23 de junio de 2011						
Sala	Medida continuo (Bq·m ⁻³)			Medida puntual (Bq·m ⁻³)	Duración medida (h)	Detector
	Promedio	Mín	Máx			
Masaje termal	201	7	738		20,5	RAD7
Ducha de chorro	78	7	331		19,5	RAD7
Baño termal	113	33	369		20,5	RAD7
Spa romano – Piscinas	257	36	1096		21	ATMOS
Spa romano – Duchas				70 ± 8	1,5	AlphaGUARD
Vaporario (en uso)				(7.1 ± 0.5)·10 ³	0,5	AlphaGUARD
Vaporario (ventilado)				42 ± 7	0,5	AlphaGUARD
Masaje termal (sin uso)				110 ± 15	3,0	AlphaGUARD

Tabla 13.
Concentración de radón en el aire del balneario.

Los resultados de la concentración de radón en el agua de los manantiales (tabla 14) concuerdan con las medidas realizadas anteriormente en esta surgencia. Las concentraciones en el agua de los baños termales y de las piscinas del Spa romano son significativamente inferiores a la de la fuente debido a que se utilizan mezcladas con agua que ha sido previamente enfriada en unos depósitos, donde se desintegra parte del radón disuelto en ella. La temperatura del agua de tratamiento es de unos 36 °C, para que los pacientes puedan soportarla.

Punto de muestreo	Fecha y hora de muestreo	Medida puntual (kBq·m ⁻³)
Manantial Escobar	23/6/2011 11:00	128 ± 7
Manantial Viejo	22/6/2011 20:40	82 ± 4
Termas – Baño termal	23/6/2011 9:20	29 ± 2
Spa romano – Cuello de cisne	23/6/2011 9:20	11 ± 1

Tabla 14. Medida de la concentración de radón en las aguas termales del balneario.

Los promedios de la C_{Rn} obtenidos en el aire de 22 dependencias distintas del balneario medidos con detectores de Makrofol fueron inferiores a 600 Bq·m⁻³, nivel de referencia del (CSN-IS-33), en las salas donde están las duchas y baños termales, únicamente se superó este valor en el vaporario y en los manantiales de agua (tabla 15), con valores superiores a los 1000 Bq·m⁻³. En estas salas las condiciones ambientales fueron realmente extremas para la medida, con temperaturas ambientes que superan los 40 °C y humedades relativas del 95%, y fue especialmente con estas exposiciones cuando se pudo comprobar la eficacia de la configuración D para este tipo de medidas.

Sala	C_{Rn} (Bq·m ⁻³)	Tiempo de medida
Vaporario (en uso)	$(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^3$	11 días (junio)
	$(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^3$	21 días (set.- oct.)
Manantial Viejo	$(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^3$	11 días (junio)
	$(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^3$	21 días (set.- oct.)
Manantial Escobar	824 ± 124	21 días (set.- oct.)
Galería al manantial Viejo	171 ± 78	11 días (junio)
	101 ± 44	21 días (set.- oct.)
Galería al manantial Escobar	61 ± 73	21 días (set.- oct.)
Despacho de dirección	577 ± 60	4 meses
Sala de espera termas	36 ± 14	4 meses
Galería principal termas 1	140 ± 22	4 meses
Galería principal termas 2	73 ± 17	4 meses
Masaje termal 1	115 ± 20	4 meses
Masaje termal 2	67 ± 16	4 meses
Ducha cervical 1	135 ± 21	4 meses
Ducha cervical 2	141 ± 22	4 meses
Baño termal pequeño	113 ± 20	4 meses
Baño termal grande	90 ± 18	4 meses
Ducha circular y de chorro 1	130 ± 21	4 meses
Ducha circular y de chorro 2	140 ± 22	4 meses
Galería termas	116 ± 20	4 meses
Vaporario (ventilado)	140 ± 22	4 meses
Spa – Duchas	132 ± 21	4 meses
Spa – Piscinas 1	248 ± 31	4 meses
Spa – Piscinas 2	224 ± 29	4 meses

Tabla 15. Valores medios de la C_{Rn} en el aire de 22 dependencias distintas del balneario medidos con detectores de Makrofol expuestos entre los meses de junio a octubre de 2011.

III.2. MEDIDAS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AMBIENTES CON ALTO CONTENIDO DE AEROSOLES.

En julio de 2011 se inició una campaña de medida de la concentración de radón dentro de la fábrica de fosfato bicálcico que tiene ERCROS en Flix. En la figura 24 se muestra un mapa de las dependencias de esta planta. En ella se identificó la zona de descarga y almacenamiento de la roca fosfórica como lugar con concentraciones de entre $200 - 300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. En este lugar y en otras zonas de la empresa se instalaron diversos detectores pasivos de Makrofol con las 3 configuraciones distintas de bolsa de polietileno junto con otros detectores sin bolsa para ver la influencia de la concentración de partículas en el aire sobre la respuesta de éstos (Moreno et al, 2015).

Las medidas de radón en el aire se realizaron con: dos detectores activos (RAD7 y AlphaGUARD) y con el detector pasivo de trazas nucleares Makrofol.

Las medidas de los detectores activos se realizaron en dos períodos distintos de 2011: entre los días 18 y 19 de julio y entre los días 8 y 9 de noviembre. Las medidas fueron principalmente puntuales (de alrededor de los 60 minutos) y algunas en continuo (entre 3 y 18 horas de duración). Los detectores pasivos permitieron realizar medidas integradas durante los 4 meses que separan estos dos períodos.

Se seleccionaron un total de 31 puntos de medida, situados en el interior y el exterior de toda la instalación (figura 25). En 15 puntos se realizaron medidas integradas mediante un detector pasivo (tabla 16 y figura 26) y en todos ellos se realizó una medida puntual mediante un detector activo (tabla 17 y figura 27). En los puntos de medida P11, P12, P13, P14 y P15, donde las condiciones ambientales eran más extremas debido a las altas temperaturas, elevada concentración de polvo y presencia de ácidos, se realizaron medidas integradas con la configuración estándar del detector de Makrofol (A) y las tres configuraciones de membrana de polietileno (B, C y D) para comparar la eficacia en la protección de este detector pasivo (figura 28 y figura 29).

Código punto medida	Descripción lugar de trabajo
P1	Laboratorio (1ª planta)
P2	Sala de control (1ª planta)
P3	Debajo Dorr-1
P4	Debajo Dorr-3
P5	Debajo Dorr-4
P6	Zona precipitación producto
P7	Debajo Dorr-20
P8	Zona carga camiones
P9	Zona hornos
P10	Zona reactores (2ª planta)
P11	Debajo zona descarga fosfatos (sótano)
P12	Zona secado (1ª planta)
P13	Zona empaquetado
P14	Almacén fosfatos
P15	Zona reactores (3ª planta)

*Tabla 16.
Lugares de trabajo
seleccionados para
instalar los detectores
pasivos.*

Figura 24. Plano de las instalaciones de Erkinia.

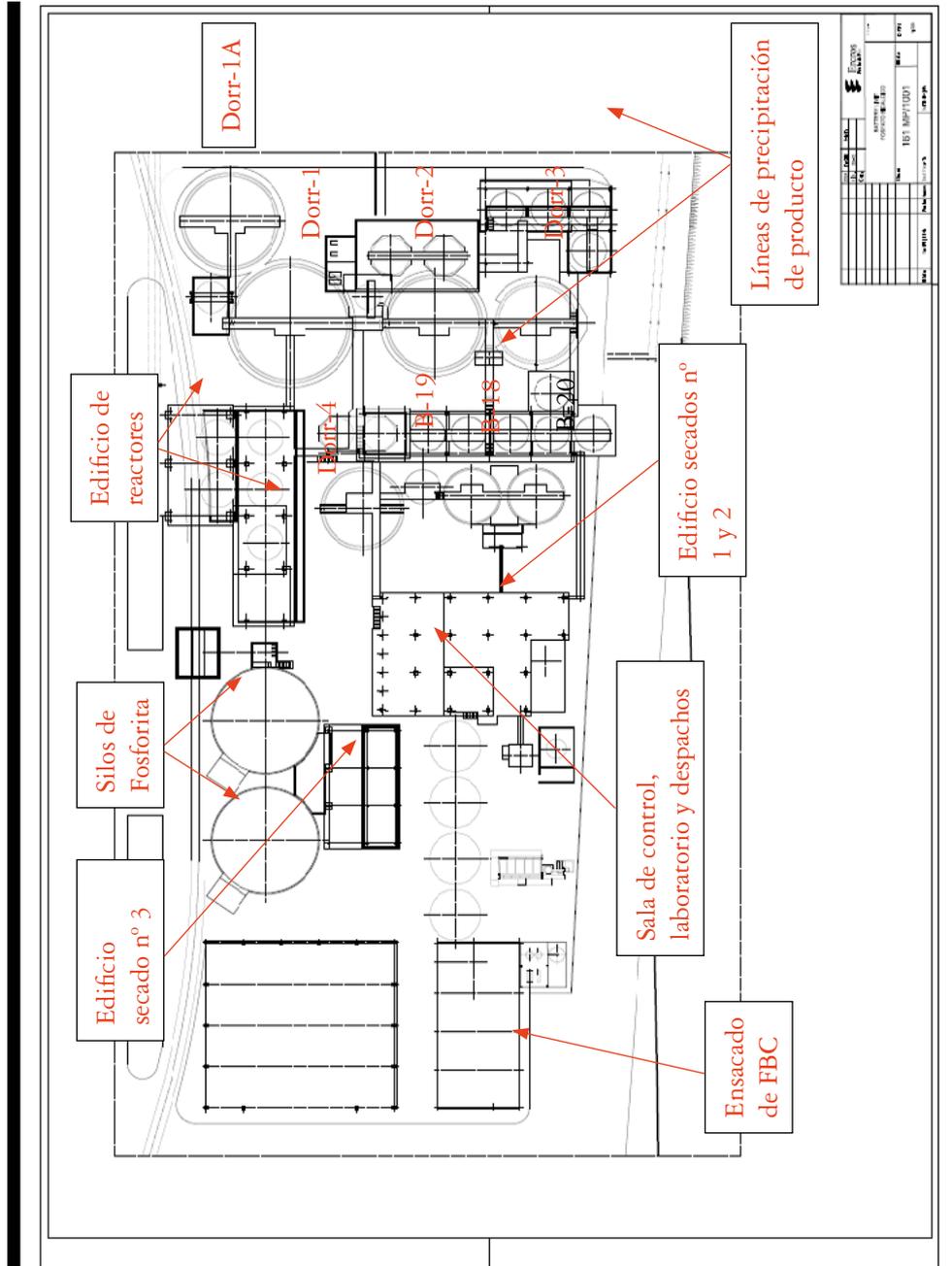


Figura 25. Plano con la distribución de los puntos de medida de la concentración de radón con detectores pasivos (P#) y activos (A#).

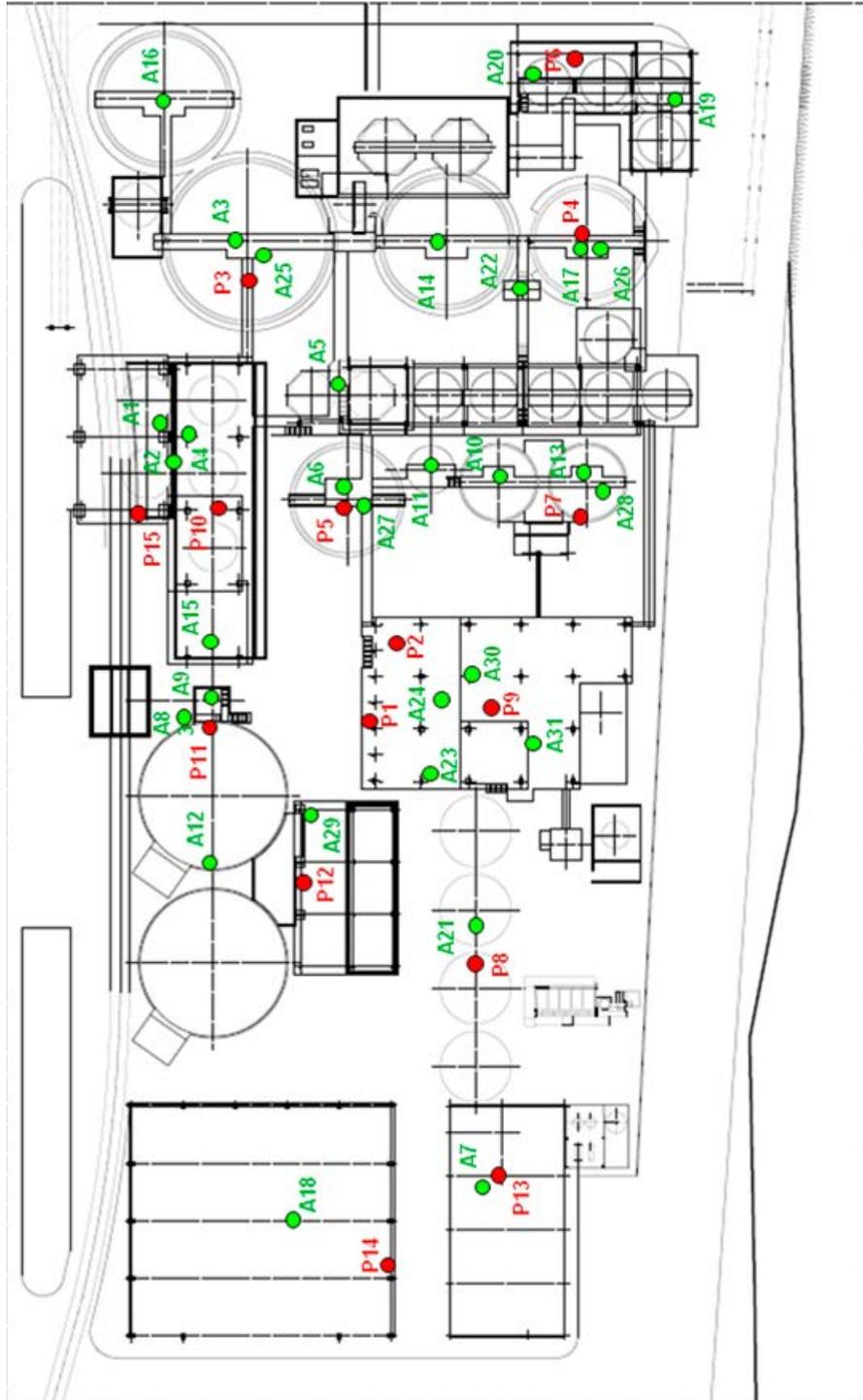




Figura 26. Detectores de Makrofol expuestos en dos lugares de trabajo interiores (P1, imagen izquierda, y P2 imagen derecha).



Figura 27. Monitor RAD7 midiendo la concentración de radón en el punto A19.



Figura 28. Detectores de Makrofol con distintos tipos de membranas de polietileno en el punto P11: instalación (foto izquierda) y recogida recubierta de polvo (foto derecha).



Figura 29. Detectores de Makrofol con distintos tipos de membranas de polietileno en el punto P15: foto superior instalación e inferior izquierda recogida de los detectores. Estos detectores estaban situados en el exterior, cerca de los reactores que producen vapores de los ácidos que digieren la roca, foto inferior derecha.



Detectores pasivos.

Los resultados de las medidas integradas de la concentración de radón en los puntos donde se instaló un detector pasivo con la configuración estándar se presentan en la figura 30. El resultado del detector con el código P8 no se ha incluido porque no se encontró en el punto donde se había instalado inicialmente. Los niveles de radón en los puntos P1 y P2 variaron entre 150 Bq·m⁻³ y 200 Bq·m⁻³. Estos dos puntos estaban situados en recintos cerrados y en ellos los trabajadores pasaban un tiempo significativo. Los niveles de radón en el resto de puntos fueron iguales o inferiores a los 50 Bq·m⁻³, estos puntos estuvieron situados en zonas con mayor ventilación.

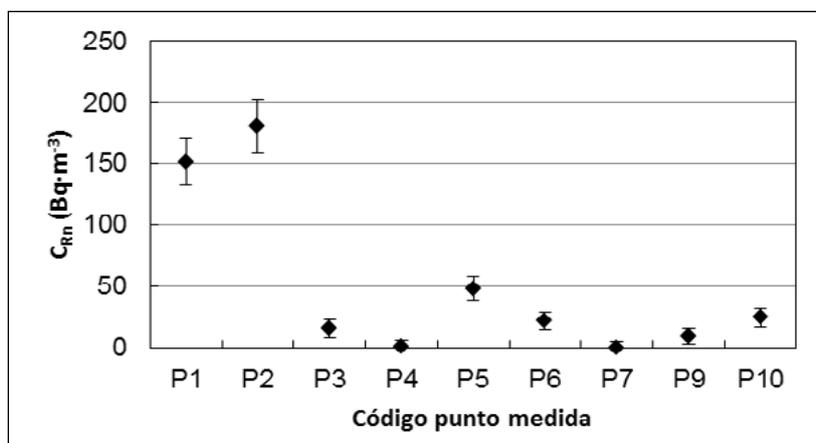


Figura 30. Niveles de radón obtenidos con la configuración estándar del detector pasivo.

La eficacia de las membranas de polietileno utilizadas para la protección de los detectores pasivos en los puntos donde la concentración de polvo era elevada solo era visible en las superficies del detector, ya que los filtros de fibra de vidrio no presentaban ningún daño ni obstrucción. Por otro lado, toda la superficie exterior de las membranas de polietileno quedó recubierta de polvo (figura 28). En cuanto a los lugares expuestos a ácidos (figura 29), las láminas de Mylar de los detectores de Makrofol experimentaron un daño significativo. Especialmente los detectores del punto 15 presentaban el mayor deterioro en todas las configuraciones, llegando a desaparecer por completo el aluminado de la lámina de Mylar.

Los resultados de los cinco puntos donde se instaló el detector pasivo en su configuración estándar (A) y con las membranas de polietileno (B, C y D) presentaron unos valores bastante distintos entre ellos (figura 31 y figura 32). Los resultados del punto P13 no se presentan porque son valores inferiores al límite de detección ($L_D = 9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).

En el punto P11, se obtuvieron los niveles de radón más elevados, alrededor de los 200 Bq·m⁻³, y no se observó una diferencia significativa entre los resultados de las distintas configuraciones. Este punto estaba situado en el sótano de la zona donde se realiza la descarga de la roca fosfórica, lugar donde se genera una gran cantidad de polvo, así que todas las membranas quedaron igualmente recubiertas de polvo (figura 28). Con estos resultados no era posible observar un posible

efecto de retraso en la entrada del radón hacia el interior de la membrana debida al polvo acumulado. Los niveles de radón de los puntos P12 y P14 se encontraban entre el límite de detección L_D y $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. En cuanto a los resultados del punto P15 se caracterizaron por presentar una variación importante en la configuración D, a diferencia del resto de puntos, y por ser unos valores significativamente elevados al tratarse de un punto exterior.

A excepción de los puntos P1, P2 y P11, el resto de puntos de medida estuvieron situados en zonas con una ventilación elevada, lo que explica los bajos niveles de radón obtenidos

El punto P15, en cambio, estaba situado cerca de las aberturas de los reactores por donde se liberaba el radón procedente de la roca fosfórica, motivo por el cual la concentración media de radón podía ser muy superior al valor medio mundial para la concentración de radón en el aire atmosférico ($10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, UNSCEAR 2000). Cabe destacar que las condiciones de la medida fueron extremadamente agresivas y que consideramos que ninguna de las membranas de polietileno protegió suficientemente al detector, lo que impide asegurar que el valor medio obtenido fuera correcto. El hecho de haber obtenido un valor 4 veces superior en el caso de la configuración D, que tiene la membrana más gruesa y que protege más el detector, nos induce a suponer que la concentración de radón podría haber sido igual o superior a los $(467 \pm 60) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

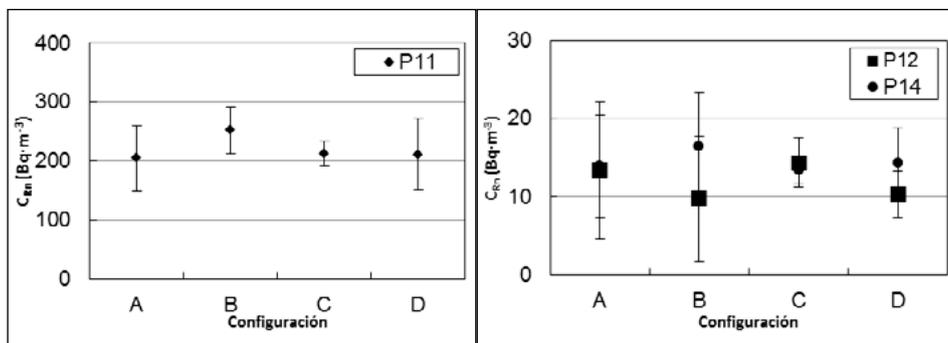


Figura 31. Niveles de radón obtenidos a partir de medidas integradas con las configuraciones de membrana de polietileno (A, B, C y D) en el punto P11 (gráfico de la izquierda) y en los puntos P12 y P13 (gráfico de la derecha).

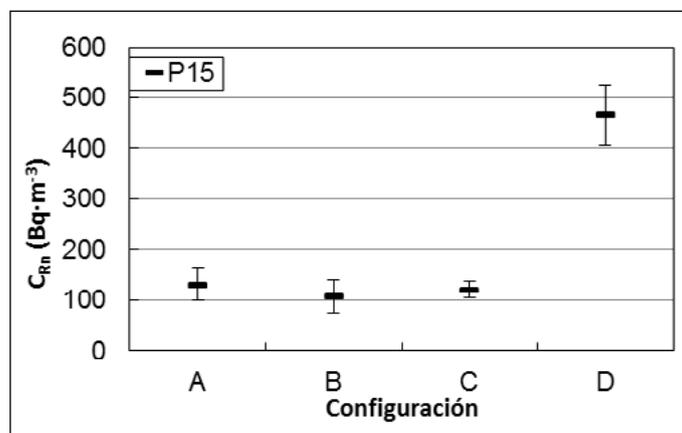


Figura 32. Niveles de radón en el punto P15 obtenidos a partir de medidas integradas con las configuraciones de membrana de polietileno (A, B, C y D).

Detectores activos.

Con los resultados de las medidas puntuales y en continuo de la concentración de radón obtenidos con los monitores activos en los dos períodos de medida, se llevó a cabo una estimación del valor medio de cada lugar de trabajo (tabla 17), obteniéndose un intervalo de valores de [5 - 286] Bq·m⁻³.

Código punto medida	Descripción lugar de trabajo	C _{Rn} (Bq·m ⁻³)		
		1ª medida (Julio)	2ª medida (Noviembre)	Valor medio
A1	Reactores (1ª planta)	4 ± 12	-	-
A2	Reactores (2ª planta)	7 ± 13	39 ± 5	29 ± 7
A3	Sobre el Dorr-1	7 ± 13	70 ± 30	39 ± 16
A4	Reactores (dig 5) (1ª planta)	2 ± 11	27 ± 20	15 ± 11
A5	Entre Dorr-4 y Dorr-1 B-5 B6	11 ± 15	59 ± 19	35 ± 12
A6	Sobre el Dorr-4	2 ± 11	98 ± 45	50 ± 23
A7	Zona empaquetado	2 ± 11	7 ± 13	5 ± 9
A8	Descarga roca	18 ± 30	117 ± 37	68 ± 24
A9	Descarga roca (sótano -2)	253 ± 79	318 ± 58	286 ± 49
A10	Encima de B-18	2 ± 10	38 ± 23	20 ± 13
A11	Encima de B-19	13 ± 16	51 ± 20	32 ± 13
A12	Descarga roca (sótano)	186 ± 16	165 ± 14	176 ± 11
A13	Encima de B-20	11 ± 15	27 ± 22	19 ± 13
A14	Encima de Dorr-2	15 ± 17	79 ± 32	47 ± 18
A15	Descarga roca (1ª planta)	98 ± 53	35 ± 22	67 ± 29
A16	Dorr-1A	4 ± 12	27 ± 20	16 ± 12
A17	Dorr-3	4 ± 12	29 ± 21	17 ± 12
A18	Almacén fosfatos	32 ± 36	15 ± 17	24 ± 20
A19	Zona de precipitación	11 ± 15	18 ± 20	15 ± 13
A20	Encima tanques precipitación	27 ± 20	33 ± 22	30 ± 15
A21	Zona carga camiones	0 ± 22	14 ± 16	7 ± 14

Tabla 17. Niveles de radón obtenidos a partir de medidas puntuales y en continuo.

Código punto medida	Descripción lugar de trabajo	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)		
		1ª medida (Julio)	2ª medida (Noviembre)	Valor medio
A22	Entre Dorr-2 y Dorr-3	2 ± 10	36 ± 23	19 ± 13
A23	Oficina	48 ± 36	193 ± 47	118 ± 26
A24	Laboratorio	43 ± 24	203 ± 84	126 ± 46
A25	Debajo de Dorr-1	4 ± 12	53 ± 26	29 ± 14
A26	Debajo de Dorr-3	9 ± 14	27 ± 20	18 ± 12
A27	Debajo de Dorr-4	5 ± 22	16 ± 17	11 ± 14
A28	Debajo de B-20	4 ± 11	11 ± 15	8 ± 9
A29	Edificio secado 3	14 ± 28	7 ± 14	11 ± 16
A30	Edificio secado 1/2 (1ª planta)	16 ± 17	28 ± 9	22 ± 10
A31	Edificio secado 1/2 (2ª planta)	2 ± 11	102 ± 36	52 ± 19

El punto de medida que presentó valores de la concentración más elevados, fue el punto A9, localizado en la zona de descarga de la roca fosfórica, y es el lugar subterráneo de mayor profundidad de todos los puntos de medida. Otros puntos de medida subterráneos próximos a éste fueron el P11, más cercano a la superficie, y el A12, situado a unos 15-20 metros del A9 y más al interior de la galería subterránea por donde discurre la cinta transportadora (figura 33). En ambos puntos se obtuvieron unos niveles de radón alrededor de los $200 Bq \cdot m^{-3}$.

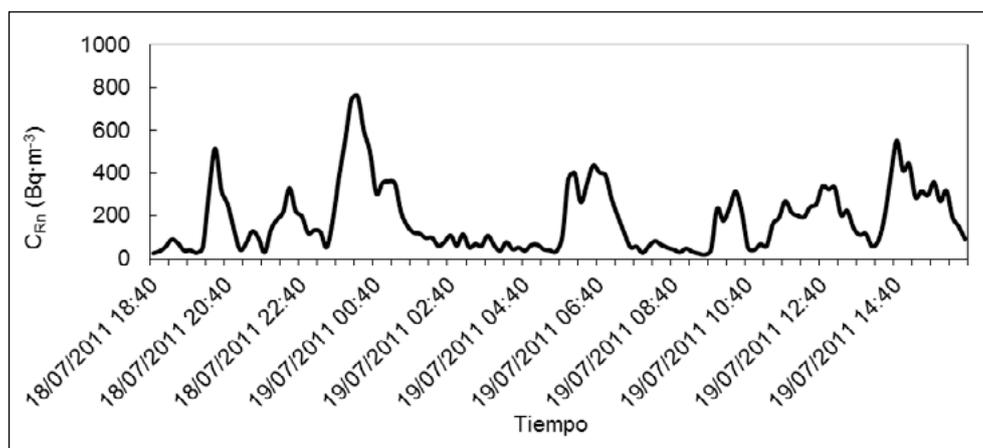


Figura 33. Concentración de radón en el punto A9 obtenida con el monitor activo AlphaGUARD durante 18 horas entre los días 18 y 19 de julio de 2011.

En el punto A12 se midió la concentración de radón de forma continua con el monitor activo AlphaGUARD durante 18 horas en cada uno de los dos períodos de medida (figura 34). Los resultados mostraron que la concentración de radón presentaba importantes fluctuaciones diarias hasta valores que podían alcanzar los $800 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

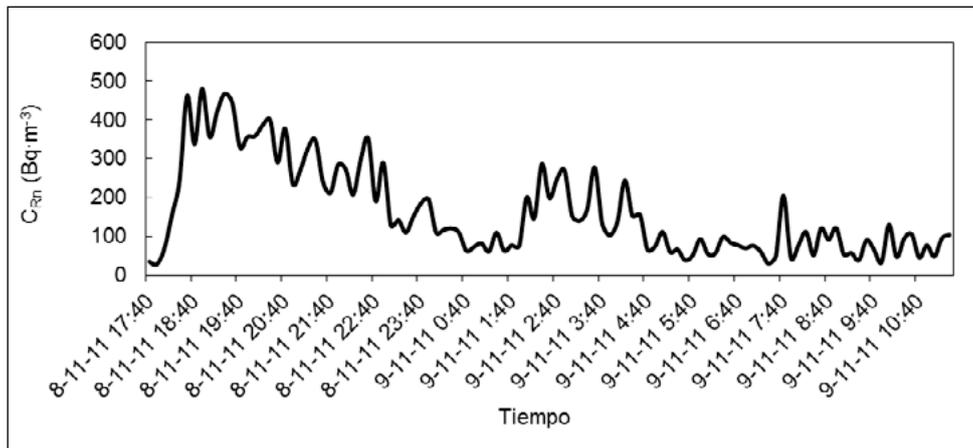


Figura 34. Concentración de radón en el punto A12 obtenida con el monitor activo AlphaGUARD durante 18 horas entre los días 8 y 9 de noviembre de 2011.

Los otros dos puntos que presentaban unos niveles más elevados correspondían a los recintos cerrados de la planta, como las oficinas (A23) y el laboratorio (A24). En ambos puntos también se realizaron medidas en continuo durante el turno de noche y de mañana (figura 35 y figura 36).

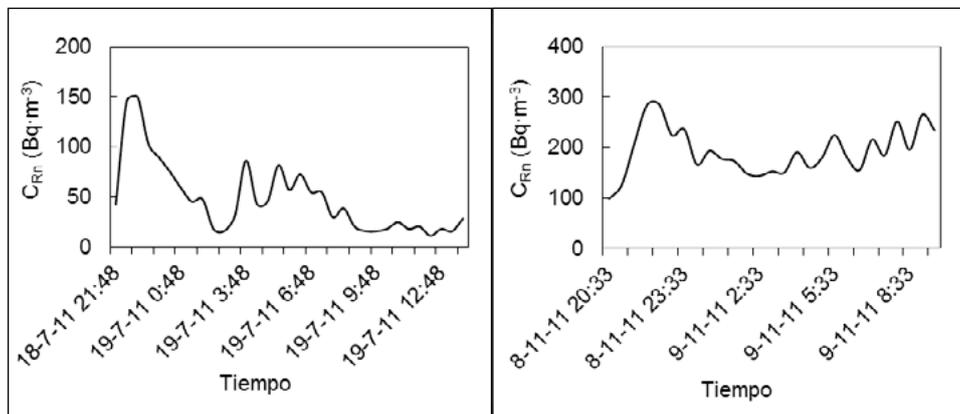


Figura 35. Concentración de radón en el punto A23 obtenida con el monitor activo RAD7 durante 16 horas entre los días 18 y 19 de julio de 2011 (imagen izquierda) y durante 13 horas entre los días 8 y 9 de noviembre de 2011 (imagen derecha).

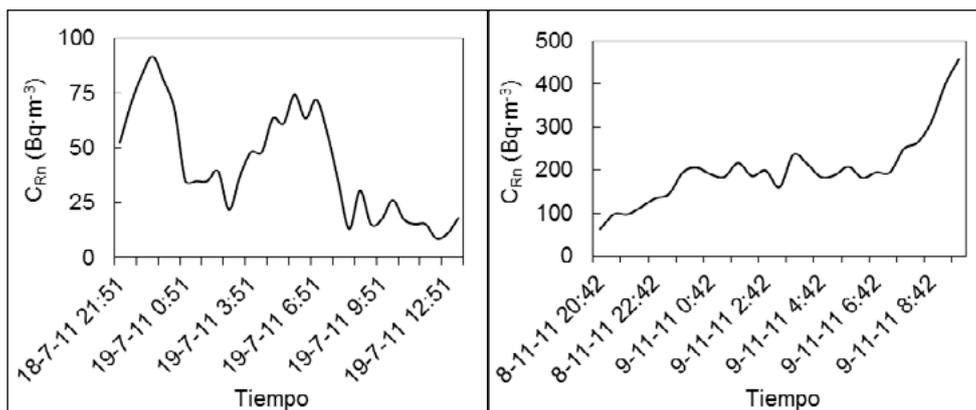


Figura 36. Concentración de radón en el punto A24 obtenida con el monitor activo RAD7 durante 15 horas entre los días 18 y 19 de julio de 2011 (imagen izquierda) y durante 14 horas entre los días 8 y 9 de noviembre de 2011 (imagen derecha).

III.3. DESARROLLO DE PROTOCOLOS DE VIGILANCIA AMBIENTAL EXTERIOR E INTERIOR, PONIENDO ESPECIAL ÉNFASIS EN LA DE DOSIMETRÍA DE ÁREA PARA PERSONAL EXPUESTO A RADIACIÓN NATURAL.

Se ha desarrollado un protocolo de vigilancia ambiental para el personal expuesto al radón en un balneario, que consiste en los siguientes pasos: (i) estudio previo del establecimiento, (ii) medidas de la concentración de radón y (iii) recomendaciones.

Para realizar el estudio previo es necesario hacer una visita al establecimiento donde se solicitará un plano de las estancias susceptibles de tener niveles elevados de radón. Los propietarios también deben proporcionar el tiempo que el personal permanece en cada lugar de trabajo, especificando las horas del día en que están presentes. Al mismo tiempo que se recoge la información, se realizarán medidas en continuo, de la concentración de radón en los lugares más representativos, preferentemente durante un día, teniendo en cuenta los distintos tratamientos.

En función de los resultados obtenidos durante las medidas con los detectores activos, se estimará el tiempo que deben exponerse los detectores pasivos y se elegirán los puntos de medida. Como el grado de humedad es elevado se protegerán los detectores, con una membrana de polietileno. Para no tener que ir el personal del laboratorio cada vez a buscar y colocar nuevos detectores al balneario, se indicará al responsable del establecimiento la posibilidad de que un empleado realice esta tarea. En caso que se acepte, se enseñará a la persona escogida como deberá actuar. Idealmente el nivel de radón se debe medir durante un año seguido.

Una vez acabadas las medidas se procederá al análisis de los resultados obtenidos y, si fuera necesario, a la determinación de la dosis recibida por los trabajadores en un año. Siguiendo las indicaciones del Real Decreto 1439/2010 y de la instrucción del CSN IS-33 si la concentración de radón es superior a $600 Bq \cdot m^{-3}$, se darán unas recomendaciones para mitigar la entrada y acumulación del radón en ese lugar.

En caso de necesitar calcular la dosis recibida por los trabajadores se utilizará la expresión que recomienda la UNSCEAR 2008:

$$H = C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot (8 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}))$$

donde C_{Rn} es la concentración de radón, F el factor de equilibrio y t el tiempo de exposición.

Estudios realizados por diferentes grupos han puesto de manifiesto que los coeficientes de dosis por unidad de exposición al radón y sus descendientes dependen de las características de los lugares de trabajo en estudio. De acuerdo con dichos estudios, en la estimación de la dosis es necesario considerar el factor de equilibrio entre el radón y sus descendientes, la fracción libre y el tamaño de los descendientes del radón, así como otros factores fisiológicos, como puede ser la tasa de respiración, y biocinéticos del organismo.

Por consiguiente, las estimaciones dosimétricas se podrán establecer para aquellos lugares de trabajo en los que se conozca con mayor precisión sus condiciones ambientales y sus variaciones temporales con el propósito de evaluar con criterio si es necesario llevar a cabo acciones de remedio.

En abril de 2011, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) aprueba la publicación ICRP 115 (ICRP, 2011). En dicho documento, de acuerdo con los recientes estudios epidemiológicos que relacionan el riesgo de desarrollar un cáncer de pulmón con la exposición al radón y sus descendientes, se concluye que el radón y sus descendientes deben tratarse de la misma manera que el resto de radionucleidos en el marco de la protección radiológica de la ICRP.

El UNSCEAR recomienda un valor de F de 0.4 para recintos cerrados. En el caso de los estudios en balnearios, no se midió este factor y en una primera aproximación podría ponerse el valor indicado. Una de las tareas que habría que realizar, adicionalmente, es el estudio del factor de equilibrio en distintos tipos de lugares de trabajo para poder estimar correctamente en cada caso la dosis debida al radón.

Como se indicaba en la tabla 15, del apartado 3.1.2.2 (Balneario de grandes dimensiones) únicamente se superaba el valor de $600 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ en el Vaporario, donde durante su uso la concentración de radón era muy elevada, y en los dos manantiales de agua. Las otras dependencias, se ventilan inmediatamente después de acabar los tratamientos y el nivel de radón desciende rápidamente. Merece la pena resaltar que en el despacho del director el valor de la C_{Rn} , aunque no llega al nivel de referencia, si está muy próximo a él, así que también se ha calculado la dosis recibida por el personal en este despacho.

En la tabla 18 se dan los valores de la concentración media de radón en el aire en salas de un establecimiento termal y de la dosis anual que recibiría el personal, si $F=0.4$ y $t=2000 \text{ h} \cdot \text{año}^{-1}$. También se ha incluido el tiempo real que el personal está como máximo en cada lugar, así como la correspondiente dosis anual recibida. Como puede observarse las dosis disminuyen significativamente al considerar

el tiempo real de exposición. Tanto en el caso del manantial Viejo, como en el denominado del Escobar no se superaría la dosis para miembros del público. Hay que tener en cuenta que se ha utilizado el valor del factor de equilibrio recomendado por el UNSCEAR para recintos cerrados. Sin embargo, si ese factor fuese $F=0.8$ la dosis se duplicaría, pero si por el contrario F disminuyera a un valor de 0.2 la dosis sería la mitad.

Sala	C_{Rn} ($Bq \cdot m^{-3}$)	Dosis (mSv) $t=2000$ h/a	t_{real} (h/a)	Dosis (mSv) t_{real}
Vaporario (en uso)	$(1.35 \pm 0.2) \cdot 10^3$	8.6	625	2.7
Manantial Viejo	$(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^3$	7.7	250	1
Manantial Escobar	820 ± 120	5.2	250	0.7
Despacho de dirección	577 ± 60	3.7	1750	3.6

Tabla 18. Valor de la concentración media de radón en el aire en salas de un establecimiento termal y de la dosis anual que recibiría el personal, si $F=0.4$ y $t=2000$ h·año⁻¹.

IV. Caracterización del Marjal de Peñíscola

Estudios preliminares realizados en el marjal de Peñíscola, un humedal litoral de la localidad de Peñíscola (Castellón), evidenciaron la presencia de elevadas concentraciones de radiactividad natural (isótopos de Ra y ^{222}Rn) en las aguas de este humedal.

En el marco de este proyecto, se realizaron distintas acciones en el marjal con el triple objetivo de caracterizar radiológicamente este humedal, determinar los motivos de esta elevada radioactividad y evaluar la transferencia de radioactividad a flora y fauna. Estas acciones se detallan a continuación:

- Campaña agosto 2009:
 - o Muestreo de suelos y sedimentos distribuidos a lo largo del marjal de Peñíscola, con la finalidad de caracterizar el contenido en radioactividad (isótopos de U, Th y Ra) y la composición mineralógica de estos suelos.
 - o Recogida de dos testigos de sedimentos y posteriores experimentos de incubación para determinar la difusión de Ra de los sedimentos a la columna de agua.
- Campaña junio 2010:
 - o Muestreo de aguas intersticiales en distintos puntos del marjal, para determinar los coeficientes de distribución de los radionucleidos entre los sedimentos y el agua, para caracterizar el contenido en radiactividad del agua subterránea que descarga al humedal.
 - o Muestreo de agua en distintas estaciones de los canales del humedal para caracterizar el contenido en radioactividad del agua del marjal (isótopos de Ra y ^{222}Rn).
 - o Captura de diferentes especies de peces (*Cyprinus carpio*, *Carassius auratus* y *Chelon labrosus*) para analizar su contenido en radioactividad. Esta tarea fue realizada en colaboración con el Institut d'Ecologia Aquàtica i el Departament de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona. En el caso de las especies de *Cyprinus carpio* y *Chelon labrosus* capturadas y una vez en el laboratorio, se realizó una disección para la diferenciación de distintos órganos (hepatopáncreas, riñón, branquias, músculo, espinas, gónadas, contenido intestino). En este mismo muestreo, se realizaron muestreos de diferentes especies de plantas (*Beta vulgaris*, *Phragmites australis*, *Arthrocnemum macrostachyum*, *Foeniculum vulgare*, *Fontinalis antipyretica*, *Suaeda vera*, *Olea europaea*, *Tamarix gallica*) en distintas zonas del marjal.
- Campaña octubre 2010:
 - o Realización de tomografía eléctrica para caracterizar geológicamente el humedal y determinar los mecanismos de descarga de agua subterránea.
- Campaña diciembre 2011:
 - o Análisis de la dosis gamma debida a la presencia de radionucleidos emisores gamma en el suelo del marjal.

- o Extracción de un testigo de sedimento de 60 metros para caracterizar geológica y radiológicamente el sustrato. Este testigo fue utilizado para describir la columna estratigráfica del humedal y para obtener distintas muestras de sedimentos a lo largo del perfil para determinar su contenido en U, Th, Ra, Pb y Po, la granulometría y la composición química.
 - o Realización de 5 piezómetros a 60, 24, 15, 11 y 4 m de profundidad, para determinar los niveles piezométricos de los distintos acuíferos que nutren el marjal, así como para obtener muestras de agua subterránea de los diferentes sistemas y a distintas profundidades. Estas muestras de agua subterránea de los piezómetros se utilizaron para determinar el contenido en isótopos de U, Th, Ra y ^{222}Rn , ^{210}Pb y ^{210}Po disueltos en agua.
 - o Medida de la exhalación de radón desde el terreno y de la concentración de radón en el aire exterior de distintos puntos del marjal.
- Las distintas estaciones muestreadas en el marjal se detallan en la figura 37.



Figura 37. Puntos de muestreo en el marjal de Peñíscola, incluyendo las muestras de agua de los canales del humedal, el testigo de sedimentos de 60 metros y los piezómetros profundos, los suelos y sedimentos, las muestras de agua intersticial y los testigos utilizados para la incubación de sedimentos. Las capturas de peces se realizaron en las estaciones St17, St25 y St42.

IV.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

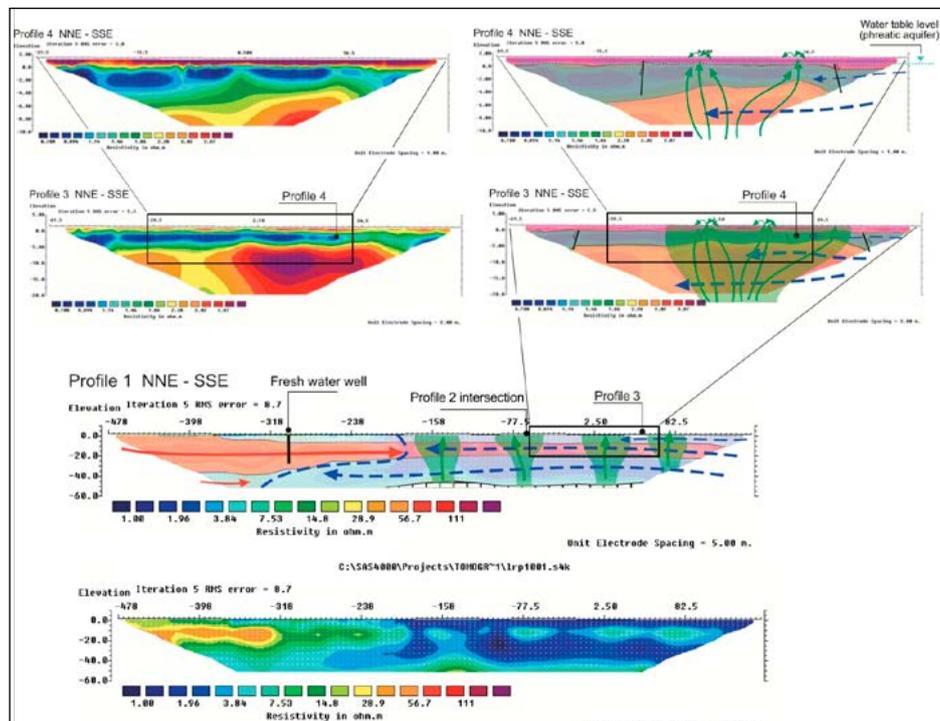
Los resultados de la tomografía eléctrica realizada en octubre de 2010 mostraron un potencial de sedimento de unos 50 m (figura 38).

Desde la línea de costa hasta el interior, se produce una disminución progresiva en la resistividad que afecta a la sección en su conjunto. Esta tendencia está provocada por una disminución en la concentración de sales del agua que actúa como electrolito en las diferentes formaciones.

Las aguas con mayor concentración se situarían en la línea de mar y estas van perdiendo progresivamente salinidad en dirección al continente. Por otra parte, se observa la presencia de 4 electrocapas distintas, horizontalmente distribuidas en profundidad a lo largo de la imagen (figura 38). Estas capas corresponden a la presencia de distintos estratos geológicos, con distintos materiales y permeabilidades, que resultan en claras diferencias en sus resistividades. Estas diferentes electrocapas están atravesadas por franjas en forma de bulbo (ensanchamiento en dirección a la superficie). El aumento de la resistividad de las capas, es debido a la circulación ascendente de aguas con menor conductividad eléctrica que las de base. La interpretación de estas franjas sugiere la presencia de agua subterránea proveniente del acuífero profundo del Maestrazgo, que fluye a través de fracturas y alcanza la superficie del marjal atravesando distintos sustratos geológicos. Ya en superficie, estas descargas de agua subterránea se manifiestan en forma de espejos de agua, localmente llamados “ullals”, muy representativos del marjal de Peñíscola.

El modelo conceptual derivado de la tomografía eléctrica se presenta también en la figura 38, donde las flechas azules discontinuas representan la entrada de agua salina, con baja resistividad, y las flechas rojas indican la influencia de agua dulce de origen continental, con alta resistividad. Además, las franjas verticales que se observan, identificadas con las flechas verdes, representan la descarga ascendente de agua subterránea proveniente del acuífero del Maestrazgo, con relativamente alta resistividad, que atraviesa los distintos sustratos geológicos antes de descargar en el marjal, en forma de espejos de agua (para información más detallada, ver Zarroca et al., 2014).

Figura 38. Imagen obtenida a través de la tomografía eléctrica (inferior) y modelo conceptual derivado de esta (superior). En este modelo, las flechas azules discontinuas representan la entrada de agua salina, con baja resistividad, y las rojas la influencia de agua dulce de origen continental, con alta resistividad. Las franjas verticales (flechas verdes), indican la descarga ascendente de agua subterránea proveniente del acuífero del Maestrazgo, que atraviesa los distintos sustratos geológicos antes de descargar en el marjal de Peñíscola en forma de espejos de agua.



La secuencia estratigráfica derivada del testigo de sedimento de 60 metros extraído en la campaña de diciembre de 2011, y contrastada con los resultados de la tomografía eléctrica, puede resumirse de la siguiente forma, empezando por los estratos más superficiales (figura 39):

- 0 – 1 metros (b en figura 39): Relleno superficial de origen antropogénico de un metro de grosor, compuesto por gravas, arenas y restos de construcción.
- 1 – 8 metros (c): Turba y material detrítico típico de humedales, de 6-8 metros de grosor y color pardo oscuro, compuesto por materiales orgánicos (25 -30 %), arcillas y limos.
- 8 – 15 metros (d y e): Abanico aluvial compuesto por niveles superficiales de gravas con matrices lutíticas y con niveles cimentados con carbonato cálcico, y niveles más profundos compuestos por arenas y gravas probablemente correspondientes a los sedimentos más viejos del Cuaternario de la sección.
- 15 – 50 metros (g): Nivel de unos 35 metros de grosor compuesto por arcillas (probablemente del Plioceno debido a la abundancia de fauna foraminífera), con nódulos secundarios de carbonato cálcico y arenas y gravas esporádicas.
- 50 – 60 metros (h): Base rocosa constituida por calizas y dolomitas del Jurásico, altamente fracturadas y carstificadas, constituyentes al mismo estrato que aflora en la Sierra de Irta (Sur de la zona de estudio).

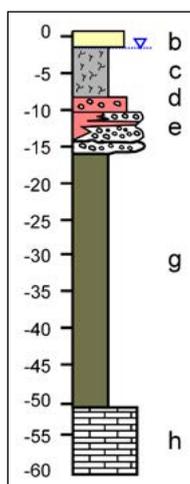


Figura 39.
Secuencia estratigráfica del testigo de sedimento de 60 metros extraído del marjal de Peñíscola. b: relleno antropogénico. c: turba y material detrítico. d: abanico aluvial (arcillas, limos y gravas). e: abanico aluvial (predomino arenas y gravas). g: arcillas del plioceno. h: Calizas y dolomitas del Jurásico.

La secuencia estratigráfica sugiere la presencia de al menos dos acuíferos confinados, uno en el abanico aluvial de 8 a 15 metros y el otro en la base rocosa de calizas (el acuífero profundo Jurásico del Maestrazgo). Los datos piezométricos recogidos en distintos piezómetros (realizados paralelamente a la extracción del testigo) confirman la presencia de un sistema de dos acuíferos.

IV.2. CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA.

A continuación se resumen los resultados más interesantes en relación a la caracterización radiológica del marjal de Peñíscola, derivados de las distintas campañas de muestreo realizadas al humedal en el marco de este proyecto.

- El análisis de las dosis debidas a la radiación gamma procedente del suelo del marjal, se llevó a cabo mediante medidas puntuales en 10 puntos distribuidos a lo largo del marjal. En cada caso el detector gamma Eberline, se situó a 1m del suelo. Los valores de las tasas de dosis variaron entre 0,10 y 0,22 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ no representado ningún riesgo para los miembros de la población.
- Los contenidos en radiactividad de los suelos y el agua del marjal (principalmente ^{226}Ra y sus descendientes) fueron muy elevados, confirmando los resultados preliminares de que se disponía (tablas 19 y 20). Los resultados de ^{226}Ra y ^{222}Rn medidos en aguas del humedal se encuentran entre los valores más elevados medidos en sistemas similares.
- La concentración de Ra en muestras recogidas en piezómetros de distinta profundidad (tabla 21) permite inferir que la fuente principal de Ra en el sistema es el agua subterránea proveniente del acuífero profundo del Maestrazgo, con concentraciones que superan a los 27.000 $\text{dpm}\cdot 100\text{L}^{-1}$ de ^{226}Ra . Contrariamente, la distribución de ^{222}Rn no sigue el mismo patrón, lo que sugiere que la fuente principal de ^{222}Rn no es la descarga de agua subterránea del acuífero profundo sino la producción a partir del ^{226}Ra acumulado en los sedimentos, que presentan concentraciones superiores a 45 $\text{dpm}\cdot\text{g}^{-1}$.

Muestra	Salinidad	^{223}Ra	^{224}Ra	^{226}Ra	^{228}Ra	^{222}Rn
		$\text{dpm}\cdot 100\text{L}^{-1}$				$10^3\text{ dpm}\cdot 100\text{L}^{-1}$
ST5	0.83	1.5 \pm 0.2	13 \pm 1	23 \pm 3	12 \pm 4	4 \pm 2
ST7	0.76	1.5 \pm 0.2	18.8 \pm 0.9	13 \pm 1	12 \pm 2	46 \pm 9
ST8	1.14	1.7 \pm 0.2	13.7 \pm 0.7	74 \pm 1	19 \pm 1	21 \pm 5
ST17	1.50	2.5 \pm 0.5	65 \pm 3	480 \pm 5	48 \pm 3	250 \pm 20
ST18	1.92	4.0 \pm 0.6	77 \pm 3	821 \pm 5	56 \pm 2	550 \pm 30
ST19	3.62	14 \pm 1	230 \pm 15	1.495 \pm 12	135 \pm 7	460 \pm 20
ST20	3.90	10 \pm 1	154 \pm 9	1.939 \pm 12	111 \pm 6	270 \pm 30
ST24	5.72	20 \pm 2	460 \pm 20	7.070 \pm 20	250 \pm 8	(3.5 \pm 0.1) $\cdot 10^3$

Tabla 19.
Resultados de las
muestras de agua del
marjal de Peñíscola.

Muestra	Salinidad	^{223}Ra	^{224}Ra	^{226}Ra	^{228}Ra	^{222}Rn
		dpm-100L ⁻¹				10 ³ dpm-100L ⁻¹
ST25	3.01	6.1 ± 0.9	193 ± 9	1.886 ± 9	101 ± 4	630 ± 20
ST31	1.72	2.8 ± 0.2	52 ± 3	410 ± 7	35 ± 4	980 ± 30
ST36	4.41	14 ± 2	272 ± 15	2.460 ± 30	164 ± 15	450 ± 40
ST38	6.73	20 ± 3	410 ± 20	8.940 ± 20	342 ± 9	(3.0 ± 0.1)·10 ³
ST42	5.57	16 ± 2	350 ± 10	2.591 ± 12	79 ± 4	1.800 ± 50
ST43	5.68	21 ± 2	360 ± 20	4.150 ± 20	173 ± 8	1.680 ± 80
ST47	5.66	24 ± 2	340 ± 20	4.180 ± 30	170 ± 10	1.770 ± 90

Muestra	^{228}Ra	^{226}Ra	^{230}Th	^{238}U
	dpm·g ⁻¹			
A	3.54 ± 0.02	3.36 ± 0.03	-	1.96 ± 0.08
B	2.67 ± 0.02	2.51 ± 0.03	-	2.03 ± 0.07
C	1.65 ± 0.02	3.35 ± 0.04	2.0 ± 0.2	1.2 ± 0.1
C.2	1.8 ± 0.1	5.5 ± 0.2	-	1.3 ± 0.6
D	2.26 ± 0.01	9.12 ± 0.07	-	1.57 ± 0.07
D.2	2.2 ± 0.1	13.8 ± 0.2	-	0.9 ± 0.5
E	1.73 ± 0.05	4.51 ± 0.04	-	1.7 ± 0.1
F	2.53 ± 0.04	46.8 ± 0.5	-	1.5 ± 0.5
F.2	1.18 ± 0.07	25.9 ± 0.4	-	< MDA
G	0.88 ± 0.05	15.1 ± 0.2	-	2.9 ± 0.7
H	2.14 ± 0.02	42.7 ± 0.3	3.1 ± 0.3	1.7 ± 0.1
I	1.32 ± 0.02	31.7 ± 0.2	-	1.02 ± 0.09
J	1.73 ± 0.02	17.2 ± 0.1	-	1.15 ± 0.09

Tabla 20.
Resultados de
los niveles de
radiactividad en
suelos del marjal de
Peñíscola.

Muestra	²²⁸ Ra	²²⁶ Ra	²³⁰ Th	²³⁸ U
dpm·g ⁻¹				
K	1.99 ± 0.02	4.51 ± 0.04	-	1.7 ± 0.1
K.2	2.2 ± 0.1	7.8 ± 0.1	-	1.2 ± 0.4
L	0.56 ± 0.02	17.5 ± 0.1	-	0.8 ± 0.1
L.2	1.55 ± 0.10	27.0 ± 0.3	-	0.8 ± 0.5
M	2.35 ± 0.04	2.21 ± 0.07	-	1.8 ± 0.3
N	1.20 ± 0.02	1.97 ± 0.04	-	0.7 ± 0.1
O	1.46 ± 0.01	1.74 ± 0.02	-	0.86 ± 0.07
P	1.85 ± 0.02	3.14 ± 0.03	4.4 ± 0.3	1.1 ± 0.1
Q	1.05 ± 0.01	1.23 ± 0.01	-	0.72 ± 0.05
Q.2	0.91 ± 0.09	16.2 ± 0.2	-	< MDA
R	2.14 ± 0.02	8.44 ± 0.06	-	1.40 ± 0.09
S	1.36 ± 0.02	26.1 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.2
T	1.20 ± 0.02	20.1 ± 0.2	-	< MDA
U	2.43 ± 0.04	6.3 ± 0.1	-	1.2 ± 0.3
V	0.88 ± 0.01	3.06 ± 0.03	-	0.47 ± 0.09
W	0.63 ± 0.01	1.21 ± 0.02	-	0.39 ± 0.06

	Profundidad	Salinidad	Temperatura	²²⁴ Ra	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²² Rn
	(m)		(°C)	(dpm·100L ⁻¹)	10 ³ (dpm·100L ⁻¹)	(dpm·100L ⁻¹)	10 ⁶ dpm·100L ⁻¹
S1-LL	60	19.23	42.11	(3.43 ± 0.12)·10 ³	27.10 ± 0.60	(3.54 ± 0.10)·10 ³	0.72 ± 0.07
S1-C	24	20.31	40.44	(2.03 ± 0.10)·10 ³	24.20 ± 0.50	(1.43 ± 0.07)·10 ³	6.70 ± 0.30
S2-LL	15	17.30	29.90	1.270 ± 70	10.00 ± 0.20	860 ± 50	2.14 ± 0.05
S2-C	11	10.99	29.38	580 ± 20	8.20 ± 0.20	330 ± 40	4.34 ± 0.14
S3	4	13.89	18.33	97 ± 6	0.87 ± 0.02	60 ± 6	1.11 ± 0.12

Tabla 21.
Resultados de los niveles de radiactividad en los piezómetros del marjal de Peñíscola.

- La utilización de los isótopos de Ra y el ^{222}Rn ha permitido calcular la descarga de agua subterránea en el marjal proveniente de los distintos acuíferos que nutren este humedal. A partir de los datos de Ra y ^{222}Rn se estimó que la descarga de agua subterránea del acuífero profundo del Maestrazgo equivale a $5.600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, que la descarga de agua subterránea de los acuíferos superficiales de Vinaròs-Peñíscola y la Sierra de Irta representa $29.400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ y que la entrada de agua salina al humedal equivale a $2.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. El distinto período de semidesintegración de los isótopos de Ra ha permitido estimar también el tiempo de residencia del agua del marjal en 1.2 días. Además, una evaluación anual de las descargas de agua subterránea permitió establecer que los flujos de los acuíferos superficiales, responden a la precipitación local de los últimos tres meses, mientras que la descarga de agua subterránea del acuífero profundo del Maestrazgo es relativamente constante (Rodellas et al., 2012).
- Las muestras de peces capturadas en el Marjal de Peñíscola mostraron una acumulación de ^{210}Po en los tejidos con valores entre $(28 \pm 8) \text{ Bq kg}^{-1}$ en el músculo de la especie *Cyprinus carpio* y $(8.6 \pm 6.4) \text{ kBq kg}^{-1}$ en el contenido intestinal de *Chelon labrosus*. Los valores de la concentración de ^{210}Pb iban desde los $(8 \pm 4) \text{ Bq kg}^{-1}$ en el músculo de la especie *Cyprinus carpio* hasta $(470 \pm 480) \text{ Bq kg}^{-1}$ en el contenido intestinal de *Chelon labrosus*. El patrón de acumulación hallado siempre responde a $^{210}\text{Po} > ^{210}\text{Pb}$, excepto en el caso de la espina, tejido en el cual se acumula siempre más ^{210}Pb que ^{210}Po .

En comparación con muestras blanco analizadas, los peces del marjal presentan un enriquecimiento en ^{210}Pb y ^{210}Po en sus tejidos. Los factores de bioacumulación indican que la ingesta de alimentos es la fuente principal de ^{210}Pb y ^{210}Po en los organismos. Los valores de bioacumulación más elevados fueron encontrados en las especies *Chelon labrosus* y *Carassius auratus*, siendo *Cyprinus carpio* la especie que menos ^{210}Pb y ^{210}Po bioacumuló (figura 40) .

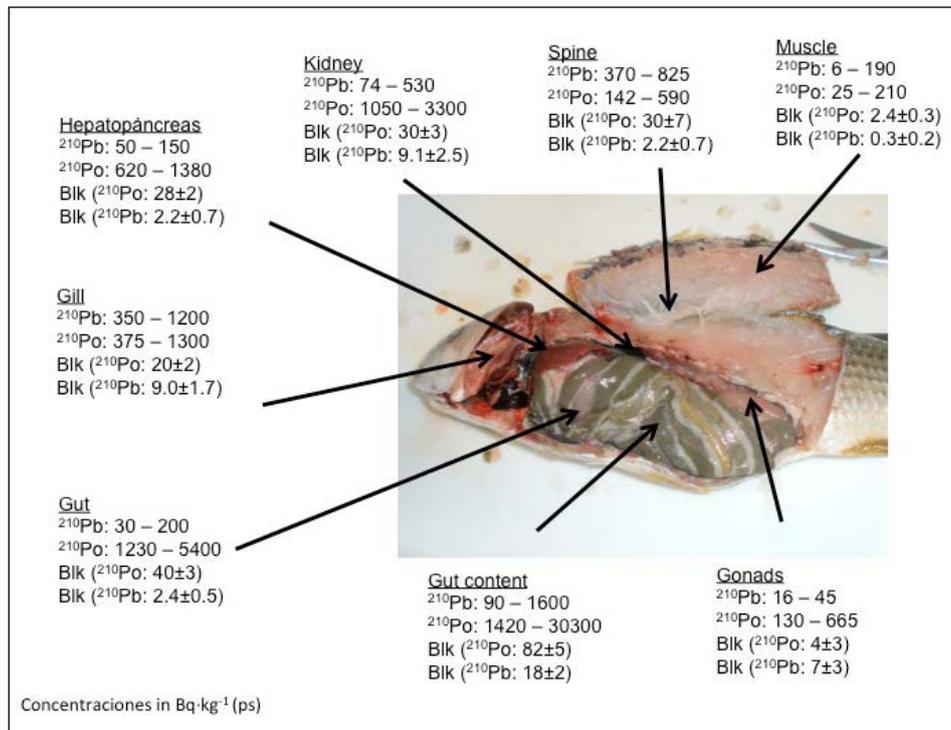


Figura 40.
Distribución de las concentraciones de ²¹⁰Pb y ²¹⁰Po en *Cbelon labrosus* del marjal de Peñíscola.

Como trabajo complementario y debido a la importancia del ²¹⁰Po en la dosis interna de los seres vivos, se analizó la concentración de ²¹⁰Po en las fracciones subcelulares en órganos digestivos para diferentes especies de peces. Se determinó que alrededor de un 50% del ²¹⁰Po se concentraba en la fracción de citoplasma. La fracción de citoplasma se separó en diferentes especiaciones químicas, en las cuales se determinó que la fracción de proteína era la más enriquecida en ²¹⁰Po. Por otra parte se estudiaron las concentraciones de metales (Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb y Hg) en relación a la concentración de ²¹⁰Po donde se encontró una correlación entre el ²¹⁰Po y los metales de Fe y Hg para los tejidos de las especies de peces estudiados. También se analizaron las concentraciones de dichos metales con respecto a la fracción de citoplasma y se relacionó con la concentración de ²¹⁰Po. En algunos metales analizados tales como Fe, Cu, Ni y Hg se encontró una relación entre su concentración y la de ²¹⁰Po.

- El análisis de las concentraciones de ²¹⁰Pb y ²¹⁰Po en diferentes plantas, consideradas representativas del marjal, así como la de los suelos y aguas intersticiales con los que han estado en contacto, muestran una acumulación de estos radionucleidos en estos tres compartimentos. Respecto a las plantas, la especie *Scirpus maritimus* es la que presenta unos valores más elevados de ²¹⁰Pb y ²¹⁰Po en la raíz, (173 ± 8) Bq·kg⁻¹ y (150 ± 7) Bq·kg⁻¹ respectivamente, *Arthrocnemum macrostachyum* alcanza el máximo valor promedio en el tallo ((41 ± 13) Bq·kg⁻¹ de ²¹⁰Pb y de (16 ± 15) Bq·kg⁻¹ de ²¹⁰Po). Las especies vegetales *Fontinalis antipyretica* y *Phragmites australis* son las que

presentan una mayor concentración de radiactividad natural (^{210}Pb : $(470 \pm 20) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ y ^{210}Po : $(77 \pm 9) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; ^{210}Pb : $(227 \pm 9) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ y ^{210}Po : $(99 \pm 12) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente) en las hojas. Estas concentraciones vienen determinadas por la actividad que presentan el ^{210}Pb ($(370 \pm 20) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ – $(1.380 \pm 80) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos y el ^{210}Pb ($(2,78 \pm 0,15) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ – $(70 \pm 5) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el ^{210}Po ($(4,61 \pm 0,34) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ – $(53 \pm 4) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) de las aguas intersticiales. Por último, los valores obtenidos de los factores de transferencia entre suelo y planta han permitido concluir que la principal vía de entrada de estos radionucleidos depende de la biología y morfología de la especie y de los factores físicos y químicos del medio. La figura 41 muestra parte de los resultados obtenidos en el caso de las concentraciones de ^{210}Pb y ^{210}Po en *Phragmites australis* (García-Orellana et al., 2013).

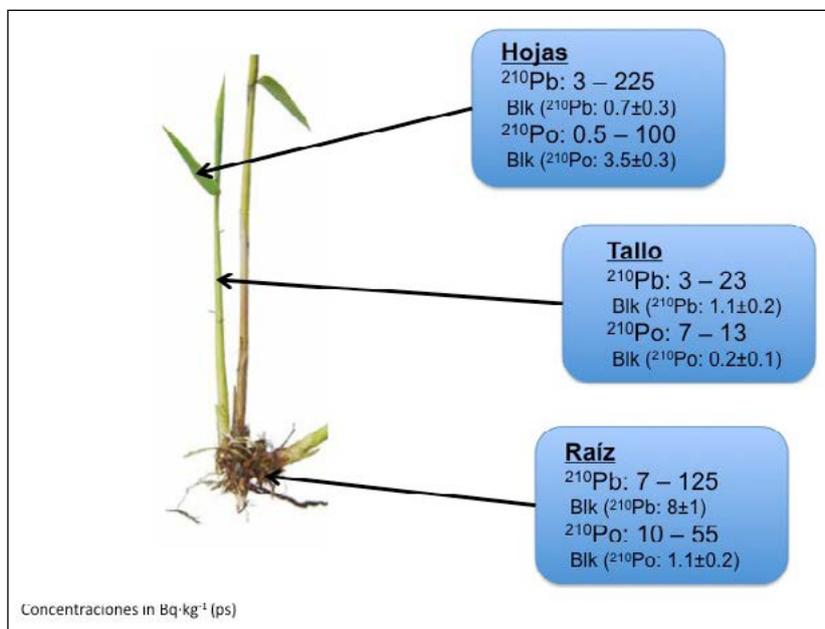


Figura 41.
Distribución de las concentraciones de ^{210}Pb y ^{210}Po en *Phragmites australis* del marjal.

IV.3. EXHALACIÓN DE GAS RADÓN

Las medidas de la exhalación de ^{222}Rn , se realizaron en 3 puntos diferentes del marjal (figura 42). En cada punto se llevó a cabo una medida de 8 h de duración, en la que se registraron los datos cada 15 min. (García-Orellana et al., 2013).



Figura 42. Sistema de medida de la exhalación utilizado en el Marjal de Peñíscola.

Con la representación gráfica de la concentración de radón en la cámara de acumulación en función del tiempo en uno de estos puntos, A, (figura 43), se observa que a partir de unas dos horas y media la concentración de radón tiende a un valor de saturación.

El valor del flujo de radón en los 3 puntos seleccionados fue: punto A (106 ± 8) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, punto B (93 ± 7) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ y punto C (97 ± 7) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. El valor medio del flujo obtenido fue de (99 ± 7) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, mientras que el predicho por Szegvary et al. (2009) para ese área era algo menor, $76 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Sin embargo, los valores de los flujos medidos son similares a los valores más altos encontrados en otros lugares de España por Grossi et al. (2012) que varían entre $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ y $90 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.

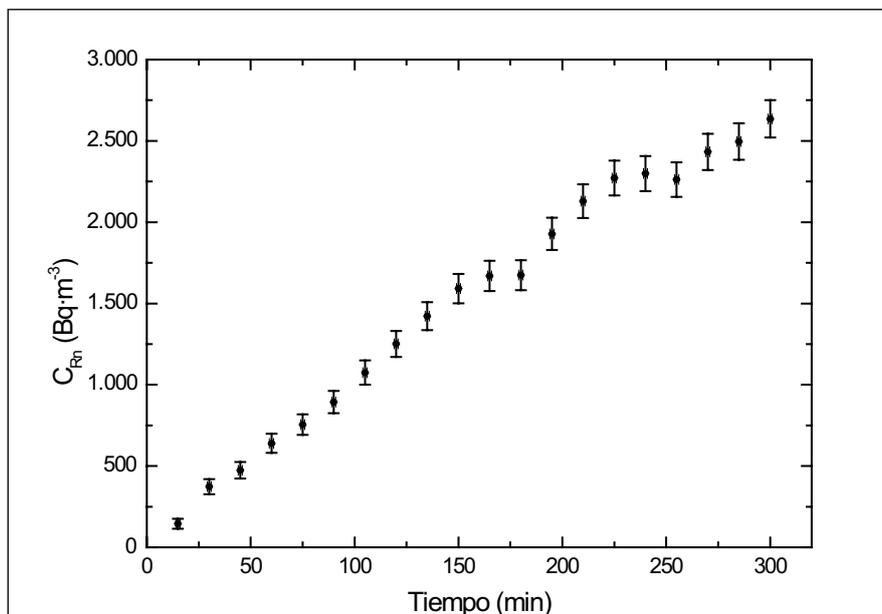


Figura 43. Concentración de radón en función del tiempo en la cámara de acumulación.

El análisis de la concentración de gas radón en el aire exterior del marjal, se llevó a cabo mediante medidas puntuales e integradas. Las medidas puntuales, se realizaron con el monitor RAD 7 en los mismos 10 puntos donde se midió la radiación gamma de forma simultánea (figura 44). Estas medidas se llevaron a cabo entre los días 13 y 14 de diciembre de 2011, durante horas diurnas y con una duración inferior a 130 minutos, obteniéndose unos niveles de radón inferiores a los 20 Bq.m⁻³.

Las medidas integradas se realizaron con los detectores pasivos de Makrofol en 5 puntos, a 1 m del suelo, distribuidos a lo largo del marjal. En cada punto se instalaron detectores con las diferentes configuraciones de membrana de polietileno. Durante un periodo de tres meses (diciembre 2011-marzo 2012). Con objeto de reducir la incidencia directa de la luz solar y de la precipitación sobre los detectores, así como para facilitar su posterior localización entre la vegetación, se instalaron bajo unas pequeñas cubiertas de plástico (figura 44). Al finalizar la exposición se ha comprobado el estado de los detectores y se ha observado que todas las láminas de Mylar y filtros de fibra de vidrio presentaban un deterioro significativo debido a la humedad y en todas las configuraciones. (Moreno et al., 2015). Este hecho ponía de manifiesto la necesidad de reducir el tiempo de exposición en este tipo de medidas en condiciones ambientales extremas.

Los niveles de ²²²Rn obtenidos en los cinco puntos de medida con las distintas configuraciones se encontraban entre 23 y 56 Bq.m⁻³, obteniéndose un valor medio de 40 ± 3 Bq.m⁻³. Los valores mas elevados se obtuvieron con los detectores de configuración D(Zipdar), indicando que esta membrana podría haber protegido mas tiempo al detector. Estos resultados estaban de acuerdo con los niveles de radón obtenidos en periodos de medida similares de campañas anteriores (2007-2008) (García-Orellana et al. 2013)



Figura 44. Sistema de medida de la concentración de radón en el aire exterior del marjal de Peñíscola. Imagen izquierda: monitor RAD 7, junto con el detector gamma Eberline. Imagen derecha: detectores de Makrofol bajo la cubierta protectora.

V. Conclusiones

Se han puesto a punto los sistemas de medida de radón y radio para condiciones extremas. En el caso del ^{222}Rn se ha comprobado la eficacia del sistema propuesto tanto en el INTE como en lugares de estudio. En concreto:

- Con las exposiciones en la cámara de referencia del INTE se ha analizado la influencia de las membranas de polietileno sobre la respuesta de los detectores pasivos de radón en condiciones normales y en condiciones ambientales extremas y se ha comprobado que la influencia de la membrana depende del volumen de la cámara de difusión de los detectores pasivos y también que la humedad no presenta ningún efecto sobre esta respuesta debido a la corta duración de las exposiciones.
- La imposibilidad de realizar largas exposiciones en una cámara de referencia donde los detectores deben estar sometidos a condiciones de condensación ha creado la necesidad de utilizar como laboratorios algunas actividades laborales reales con condiciones extremas.
- Con exposiciones de duración inferior a los cuatro meses en condiciones ambientales extremas se ha comprobado que la membrana de polietileno Zipdar es la más adecuada para evitar el efecto de la humedad sobre la respuesta de los detectores pasivos de Makrofol. En cambio, para exposiciones más largas se ha observado el efecto de deterioro que la humedad produce sobre los materiales del detector.
- La utilización de membranas de polietileno para evitar la humedad requiere de nuevos procedimientos, especialmente para exposiciones de corta duración. Debido al grosor de la membrana, existe un tiempo de retraso para la entrada de radón por difusión y una diferencia de concentraciones entre el exterior y el interior de la cámara de difusión que hay que tener en cuenta, considerando la posible influencia del tiempo transcurrido entre la finalización de la exposición y la abertura de la membrana y aplicando un determinado factor de corrección.
- Se ha puesto a punto el método de medida de la exhalación de ^{222}Rn y se han realizado diversas medidas en el marjal de Peñíscola.

Se ha aplicado la metodología establecida para al estudio del impacto radiológico del gas radón y la radiación ambiental en una mina-museo, en la empresa Ercros en Flix y en dos establecimientos termales. En concreto:

- El estudio detallado de las variaciones temporales de la concentración de ^{222}Rn en la mina-museo pone de manifiesto que actualmente no existe un riesgo radiológico significativo para los trabajadores debido al gas radón.
- El estudio detallado de la concentración de ^{222}Rn en la empresa Ercros, pone de manifiesto que los niveles de radón más elevados se encuentran en los recintos cerrados donde se manipula la roca fosfórica y cerca de los depósitos donde se producen las digestiones de dicha roca, pero que por tratarse de

zonas donde los trabajadores no pasan un tiempo significativo no existe un riesgo radiológico debido al gas radón.

- Los estudios detallados de la concentración de ^{222}Rn en los dos balnearios permiten observar los incrementos significativos de los niveles de radón en el aire de diferentes salas de tratamiento donde se utilizan las aguas termales.
- En unos de los dos establecimientos termales analizados, se ha efectuado un estudio de la dosis que recibe el personal expuesto y se han observado puntos donde se supera la dosis anual de 1 mSv. Aún así, hay que tener en cuenta que para la estimación de la dosis se ha utilizado el valor del factor de equilibrio recomendado por el UNSCEAR para recintos cerrados ($F=4$) y que una variación de este factor podría incrementar la dosis de forma significativa. Por lo tanto, este punto requiere de un estudio más detallado que será abordado en otro proyecto.

Se ha caracterizado el marjal de Peñíscola desde el punto de vista geológico y radiológico, determinando las fuentes de radiación natural y los mecanismos geoquímicos que la producen. En concreto:

- Se ha puesto de manifiesto en este caso, que la descarga de agua subterránea en zonas costeras puede incrementar significativamente las concentraciones de ^{222}Rn en el medio ambiente, aunque no se ha encontrado ninguna situación de riesgo.
- Se han estudiado los niveles de radiactividad en diferentes seres vivos del marjal y los posibles mecanismos de producción de daño biológico debido a la radiación. Se ha observado cómo la descarga de agua subterránea, proveniente del acuífero del Maestrazgo, tiene un impacto claro en el ecosistema estudiado.

Se han desarrollado diversos protocolos de actuación basados en los resultados obtenidos durante la vigilancia ambiental exterior e interior, poniendo especial énfasis en la de dosimetría de área para personal expuesto a radiación natural.

Los resultados obtenidos en este estudio han generado una serie de beneficios que se pueden englobar en tres áreas: beneficios socio-económicos, beneficios técnicos y beneficios académicos. En concreto:

- Desde el punto de vista técnico, la adecuación de los sistemas de detección, tanto los basados en detectores activos como en pasivos, a condiciones de medida diferentes a las que inicialmente se han calibrado, han permitido dar un paso significativo para el control de la vigilancia radiológica ambiental en áreas o instalaciones sometidas a niveles de radiactividad ambiental elevadas y en condiciones extremas (p.e. alto contenido en polvo, humedad,...). Los protocolos y artículos generados sobre la medida y forma de proceder permiten, tanto a los posibles usuarios como a la Administración,

poder utilizar correctamente detectores para las medidas de radiación natural como radón o radio.

- Uno de los principales beneficios técnicos del trabajo realizado es que se puede aplicar a la modificación del RD 783/2001 con el RD 1439/2010 sobre el control de las industrias NORM y el tipo de informes y medidas que se deberán realizar para proteger a los trabajadores. Uno de los puntos claves de esta nueva legislación y de las guías e instrucciones del CSN (p.e. IS-33) son las medidas y los controles de radón que deberán llevar a cabo dichas instalaciones. Algunas de las instalaciones que deben registrar sus actividades tendrán que realizar medidas de ^{222}Rn en condiciones extremas de temperatura y/o humedad. En este trabajo se ha puesto de manifiesto que los detectores pasivos de Rn utilizados, en lugares con las condiciones extremas indicadas, necesitan un control exhaustivo, ya que diversos parámetros externos pueden modificar el resultado de las medidas realizadas.
- Desde el punto de vista socio-económico, el proyecto realizado ha permitido establecer procedimientos y documentos técnicos que permiten conocer la efectividad de los detectores de radiación en condiciones extremas y minimizar, así, las posibles dosis que recibe el público y los trabajadores por radiación natural. Hay que tener presente que las instalaciones, donde se realicen los estudios propuestos en este proyecto (minas-museo, balnearios e industrias), son las primeras beneficiadas tanto a nivel de trabajador como de usuario por los resultados obtenidos. Este hecho permitirá a los gestores de estas instalaciones establecer unos protocolos de trabajo y actuación que es de esperar deriven en idear sistemas (naturales o artificiales) de mitigación de los niveles de radiación ambiental.
- Desde el punto de vista académico, el proyecto ha permitido a dos estudiantes de la UAB realizar sus tesis doctorales en el marco de los objetivos que en este se han establecido (ver punto 6. Publicaciones). También ha permitido el desarrollo de siete proyectos de final de grado o carrera. Así pues, se ha formado a nuevo personal especialista en la medida y cuantificación de radiactividad natural en condiciones normales y extremas.
- La explotación científica de los resultados ha permitido publicar en revistas nacionales e internacionales de prestigio. A día de hoy, ya hay 4 artículos publicados y otros 3 artículos enviados. Asimismo, se han realizado varias presentaciones en congresos nacionales e internacionales.

VI. Publicaciones y otros documentos

VI.1. TESIS DOCTORALES

- Moreno Baltà, Victòria, 2012. El Radó en Activitats Laborals: Instrumentació, Protecció Radiològica I Geologia. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. ISBN: 9788449030499.
- Rodellas i Vila, Valentí, 2014. Evaluating submarine groundwater discharge to the mediterranean sea by using radium isotopes. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. ISBN: 9788449049255.

VI.2. PUBLICACIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS

- Moreno, V., Baixeras, C., Font, Ll., 2012. "Experimental study on the effect of high humidity environments on the response of long-term exposed nuclear track detectors". *Radiation Measurement*, 50, 207-211.
- Rodellas, V., Garcia-Orellana, J., Garcia-Solsona, E., Masqué, P., Dominguez, J.A., Ballesteros, B.J., Mejías, M., Zarroca, M., 2012. Quantifying groundwater discharge from different sources into a Mediterranean wetland by using ^{222}Rn and Ra isotopes. *Journal of Hydrology* 466 – 467, 11 – 22.
- García-Orellana, J., Rodellas, V., Casacuberta, N., López-Castillo, E., Vilarrasa, M., Moreno, V., García-Solsona, E. and Masqué P., 2013. Submarine groundwater discharge: natural radioactivity accumulation in a wetland ecosystem. *Marine Chemistry*, 156, 61-72.
- Zarroca, M., Linares R., Rodellas, V., García-Orellana, J., Roqué, C., Bach, J., Masqué, P., 2014. Delineating coastal groundwater discharge in a wetland area by using high resolution electrical resistivity imaging. *Hydrological Processes*, 28 (4), 2382-2395.
- Moreno, V., Font, Ll. Baixeras, C., García-Orellana, J., Bach, J., Grossi, C., Vargas, A.. Effectiveness analysis of filters used with radon detectors under extreme environmental conditions for indoor/outdoor long-term exposures. *Physics Procedia* (Aceptado).
- Mulas, D., García-Orellana, J., Casacuberta, N., Hierro, A., Moreno, V., Masqué, P. Dose assessment to workers in a Dicalcium Phosphate Production Plant. En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*.
- García-Orellana, J., López-Castillo, E., Casacuberta, N., Rodellas, V., Masqué, P., Carmona-Catot, G, García-Berthou, E., Vilarrasa, M. Bioaccumulation of ^{210}Pb and ^{210}Po in fish tissues due to groundwater-driven inputs of naturally-occurring radionuclides. En revisión en *Journal of Environmental Radioactivity*.

VI.3. PROCEDIMIENTOS NORMALIZADOS DE TRABAJO

Se ha procedido a desarrollar una serie de Procedimientos Normalizados de Trabajo (PNT), para los detectores pasivos de radón, siguiendo la normativa recomendada por la ISO. A estos PNT le acompañan formularios que deben utilizarse durante la medida. A continuación se presentan los códigos y títulos de estos documentos que se encuentran archivados en la Unidad de Física de las Radiaciones a disposición del CSN.

VI.3.1. Formularios

- UFR.001.01.- Hoja de control y guía del revelado de los detectores de Makrofol.
- UFR.002.00.- Registro de lectura de PNT y propuesta de modificaciones.
- UFR.003.00.- Ficha de identificación del dosímetro.
- UFR.004.00.- Carta de envío de resultados.

VI.3.2. PNT

- UFR.PT.0001.00.- Limpieza, ensamblaje, etiquetado y almacenamiento de los dosímetros.
- UFR.PT.0002.00.- Envío, control, reclamación, recepción y almacenamiento de los dosímetros expuestos.
- UFR.PT.0003.00.- Valoración ácido-base de las disoluciones de Hidróxido de Potasio (KOH 6 N y KOH 0.25 N).
- UFR.PT.0004.00.- Revelado químico y electroquímico.
- UFR.PT.0005.00.- Lectura y análisis de los detectores de Makrofol.

VI.3.3. Trabajos fin de grado/carrera

Se han desarrollado los proyectos de fin de grado/carrera de los siguientes estudiantes:

- Marta Vilarrasa
- Ester López-Castillo
- Marina López
- Daniel Mulas
- Aritz Conde
- David León
- Nerea González

VII. Referencias Bibliográficas

- Font, Ll., Baixeras, C., Moreno, V., 2008. Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia Spain. *Radiat. Meas.* 43, 5467–5470.
- García-Orellana, J., Rodellas, V., Casacuberta, N., López-Castillo, E., Vilarrasa, Moreno, V., García-Solsona, E., Masqué, P., Garcia-Beerthou, E., 2013. Submarine groundwater discharge: Natural radioactivity accumulation in a wetland ecosystem. *Marine Chemistry*, 156, 61–72.
- García-Orellana, J., López-Castillo, E., Casacuberta, N., Rodellas, V., Masqué, P., Carmona, G., García-Beerthou, E., Vilarrasa, M.. Bioaccumulation of ^{210}Pb and ^{210}Po in fish tissues due to groundwater-driven inputs of naturally-occurring radionuclides. Enviado a *Journal of Environmental Radioactivity*.
- Grossi, C., Arnold, D., Adame, J.A., Lopez-Coto, I., Bolívar, J.P., de la Morena, B.A., Vargas, A., 2012. Atmospheric ^{222}Rn concentration and source term at El Arenosillo 100 m meteorological tower in southwest Spain. *Radiat. Meas.* 47 (2), 149–162.
- ICRP 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115, Ann.ICRP 40 (I).
- Instrucción IS-33 de 21 de diciembre de 2011 del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección a la radiación natural (B.O.E. nº 22 de 26 de enero de 2012)
- Monnin, M., Seidel, J.L., 1998. An automatic radon probe for earth science studies. *J. Appl.Geophys.* 39, 209–220.
- Moreno, V., Baixeras, C., Font, Ll., 2013. Experimental study on the effect of high humidity environments on the response of long-term exposed nuclear track detectors. *Radiation Measurement*, 50, 207-211.
- Moreno, V., Font, Ll. Baixeras, C., García-Orellana, J., Bach, J., Grossi, C., Vargas, A.. 2015. Effectiveness analysis of filters used with radon detectors under extreme environmental conditions for indoor/outdoor long-term exposures. *Physics Procedia* 80, 113–116.
- Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes aprobado por Real Decreto 783/2001 de 6 de julio (BOE nº 279 de 138 de noviembre de 2010).
- Rodellas, V., García-Orellana, J., García-Solsona, E., Masqué, P., Domínguez, J., Ballesteros, B.J., Mejias, M., Zarroca, M., 2012. Quantifying groundwater discharges from different sources into a Mediterranean wetland by using ^{222}Rn and Ra isotopes. *Journal of Hydrology* 466–467, 11–22.
- Szegvary, T., Conen, F. and Ciais, P., 2009. European ^{222}Rn inventory for applied atmospheric studies. *Atmos. Environ.*, 43, 1536–1539.
- United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources; Volume II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales Publications E.00.IX.3 and E.00.IX.4, United Nations, New York, 2000.

- United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I. United Nations sales publication E.10.XI.3. United Nations, New York 2010.
- Zarroca, M., Linares, R., Rodellas, V., Garcia-Orellana, J., Roqué, C., Bach, J., Masqué, P., 2014 Delineating coastal groundwater discharge in a wetland area by using high resolution electrical resistivity imaging. *Hydrological Processes*, 28(4), 2382–2395.

Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica ambiental y de
medida de radón en condiciones ambientales extremas

Colección Documentos I+D
22.2016