

CONTENIDO DE RADÓN EN AIRE EN LA GRUTA DE LAS MARAVILLAS (ARACENA): PRIMEROS RESULTADOS

RADON GAS CONTENT IN THE GRUTA DE LAS MARAVILLAS (ARACENA): FIRST RESULTS

Ismael Fuente (1), Luis Santiago Quindós (1), Luis Quindós (1), Wenceslao Martín-Rosales (2), Manuel López-Chicano (2) & José Benavente-Herrera (2)

(1) Grupo Radon, Universidad de Cantabria, Santander, España;

(2) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, España.

E-mail: funtei@unican.es; quindosl@unican.es; quindosll@unican.es.

Resumen

En las cavidades se suelen encontrar elevadas concentraciones de gas Radón, debido fundamentalmente a la baja tasa de ventilación que suele darse en este tipo de ambientes. Durante el periodo 2011-2013 se ha llevado a cabo un seguimiento del contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes, que exige la caracterización de este tipo de gas en las cuevas turísticas, entre otros tipos de actividades. Los valores corresponden a concentraciones en aire (Bq/m³), y no se ha tenido en cuenta la fracción libre de Rn relacionada con las partículas o aerosoles. En concreto se ha llevado a cabo el seguimiento mensual en 10 sectores considerados como zonas homogéneas mediante la utilización de detectores pasivos suministrados y analizados en el laboratorio acreditado del Grupo de Investigación de Radón de la Universidad de Cantabria. En función de los resultados obtenidos y a partir del análisis estadístico de los datos, se considera como valor medio de concentración (y por tanto como valor de referencia) de gas Radón en la Gruta de las Maravillas, 1349 Bq/m³, con una variabilidad temporal muy elevada. La evolución mensual observada es muy similar a la tendencia estacional del contenido en anhídrido carbónico del aire de la cavidad, de forma que los máximos ocurren durante el periodo estival, mientras que los mínimos tienen lugar durante los meses de diciembre y enero. Teniendo en cuenta el tiempo de permanencia en el interior de la cavidad de los trabajadores adscritos a la Gruta (guías), y aplicando los criterios epidemiológicos del ICRP65, la dosis anual máxima recibida por los mismos es 4,112 mSv, en ningún caso superior a los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33.

Palabras-Clave: Aracena; Gruta de las Maravillas; gas radón, dosis efectiva; anhídrido carbónico.

Abstract

The cavities typically have high concentrations of radon gas, mainly due to the low ventilation rate that usually occurs in such environments. During the period 2011-2013 has been carried out the monitoring of the content of radon in air in various sectors of the Cave of Marvels, in order to comply with recent regulations related to ionizing radiation, which requires the characterization of this type gas in tourist caves, among other activities. The values correspond to concentrations in air (Bq /m³), and was not taken into account the free fraction of Rn related with aerosols. Specifically we monitored the concentration of radon in 10 sectors considered as homogeneous zones using passive detectors supplied and analyzed in the laboratory of the Radon Research Group (University of Cantabria). The average value of radon gas concentration calculated in the Cave of Marvels is 1349 Bq/m³, with a very high temporal variability. The monthly pattern observed is very similar to the seasonal trend of the carbon dioxide content of the air in the cavity, so that the maximum occurs during the summer, while minimum occurring during the months of December and January. Considering the time spent within the cavity of the guides, and applying epidemiologic criteria (ICRP-65), the maximum annual dose received by them is 4,112 mSv (below the level established by Instruction I-33).

Key-Words: Aracena; Cave of Marvels; Radon gas; effective dose; carbonic anhydride.

1. INTRODUCCIÓN

El radón es un gas, incoloro, inodoro e insípido, que forma parte en una pequeña proporción

de la composición del aire atmosférico. Aislado por primera vez en 1908, es un elemento gaseoso procedente de la desintegración del radio que, a su

vez, es un producto de desintegración de la cadena del uranio presente en la corteza terrestre. Se identifica concretamente como radón al isótopo ^{222}Rn que forma parte de la cadena radiactiva de origen natural del ^{238}U uranio, aunque también se encuentran isótopos de Rn en la del ^{232}Th torio y del ^{235}U uranio (^{220}Rn o torón y el ^{219}Rn o actinón, respectivamente). La toxicidad del radón se debe a su radiactividad. Al ser un emisor de radiación alfa, el riesgo potencial surge cuando penetra en el organismo, ya sea por inhalación y pudiendo instalarse en las paredes del tracto respiratorio, o por ingestión, adhiriéndose a las paredes del tracto digestivo. El radón es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Al tratarse de un producto de la desintegración del uranio, su existencia en un área concreta está condicionada íntimamente con la cantidad de dicho elemento presente en la corteza, que a su vez depende del tipo de roca que aflora en dicha región. Así, en suelos (no son más que materiales procedentes de la meteorización de rocas) y rocas basálticas es frecuente encontrar concentraciones del orden de 1 ppm en ^{238}U uranio; en areniscas y rocas carbonatadas son normales valores del orden de 0.5 ppm; las arcillosas y graníticas poseen valores próximos a 3.5 ppm, mostrando estas últimas un mayor potencial emisor de radón. Los lugares poco ventilados suelen presentar elevadas concentraciones de Rn en aire, especialmente en minas y cuevas. En general, el contenido en radón en el aire de las cavidades suele ser muy elevado en relación con el aire exterior

La dinámica del Rn y las transferencias entre los distintos sectores de la zona vadosa del karst dependen de la interrelación entre una serie de factores externos (gradiente térmico entre el interior y el exterior, velocidad del aire, humedad, diferencias de presión atmosférica, entre otros), e internos, tales como la geomorfología de la cavidad, porosidad (se incluye aquí el grado de fracturación y karstificación) y el contenido en Ra de los sedimentos y la roca (Kies *et al.*, 1997, ISRN, 2009). En las cavidades de origen kárstico, los sedimentos arcillosos que recubren el suelo (frecuentemente residuos insolubles contenidos originariamente en la roca caliza), constituyen en general una fuente potencial de radón, ya que la roca caliza no suele presentar en general valores importantes de Rn. El agua puede no obstante ser un vector importante de transferencia del Rn, bien a partir de la percolación del agua de lluvia a través del suelo y las discontinuidades del macizo, lo que permite el

transporte del Rn hacia zonas profundas, o bien a partir de procesos de desgasificación.

Son muy numerosos los trabajos publicados en relación con el contenido en radón en cavidades, especialmente los encaminados a determinar su potencial riesgo para los trabajadores, en el caso de cuevas turísticas (Dueñas *et al.*, 1998; Galán-López *et al.*, 2004; Quindós *et al.*, 2004; Field, 2007; Sainz *et al.*, 2007), o bien dirigidos al estudio del radón como indicador cuantitativo de la ventilación de la cavidad y su uso como trazador ambiental (Fernández *et al.*, 1986 y Quindós *et al.*, 2013).

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir del seguimiento del contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, durante el periodo 2011-2013, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes, que exige la caracterización de este tipo de gas en las cuevas turísticas, entre otros tipos de actividades.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las medidas se realizaron en la Gruta de las Maravillas, una de las cuevas turísticas más visitadas de España. Se trata de una cavidad desarrollada en mármoles de edad precámbrica con un recorrido predominantemente horizontal (2150 m de galerías conocidas), aunque existen al menos tres niveles de galerías superpuestos (Martín-Rosales *et al.*, 1995).

La temperatura del aire de la Gruta oscila entre 15° C y 19° C, dependiendo del sector considerado. Los mayores valores se registran en las zonas más alejadas de la entrada, coincidiendo además con los valores más elevados de concentración en aire de anhídrido carbónico. Los impactos ambientales producidos por la acción antrópica han sido descritos y analizados en diversos trabajos (Pulido-Bosch *et al.*, 1997). En general se trata de afecciones en el agua (descenso del nivel de los lagos por extracciones en sondeos próximos), el aire (incremento de la temperatura del aire y de la concentración de CO₂ y descenso de la humedad relativa del aire) y la roca. A partir de los estudios realizados se propusieron diversas medidas correctoras que han surtido efectos positivos en el microclima de la cavidad (Martín-Rosales *et al.*, 2007)

La medida de la concentración de Rn en aire se llevó a cabo mediante la utilización de detectores pasivos, tipo CR39, que es un polímero plástico denominado técnicamente allyl diglycol carbonate desarrollado por Columbia Resins en 1940. que permiten obtener información sobre concentraciones

promedio durante un tiempo que puede llegar a días, semanas o meses. Son los métodos menos caros y los más utilizados ya que son los más adecuados para estudios de inspección y reconocimiento y los que permiten, en muchos casos, decidir sobre la conveniencia de tomar acciones correctoras tras efectuar medidas de, por lo menos, tres meses de duración. Los periodos de registro de los detectores instalados han variado desde 1 mes hasta más de tres meses en algunos casos. En la Figura 1 se recogen algunas fotografías de diversos detectores instalados en la Gruta.

Se estableció un protocolo de medida y toma de datos, que fue suministrado al personal adscrito a la Gruta de las Maravillas. El protocolo, muy simple establecía las siguientes indicaciones:

- a. Definición y ubicación de los puntos de muestreo
- b. Fecha de inicio de medidas

c. Instalación de detectores

d. Recogida de datos.

e. Envío de detectores.

Para llevar un control adecuado de la toma de datos, el responsable de la retirada de los detectores rellenaba una ficha en donde se indicaba toda la información requerida. En concreto se indica el código de detector, día de instalación, día de retirada, identificación del punto de muestreo e incluso la fecha de envío al laboratorio acreditado de la Universidad de Cantabria. Finalmente, desde el laboratorio donde se realizaron las determinaciones de Radón en los detectores, se suministraron los resultados en formato digital, mediante ficheros excell. Junto a las determinaciones se adjuntaba, en cada medida, el valor de la incertidumbre experimental, así como el límite de detección de cada detector.



Figura 1.- Fotografías de algunos de los detectores pasivos de Radón instalado en la Gruta de las Maravillas, facilitados por la Universidad de Cantabria.

La red de detectores se estableció en 10 sectores de la Gruta en las que las características térmicas eran más o menos homogéneas, y que aparecen recogidas en la Figura 2.

Finalmente, la estimación de la dosis efectiva proveniente de la inhalación de radón se utilizó la metodología recomendada por el ICRP65. El procedimiento de cálculo utilizado para la estimación de la dosis efectiva en la Gruta de las Maravillas se resume en la expresión:

$$E = f (C_{Rn}, t, F, DCF)$$

Donde

E es la dosis efectiva,

C_{Rn} es la concentración de Radón,

t es función del tiempo de exposición del trabajador/a frente al Rn ,

F es el factor de equilibrio y

DCF es el factor de conversión a dosis antes definido. Analíticamente la expresión es

$$E = \frac{C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot DCF}{170 \cdot 3700} \quad (1)$$

DCF es el Factor de Conversión de Dosis, con un valor adoptado de 5 mSv/WLM

Donde

C_{Rn} es la concentración de Rn en Bq/m³

F es el Factor de equilibrio, con un valor adoptado de 0,5

t tiempo de permanencia del trabajador en esas condiciones, recogido por las hojas de control establecidas al efecto por la dirección de la Cueva.

En la Figura 3 se representa gráficamente la secuencia de trabajo, que comienza con la lógica determinación de la concentración de Rn en aire, tras la cual se ha procedido a la estimación de las horas de trabajo de los guías adscritos a la Gruta, para finalmente calcular la correspondiente dosis efectiva recibida a escala anual.

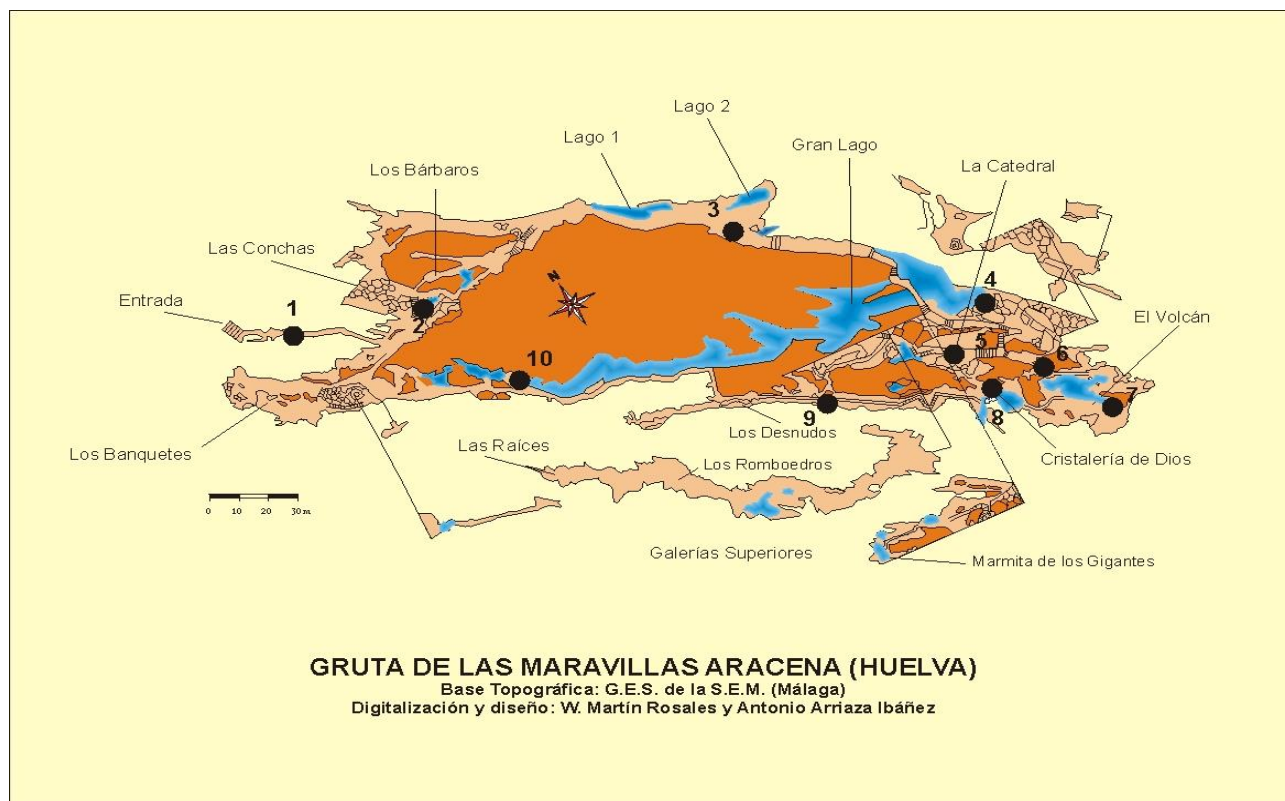


Figura 2.- Localización de los detectores de Radón instalados en la Gruta de las Maravillas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Rn

Hay que indicar que la fracción libre relacionada con el número de partículas en aire no se ha considerado. Se realizó un análisis mensual, para tratar después de analizar los valores promedio a nivel anual. Hay que indicar que existen lagunas de datos, especialmente en el año 2012. En el año 2011 faltan datos correspondientes a dos meses (abril y junio), si bien y como se podrá comprobar, la tendencia, muy regular a nivel mensual, permite realizar un completado de la serie mensual con un elevado margen de seguridad (desde una perspectiva estadística). Durante 2012 se disponen de medidas muy escasas y dispersas. Además, se trata de

medidas efectuadas durante periodos superiores al mes. En concreto, se instalaron detectores pasivos que permanecieron de forma ininterrumpida durante los periodos agosto-octubre y noviembre-diciembre de ese año. Los resultados son sensiblemente inferiores a los registrados durante el año 2011.

Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad espacial y temporal de la concentración de gas radón en el aire de la cavidad.

Utilizando toda la serie de datos disponibles (periodo 2011 a 2013), se han podido calcular valores promedio para cada uno de los meses. A efectos comparativos, se han estimado los parámetros estadísticos de dos series mensuales de concentración de radón en aire alternativas. Se trata, por un lado, del análisis estadístico de toda la serie

de datos disponible, así como de la serie correspondiente al año 2011. En ésta última, dada la marcada tendencia de la serie, ha sido relativamente fácil proceder al completado de los datos ausentes, a través del promedio de los datos anterior y posterior. En la tabla 1 adjunta se muestran los datos correspondientes a la serie de 2011, incluyendo en color rojo los datos completados.

En la Tabla 2 se muestran, junto a los valores promedio calculados, los correspondientes intervalos de confianza al 95 %. Los coeficientes de variación calculados son elevados en la serie completa (2011 a 2013), oscilando entre el 20 % y el 70 %, mientras que en el caso de la serie de 2011 estos valores se reducen sensiblemente.

Otro aspecto interesante es la variación intra-anual de la concentración en aire del gas radón. Así, en la Figura 3 se muestran sendos diagramas de cajas (Figura 4) correspondientes a cada una de las series analizadas. Aunque ambas presentan la misma tendencia general, en la gráfica correspondiente al periodo 2011-2013 se observa, a parte de una mayor variabilidad antes comentada, un cierto desvío de la tendencia durante el mes de mayo. En la serie correspondiente a 2011, sin embargo, la concentración registrada durante el mes de septiembre parece desviarse de la tendencia general. De cualquier modo, parece clara la evolución

estacional de la concentración de radón a lo largo del año, con valores máximos durante el periodo estival, mientras que los mínimos se registran durante el invierno.

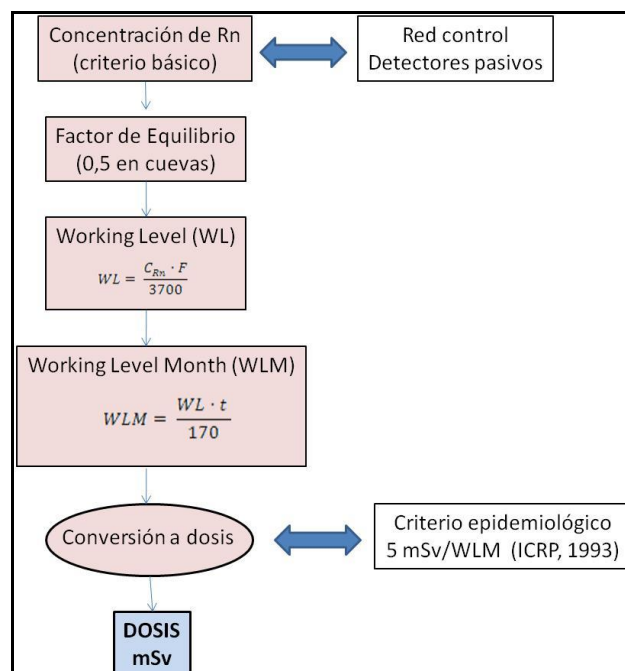


Figura 3.- Resumen esquemático del procedimiento de estimación de dosis recibidas por los trabajadores de la Gruta de las Maravillas.

Tabla 1. Serie completada correspondiente al año 2011 (en rojo, valores completados)(Bq/m3)

ZONA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Galería de Entrada	105,3	146,6	286,4	1279,7	2272,9	2478,6
Las Conchas	211,6	423,2	705,9	1390,7	2075,4	2427,8
Estalactita/ La Codorniz	322,0	323,6	555,9	1392,0	2228,0	2403,6
Gran Lago	428,8	321,2	579,5	1406,2	2232,9	2616,6
La Catedral	391,4	319,3	445,8	1352,3	2258,8	2471,8
La Sultana	260,2	328,5	610,5	1326,2	2041,9	2477,1
La Esmeralda	289,9	311,9	616,4	1706,6	2796,7	2905,7
Cristalería de Dios	196,1	359,3	596,8	1369,1	2141,4	2530,0
Los Desnudos	338,0	353,1	611,5	1177,1	1742,6	2392,9
Galería de los Lagos	139,1	477,3	595,3	1593,7	2592,2	2628,4

ZONA	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Galería de Entrada	2684,2	2638,7	1992,5	820,8	822,5	1242,0
Las Conchas	2780,2	3440,4	2867,0	1077,9	343,6	623,0
Estalactita/ La Codorniz	2579,2	2964,4	2667,5	829,5	298,7	513,0
Gran Lago	3000,3	2543,4	2900,0	879,3	228,3	438,0
La Catedral	2684,7	2979,1	2685,8	882,5	250,5	430,0
La Sultana	2912,4	1919,7	3011,5	849,0	180,7	133,0
La Esmeralda	3014,6	3035,6	3142,4	942,1	258,6	153,0
Cristalería de Dios	2918,6	2628,7	2596,3	905,3	215,3	76,0
Los Desnudos	3043,3	2772,7	2941,4	628,7	310,6	186,0
Galería de los Lagos	2664,6	2958,1	3162,3	758,6	184,5	220,0

Tabla 2.- Tabla resumen de los valores promedio, con sus respectivos intervalos de confianza al 95 % (valores expresados en Bq/m³).

MES	PERIODO 2011/2013			PERIODO 2011		
	Media	Límite Inferior	Límite superior	Media	Límite Inferior	Límite superior
ENERO	251,7	204,8	298,6	268,2	192,5	344,0
FEBRERO	278,5	229,2	327,8	336,4	275,3	397,5
MARZO	390,5	295,9	485,1	560,4	477,6	643,2
ABRIL	220,6	153,8	287,4	1399,3	1291,5	1507,2
MAYO	3205,8	2628,1	3783,5	2238,3	2030,5	2446,0
JUNIO	1445,1	1262,3	1627,9	2533,2	2423,4	2643,1
JULIO	3429,8	3106,9	3752,8	2828,2	2707,0	2949,4
AGOSTO	2724,7	2357,9	3091,5	2788,1	2501,4	3074,7
SEPTIEMBRE	2460,5	2199,1	2721,8	2796,7	2552,1	3041,2
OCTUBRE	1198,5	1048,8	1348,1	857,4	773,6	941,1
NOVIEMBRE	276,6	222,4	330,9	309,3	174,8	443,8
DICIEMBRE	308,4	221,6	395,1	401,4	152,5	650,3
PROMEDIO	1349,2	615,1	2083,4	1443,1	739,7	2146,4

Los valores máximos se registran en el sector más alejado de la entrada (Sala de la Esmeralda o del Volcán), si bien también el promedio registrado en las Conchas (muy próxima a la entrada) registra sistemáticamente valores muy elevados en comparación con el resto de los sectores analizados.

Concentración de Rn vs concentración de CO₂

La evolución mensual observada es en cierta medida bastante similar a la tendencia estacional del contenido en anhídrido carbónico del aire de la cavidad, tal y como sugiere la Figura 5, que corresponde a los valores medios, máximos y mínimos de este gas (en ppm) registrados durante el año 2010 en la Cristalería de Dios (no existen datos correspondientes a 2011). Se aprecia, al igual que ocurre con el radón, una tendencia ascendente a medida que avanza el año, de forma que los máximos ocurren durante el periodo estival (no existen registros correspondientes al mes de agosto), mientras que los mínimos tienen lugar durante los meses de diciembre y enero. No obstante, hay que indicar que en este caso esta variable está muy condicionada por la afluencia de visitantes.

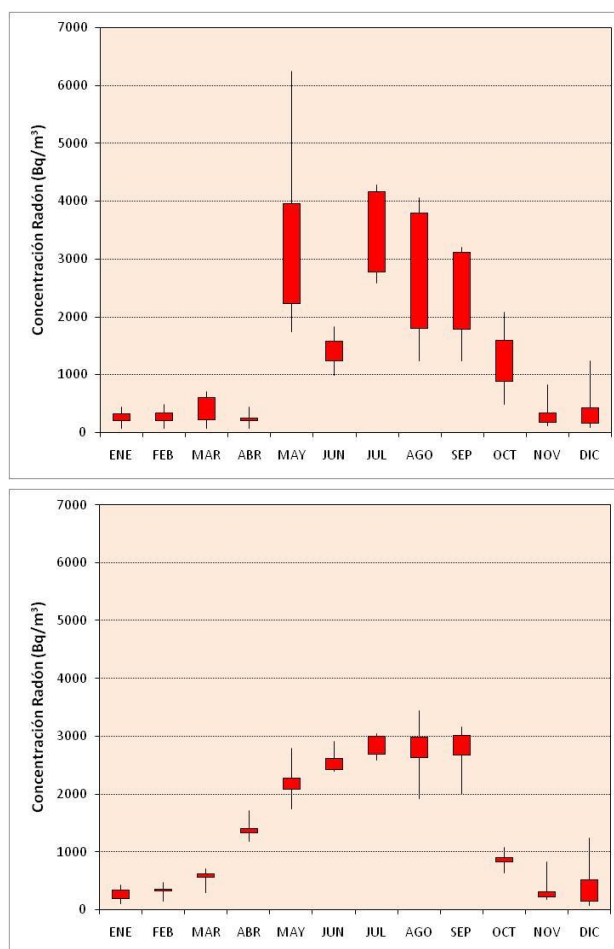


Figura 4. Gráficos box plot (cajas) de las series de concentración de gas radón en aire correspondientes al periodo 2011-2013 (superior) y al periodo 2011 (inferior)

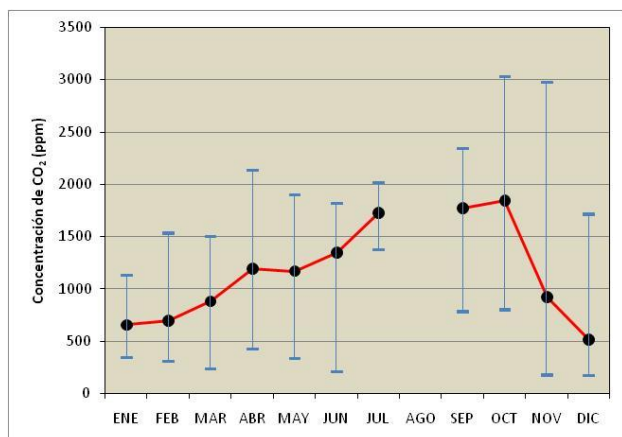


Figura 5.- Valores medios, máximos y mínimos de concentración de anhídrido carbónico registrados en la Cristalería de Dios durante el año 2010. No existen registros durante el mes de agosto.

La correlación es relativamente significativa entre las concentraciones mensuales medias de radón y anhídrido carbónico, incluso a pesar de corresponder a registros de años diferentes, tal y como se puede observar en la Figura 6. Dicha correlación es muy elevada si se prescinde del dato correspondiente al mes de octubre, mes por otro lado caracterizado por una elevada afluencia de visitantes, que provoca concentraciones de anhídrido carbónico anómalamente elevadas.

La explicación de esta tendencia del contenido en radón puede ser la misma que justifica la evolución de la concentración de anhídrido carbónico (Martín-Rosales et al., 2010). Los valores mínimos se registran durante el invierno, precisamente en el periodo durante el cual las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior son máximas. La temperatura del exterior es mucho más baja que en el interior de la cavidad, y ello podría provocar la entrada del aire denso y frío en la cueva desplazando el aire del interior. Durante la primavera, y concretamente a finales de mayo, se produce un fenómeno de inversión térmica, de modo que la temperatura exterior llega a superar a la del interior. En este periodo, durante el cual el CO₂ se ha mantenido relativamente constante y con valores inferiores a 1.500 ppm, comienza a aumentar de forma prácticamente constante hasta alcanzar sus máximos en el mes de agosto. Esta tendencia ascendente podría explicarse por las elevadas temperaturas del exterior (y superiores a la temperatura de la cueva), que impedirían la entrada de aire del exterior menos denso y por tanto provocarían un progresivo aumento de la concentración de CO₂ y acumulación de gas Rn.

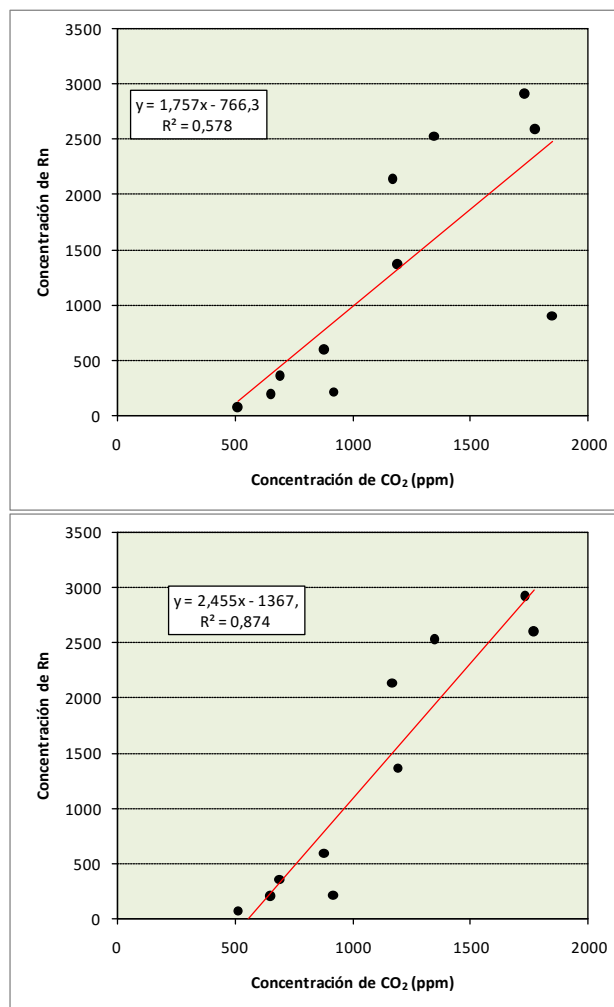


Figura 6.- Gráficos de correlación entre el contenido en Rn registrado en la Cristalería de Dios durante 2011 y el contenido medio en anhídrido carbónico registrado durante 2010.

Estimación de las dosis efectivas

En lo referente a las dosis efectivas, y a falta de cualquier criterio que permita seleccionar una serie de las analizadas, se ha optado por considerar como serie tipo para las estimaciones dosimétricas la correspondiente a todo el conjunto de observaciones realizadas, es decir, la serie constituida por el periodo comprendido entre 2011 y 2013. Por lo tanto el valor de referencia adoptado ha sido 1349 Bq/m³

En la tabla 3 se muestra el resultado de la estimación de las dosis recibidas cada mes, así como del total recibida por año, tanto para los trabajadores fijos como para los eventuales, estimadas según el procedimiento descrito en párrafos precedentes. Como puede deducirse de la tabla, en las que las estimaciones dosimétricas están referidas a los valores promedio, en el caso de la dosis recibida por los trabajadores fijos, el valor obtenido es 4,112 mSv, inferior por tanto a los 6 mSv a los que hace referencia la Instrucción I-33. En el caso de los

trabajadores eventuales, lógicamente es mucho menor (1,860 mSv).

En lo referente a trabajadores fijos, destacan por su valor relativamente elevado (aunque siempre inferior a 0,9 mSv) los meses de mayo, julio, agosto y septiembre, si bien durante los 8 meses restantes, la dosis recibida es muy baja, casi nunca superior a 0,1 mSv. En el caso de los trabajadores eventuales, la mitad del año la dosis mensual es inferior a 0,1 mSv, y nunca se superan los 0,4 mSv.

Teniendo en cuenta el criterio de concentración de gas radón adoptado (1349 Bq/m³), el número máximo de horas que podrían permanecer en el interior de la cavidad los trabajadores (con el protocolo de entradas vigente), sin que se superaran los 6 mSv por año de dosis recibida sería de 1119 horas, o lo que es igual, un promedio de 93,3 horas por mes, lo cual es el resultado de aplicar la expresión (1) anteriormente referida, tomando esta vez el tiempo como variable a determinar.

Tabla 3. Estimaciones de dosis mensuales (mSv) con indicación de los valores anuales.

2011-2013	CONCENTRACIÓN RADÓN			DOSIS RECIBIDA (mSv)			
MES	Media	Límite Inferior	Límite superior	FIJOS		EVENTUALES	
	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	HORAS	DOSIS	HORAS	DOSIS
ENERO	251,7	204,8	298,6	63,9	0,064	28,9	0,029
FEBRERO	278,5	229,2	327,8	63,9	0,071	28,9	0,032
MARZO	390,5	295,9	485,1	63,9	0,099	28,9	0,045
ABRIL	220,6	153,8	287,4	63,9	0,056	28,9	0,025
MAYO	3205,8	2628,1	3783,5	63,9	0,814	28,9	0,368
JUNIO	1445,1	1262,3	1627,9	63,9	0,367	28,9	0,166
JULIO	3429,8	3106,9	3752,8	63,9	0,871	28,9	0,394
AGOSTO	2724,7	2357,9	3091,5	63,9	0,692	28,9	0,313
SEPTIEMBRE	2460,5	2199,1	2721,8	63,9	0,625	28,9	0,283
OCTUBRE	1198,5	1048,8	1348,1	63,9	0,304	28,9	0,138
NOVIEMBRE	276,6	222,4	330,9	63,9	0,070	28,9	0,032
DICIEMBRE	308,4	221,6	395,1	63,9	0,078	28,9	0,035
PROMEDIO	1349,2	615,1	2083,4	767	4,112	347	1,860

4. CONCLUSIONES

Se ha registrado durante el periodo 2011-2013 el contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes. Se trata de los primeras medidas de concentración de este gas realizadas en la Gruta de las Maravillas. Los valores corresponden a concentraciones en aire (Bq/m³), y no se ha tenido en cuenta la fracción libre de Rn relacionada con las partículas o aerosoles. En concreto se ha llevado a cabo el seguimiento mensual en 10 sectores considerados como zonas homogéneas mediante la utilización de detectores pasivos suministrados y

analizados en el laboratorio acreditado del Grupo de Investigación de Radón de la Universidad de Cantabria.

En función de los resultados obtenidos y a partir del análisis estadístico de los datos, se considera como valor medio de concentración (y por tanto como valor de referencia) de gas Radón en la Gruta de las Maravillas, 1349 Bq/m³, con una variabilidad temporal muy elevada.

Teniendo en cuenta el tiempo de permanencia en el interior de la cavidad de los trabajadores adscritos a la Gruta (guías), y aplicando los criterios epidemiológicos del ICRP65, la dosis anual máxima recibida por los mismos es 4,112 mSv, en ningún

caso superior a los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33. No obstante, los valores de concentración, que superan los recogidos en dicha normativa (1000 Bq/m^3), obligan a establecer medidas de control y seguimiento de las dosis recibidas por los trabajadores, por otro lado informados ya en varias reuniones sobre esta problemática. Lógicamente, una posibilidad sería la adopción de medidas de tipo estructural o constructiva, encaminadas a reducir la concentración de gas radón; ello se conseguiría de forma relativamente fácil mediante un sistema de ventilación forzada en la cavidad. Sin embargo, cualquier sistema de este tipo alteraría notablemente las condiciones climáticas de la cavidad, afectando con toda seguridad el estado de conservación de los diferentes y frágiles espeleotemas de la cavidad, que constituyen el principal atractivo de la Gruta. Por tanto, esta medida no es viable, pues a medio plazo provocaría la pérdida de los valores estéticos de la Gruta, y probablemente el deterioro irreversible de la misma.

Por todo cuanto antecede, la única solución o medida de control plausible es la adopción de controles de tipo administrativo, consistentes en

controlar el tiempo de permanencia de todos y cada uno de los trabajadores de la Gruta. Dicho control se establecerá a nivel diario, de forma que cada mes se podrá establecer la dosis recibida por cada uno de los trabajadores (a través del tiempo de permanencia y de la concentración de gas radón medida en la Gruta).

Por otra parte, y con el objeto de determinar con precisión el contenido en Radón, se considera importante la instalación de dos equipos de registro continuo de concentración de gas radón en la cavidad, concretamente en los sectores más distanciados entre sí (Sala de Las Conchas y Cristalería de Dios), lo que permitirá cuantificar la gran variabilidad temporal de la concentración de Rn en el aire, así como determinar la tasa de ventilación de la cavidad.

Estas medidas serán complementarias de las que provengan de los detectores pasivos que se mantendrán en las distintas zonas consideradas en el presente estudio. De este modo queda garantizado el seguimiento y cuantificación de la variabilidad espacial (red de control de detectores) y temporal (equipos de registro continuo) de la concentración de gas radón en el aire de la Gruta.

BIBLIOGRAFÍA

- Dueñas, C., Fernández, M.C., Canñete, S., Carretero, J., and Liger, E., 1998. ^{222}Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 501–510.
- Galán-López, M., Martín-Sánchez, A., and Gómez Escobar, V., 2004. Estimates of the dose due to ^{222}Rn dissolved in water. *Radiation Protection Dosimetry*, 111: 3–7.
- International Commission on Radiological Protection, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work, Pergamon Press; ICRP Publication 65, Oxford, 1993, Ann. ICRP 23 (2) 1993.
- ISRN, 2009. Guide méthodologique de mesure de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains. Rapport DEI/SARG/2009-020. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France, 19 p.
- Fernández, P.L., Gutiérrez, I., Quindós, L.S., Soto, J. y Villar, E. 1986. Natural ventilation of the Paintings Room in the Altamira Cave. *Nature*, 321, 586–588.
- Field, M.S., 2007. Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing alpha radiation from Rn-222 decay in caves. *Journal of Cave and Karst Studies* 69 (1): 207–228.
- Kies, A., Massen, F., Feider, M., 1997. Measuring radon in underground locations. In: Virk, H.S. (Ed.): *Rare Gas Geochemistry*. Guru Nanak Dev University, Amritsar, pp. 1–8
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Pulido-Bosch, A. 1995. Morfología, espeleotemas y climatología de la Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva). *Espeleotemas*, 5:1–12.

- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Cerón, J.C. ,2007. Efectos de las medidas de protección ambiental en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). In: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (Eds.) *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, Madrid, 169-180.
- Martín-Rosales, W. López-Chicano, M. y Caballero, V. (2010). Variación temporal de la concentración de anhídrido carbónico en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, pp. 159-168. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Pulido Bosch, A., Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez Navarro, C.M. y Vallejos, A. 1997. Human impacts in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 311, 142-149.
- Sainz C, Quindós LS, Fuente I, Nicolás J, Quindós L. (2007). Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: the case of tourist caves. *Journal of. Hazardous Materials*, 16;145(3):368-71.
- Quindós, L., Fernández, P., Sainz, C., Gómez-Arozamena, J., Bordonaba, M. (2004). Radon exposure in uranium mining industry vs. exposure in tourist caves. *Radiation Protection Dosimetry*, 111, 41-44.
- Quindos, L.S., Sainz, C., Fuente, I., Gutierrez-Villanueva, J.L., González-Diez, A. (2013). The use of radon as tracer in environmental sciences. *Acta Geophysica*, 61 (4): 848-858.

Editorial flow/Fluxo editorial:

Received/Recebido em: Jan. 2015

Accepted/Aprovado em: Abr. 2015



PESQUISAS EM TURISMO E PAISAGENS CÁRSTICAS

Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

www.cavernas.org.br/turismo.asp

Refrendada por la Asociación de Cuevas Turísticas Iberoamericanas

