

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA
MONOGRAFIAS
N.º 11

CUEVA DE ALTAMIRA

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS
DE LA SALA DE POLICROMOS.
INFLUENCIA DE LA PRESENCIA HUMANA
Y CRITERIOS DE CONSERVACION



MINISTERIO DE CULTURA

DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA
MONOGRAFIAS
N.º 11

CUEVA DE ALTAMIRA

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS
DE LA SALA DE POLICROMOS.
INFLUENCIA DE LA PRESENCIA HUMANA
Y CRITERIOS DE CONSERVACION

MINISTERIO DE CULTURA

DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS
SUBDIRECCION GENERAL DE ARQUEOLOGIA Y ETNOGRAFIA

1.ª edición: Madrid, 1984.
Printed in Spain. Impreso en España.
Edita: Ministerio de Cultura, Dirección General
de Bellas Artes y Archivos.
Subdirección General de Arqueología y Etnología.
Pza. del Rey, 1. 28071 Madrid. Tel.: 429 24 44.
Distribución: San Mateo, 13. 28004 Madrid. Tel.: 448 07 73.
I.S.B.N.: 84-7483-397-3.
Dep. Legal: M-1664-1985.
Imprime: Colomar, s.c.l. Tel.: 619 79 56.

INDICE

La humedad natural de la cueva de Altamira. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, J. R. Solana, J. Soto.	7
La ventilación natural de la sala de pinturas de la cueva de Altamira. Contenido de Radon. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto.	21
Estudio del equilibrio gas carbónico-agua-carbonato cálcico, en las aguas que bañan las pinturas de Altamira. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, J. R. Solana, J. Soto.	35
Influencia de la presencia de visitantes sobre las temperaturas de la sala de policromos. Tiempos de recuperación. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto.	65
Influencia de la presencia de personas en la humedad y en la concentración de anhídrido carbónico en la sala de pinturas de Altamira. Tiempos de recuperación. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto.	81
Influencia de la presencia de personas sobre los procesos de deterioro de la pintura de Altamira. Criterios de conservación. E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto.	95

LA VENTILACION NATURAL DE LA SALA DE PINTURAS DE LA CUEVA DE ALTAMIRA. CONTENIDO DE RADON

**E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, G. Odriozola,
L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto ***

* Departamento de Física Fundamental.
Facultad de Ciencias.
Universidad de Santander.

INTRODUCCION

La ventilación natural de la Sala de Pinturas es uno de los factores más importantes a considerar a la hora de elaborar unos criterios que permitan definir un índice de ocupación para las visitas. En particular, la emisión de anhídrido carbónico y de vapor de agua por los visitantes en un recinto tan pequeño como esta Sala, iría aumentando la concentración en el recinto de estas dos especies moleculares de un modo continuo, proporcional al número de visitantes y al tiempo de permanencia, si no existiese ventilación. El tiempo que necesita la Sala para volver a las condiciones en que estaba antes de la entrada de las visitas, depende en gran parte de esta ventilación natural.

Como índices cualitativos de los intercambios de aire de la Sala con su entorno se han considerado las variaciones temporales que sufren tanto la humedad como el contenido de anhídrido carbónico en la Sala de Pinturas, así como las oscilaciones naturales que experimenta la diferencia de temperaturas existente entre las paredes rocosas y el aire de la Sala.

Como índice cuantitativo de la ventilación natural se ha utilizado la variación que experimenta la radiactividad natural del aire de la Sala, es decir, la concentración del gas radón-222 en relación con las variaciones que experimenta la concentración de este gas radiactivo en el Hall de la Cueva, a través de medidas precisas de la actividad α de muestras de aire.

Con este fin se ha puesto a punto la técnica de medidas de la concentración de este radio núcleo. Las medidas realizadas a lo largo de un año permiten, mediante un sencillo modelo, determinar la ventilación de la Cueva, ya que la cantidad de Rn-222 encontrada en ella dependerá de la exhalación neta desde las superficies rocosas, del volumen de la Sala y del grado de mezcla con el aire exterior.

Por otra parte, las medidas realizadas dando cuenta del contenido de radón en la Sala en las distintas épocas del año nos han permitido calcular los niveles de radiación a que pueden estar expuestos los visitantes y los guías.

ASPECTOS ESPECIALES DE LA VENTILACION DE LA CUEVA

Los movimientos convectivos de las masas de aire de la Cueva dependen de la intensidad de las oscilaciones anuales que experimenta la diferencia de temperaturas existente entre el aire de la Cueva y el aire del exterior, por tanto, de las variaciones térmicas que experimentan las paredes rocosas de la Sala como consecuencia de la onda térmica ¹.

En todos los casos se observa que la especial configuración de la Cueva no favorece precisamente los mecanismos de ventilación natural. En primer lugar, la Boca de la Cueva está situada en una oquedad, en cierto modo amortiguadora de las variaciones que experimentan los factores meteorológicos del exterior. Evidentemente está resguardada de los vientos, pero además las variaciones de temperatura de esa oquedad (exterior a la Cueva) no alcanza la amplitud que se observa en la superficie exterior, de la loma bajo la cual está la Cueva; la misma humedad, por tratarse de una umbría, presenta, en general, valores superiores a la humedad que se registra sobre la loma. El umbral de la Cueva, a pesar de disponer de una puerta metálica, es de tan reducidas proporciones que impide una respuesta directa de la Cueva a las fluctuaciones de los agentes exteriores. La primera Sala que nos encontramos al cruzar el umbral, el Hall y a la izquierda, sin solución de continuidad, la Cocina, constituyen entre ambos un espacioso recinto, cuyas masas de aire responden térmicamente a la onda térmica, con un retraso de un mes respecto a las oscilaciones de temperatura de la misma Boca de la Cueva, separada por la puerta. Experiencias realizadas durante las primeras semanas de nuestro trabajo, con puerta abierta y cerrada, demostraron la pequeña interacción que existía entre el aire del Hall y del exterior.

Pero a todo ello hay que añadir que precisamente las salas de la Cueva que están a más profundidad son aquellas que presentan menor temperatura media anual, hecho que no facilita el movimiento convectivo de las masas de aire, que requiere que el aire más caliente, al tener menor densidad, se desplace hacia alturas superiores, siendo sustituido gravitacionalmente por masas de aire más frío. La temperatura de las diferentes salas, prácticamente constante durante días, y las pequeñas diferencias de temperatura que existen entre ellas, su débil interacción con el exterior, y esta especial configuración de la Cueva, sugieren que la ventilación general de la Cueva se realice a través de células convectivas, originadas en cada sala, de modo que la circulación de aire creada en ellas llega a influir en el movimiento propio de la atmósfera de las salas contiguas, originándose, en esta transmisión, corrientes de aire cuyos desplazamientos no serían explicables al estar el aire más frío situado a más profundidad.

Han sido muy diferentes los índices cualitativos que hemos utilizado para obtener información sobre estos movimientos convectivos del aire ².

Como hemos visto al estudiar el campo de temperaturas de la Cueva ¹, las diferencias de temperaturas existente entre las paredes rocosas y el aire que encierran es un índice de la ventilación de la misma. Cuanto mayor es esta diferencia, tanto mayor es la ventilación. Aunque el estudio que hemos realizado de las variaciones anuales que experimentan estas diferencias de temperatura puede informarnos del movimiento de las masas de aire, sin embargo el resultado que se obtiene es sólo cualitativo. Este análisis nos conduce a asegurar en qué fecha del año el aire está prácticamente estanco. Además, siendo así que el aire caliente circula siempre a ras de los techos, podemos asegurar, a la vista de nuestros datos, que cada vez que se igualan las temperaturas del aire y de las rocas, se invierte el sentido de la circulación del aire caliente en el interior de la Sala.

Los datos obtenidos durante un año para todas y cada una de las salas nos indican que para todas ellas es siempre en primavera y en otoño cuando el aire está prácticamente estanco, encontrando las máximas diferencias de temperatura, o sea, máxima ventilación, en pleno invierno y en pleno verano. Además, la ventilación es menos intensa a medida que las salas están más alejadas de la Boca de la Cueva.

Centrando nuestra atención en la Sala de Pinturas, se ha utilizado, además, otro índice de ventilación que es la concentración del gas carbónico en la atmósfera de la Sala ².

El gas carbónico lo introduce el agua; podríamos decir que lo transporta a un ritmo constante.

Cuando el agua aflora al techo de la Sala se establece un equilibrio entre la concentración del gas carbónico disuelto en el agua y la del gas carbónico de la atmósfera de la Sala. La ley de Henry nos dice que ambas concentraciones son proporcionales entre sí; es decir, si por efecto de la ventilación disminuye la presión parcial del gas carbónico del aire de la Sala, entonces el gas carbónico disuelto en las aguas pasa a la atmósfera del recinto. Las concentraciones del gas carbónico en la Sala han llegado a ser algunas veces, a lo largo de dos años de medida, hasta unas 25 veces mayor que la concentración que presenta este gas en el aire del exterior (0,6 g. por m³).

La concentración media mensual del gas carbónico de la Sala de Polícromos varía también periódicamente a lo largo del año con unos valores máximos relativos del 0,70 y del 0,60 por 100 en volumen, en los meses de mayo y en noviembre-diciembre, y unos mínimos en verano y en febrero del 0,15 y del 0,28 por 100, respectivamente.

Como hay que pensar que, aunque sea a través de las células convectivas citadas, la ventilación depende siempre de la existencia de gradientes de temperatura, se ha estudiado la dependencia de la concentración del gas carbónico de la Sala con el valor absoluto de la diferencia de temperaturas θ existente entre el aire de la Sala y el del Hall, encontrando una ley exponencial decreciente dada por $C = 0,03 + 0,70 \exp [-0,74 | \Delta\theta |]$, de modo que cuando es prácticamente nula esta diferencia de temperaturas, como ocurre en mayo y en diciembre, la concentración del gas es máxima (0,73 por 100), aire estanco, y cuando mayor es la diferencia de temperaturas entre ambas salas, en septiembre y en febrero, más ventilación existe, alcanzando la concentración del gas carbónico valores mínimos que podrían ser muy próximos al del exterior, 0,03 por 100.

Otro factor que hemos utilizado como indicador de la ventilación de la Sala de Pinturas ha sido la humedad³. Es evidente que si realmente se establece una corriente convectiva que comunica las masas de aire del Hall con las de la Sala, debe ocurrir que entre las humedades absolutas y relativas de ambos recintos deben existir relaciones coherentes con los resultados cualitativos encontrados con los otros índices. Y así es, en efecto, en verano; resulta que la presión de vapor en la Sala es del mismo orden que la saturante a la temperatura del techo, es en esa época cuando en el techo, más frío que en el resto del año, puede condensarse el vapor de agua y, según lo dicho, es en esta época cuando más ventilación natural tiene la sala; entonces se deduce que el aire procede del Hall, ya que precisamente durante todo el verano su humedad absoluta sobrepasa, en 1,60 g. de vapor por kilogramo de aire, a la humedad absoluta de la Sala.

En general, para el resto de la Cueva ocurre que las medidas de humedad realizadas (con errores del 1 por 100) demuestran que los valores medios mensuales de las diferencias entre la presión de vapor de cada sala y la correspondiente presión saturante a la temperatura de las paredes, varían periódicamente a lo largo del año, con amplitudes muy pequeñas que demuestran los débiles intercambios de aire entre ellas. Además, ocurre que a medida que la sala está más alejada de la Boca de la Cueva tanto menores son las amplitudes de esas diferencias, pudiendo alcanzar durante el verano valores negativos y, por tanto, la posibilidad de condensación. Esto es así para todas las salas estudiadas excepto para la Gran Sala y el pasillo de acceso a la misma, que son las salas más profundas y que pueden considerarse como dos grandes depósitos de aire más frío que el del resto de la Cueva y de muy lenta renovación.

LA RADIATIVIDAD NATURAL DE LA CUEVA. TECNICA DE MEDIDAS

El radón es un gas noble, cuyo isótopo radiactivo más importante es el Rn-222, de la serie radiactiva del U-238. El uranio 238 es un componente natural de las rocas que constituyen la corteza terrestre, encontrándose en ella con una abundancia de aproxima-

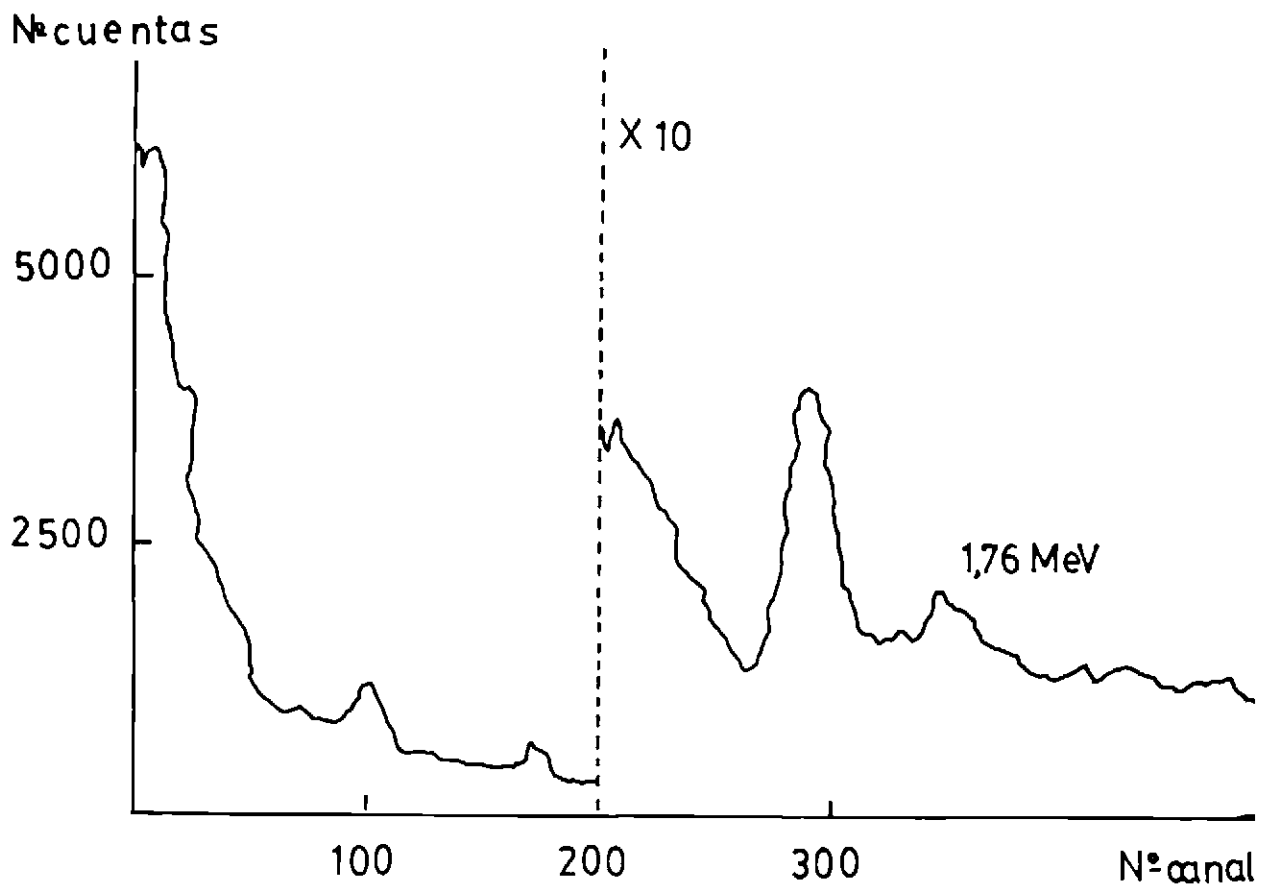


Fig. 1.—Espectro gamma característico de una de las muestras de tierra del suelo de la Cueva de Altamira.

damente 2,8 ppm. en el suelo cerca de la superficie^{4,5}. Abundancias típicas son 4,7 ppm. en granitos y 3,7 ppm. en calizas. Los átomos del U-238 se desintegran dando lugar a una cadena de elementos, todos inestables, radiactivos, entre los que se encuentran átomos de radio-226 que a su vez se desintegran en Radón-222, que se difunden en forma de gas por los intersticios de los minerales^{6,7}. Todos los miembros de la serie de desintegración del U-238, incluyendo el Ra-226, se encuentran generalmente en equilibrio secular con el uranio, pero una vez que el radón se ha formado, debido a que es un gas, y, por tanto, capaz de difundirse con rapidez, se producen mecanismos de escape hacia la atmósfera desde las capas superiores del suelo. A varios metros de profundidad, la concentración del radón-222 en las rocas es unas 100 veces superior que en la atmósfera. La exhalación del radón, es decir, su emisión a nivel de la superficie de contacto aire-roca, es de aproximadamente de un átomo por centímetro cuadrado y por segundo⁸. Los átomos de este gas, radón-222, son a su vez radiactivos, desintegrándose por emisión de una partícula α con una vida media de 3,8 días, transformándose en una serie de elementos de vida corta, como el Polonio-218 y el Polonio-214, también emisores α , de modo que la desintegración de Rn incluye tres emisiones α en un corto espacio de tiempo. El elemento final de esta serie radiactiva es el Plomo-210, estable.

La medida de la concentración de Radón-222 en el aire de la Sala de Polícromos y en el aire del Hall, a lo largo de un año, permite estudiar la ventilación natural de la Sala, mediante un sencillo modelo^{9,10}, ya que la cantidad de radón presente depende no sólo del volumen de la Sala y de la exhalación de este gas, que es constante, sino del grado de mezcla con el aire intercambiado con el Hall o con el exterior.

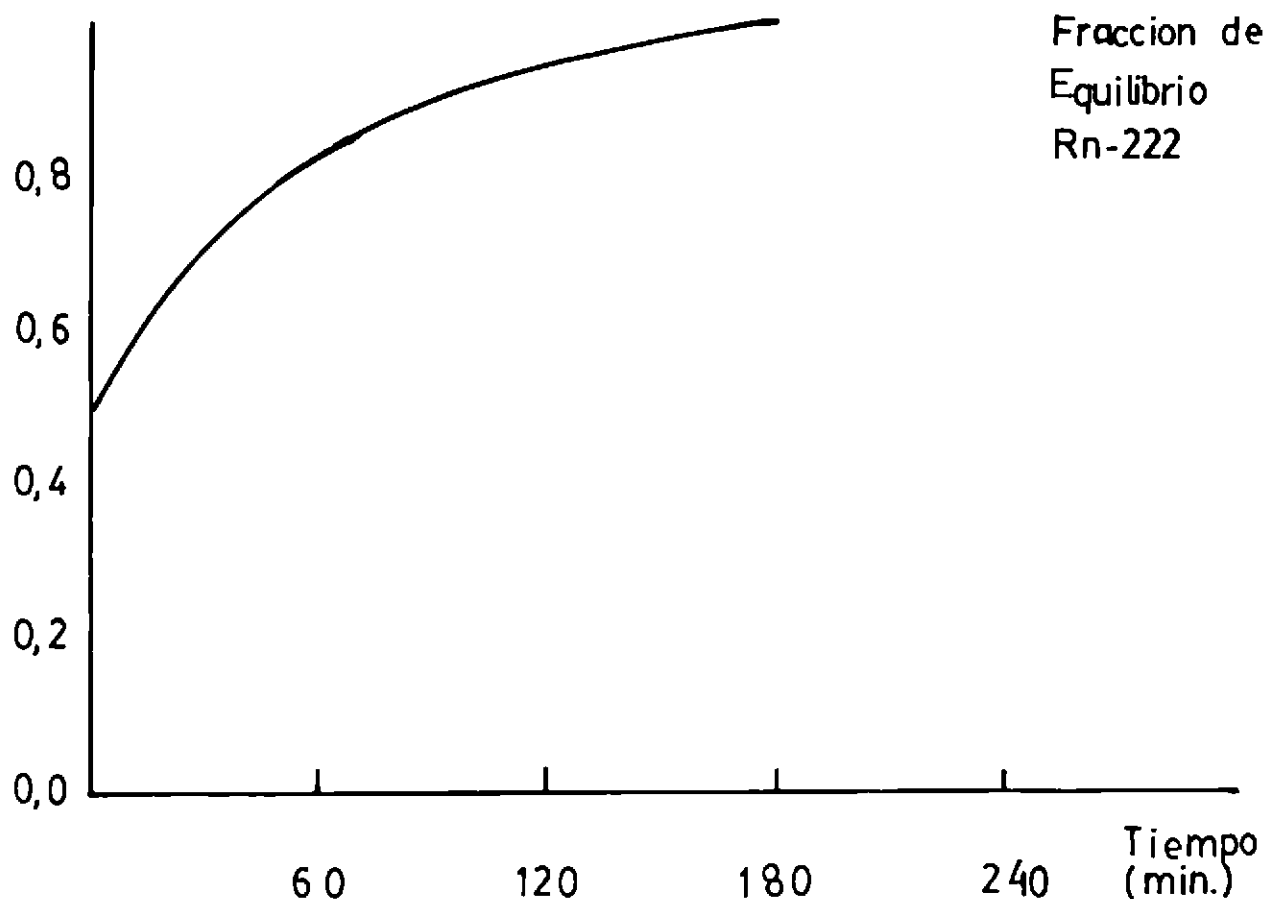


Fig. 2.—Fracción de equilibrio del Rn-222 en función del tiempo transcurrido después de tomada la muestra del aire.

Dada la importancia que sobre el nivel de radón presente en el interior de la Sala de Pinturas tiene el contenido de radio de las rocas que la constituyen, hemos analizado, en primer lugar, la actividad de cinco muestras de roca, utilizando una cadena de espectrometría gamma. El fundamento del método empleado reside en la medida del pico de 1,76 Mev del Bi-214, descendiente del radio, una vez alcanzadas las condiciones de equilibrio entre ambos¹¹. Un espectro típico de los encontrados puede observarse en la figura 1.

Los valores de las actividades de radio encontrados oscilan entre $0,52 \pm 0,10$ y $0,70 \pm 0,14$ pCi/g. suelo. Estos valores son similares a los obtenidos en muestras de suelo «normales» y ponen de manifiesto que los altos valores de concentración de radón encontrados en la atmósfera de la Sala de Pinturas, como ahora veremos, no son debidos a concentraciones anormales de uranio y radio en las masas rocosas que encierran el aire de la Cueva.

La medida de la concentración del isótopo radiactivo Rn-222 en el aire de la Cueva se ha llevado a cabo utilizando un detector de gas Eberline SAC-R5, especialmente diseñado para utilizar pequeñas muestras de aire. La toma de muestras se realiza mediante células de centelleo, tipo SC-5, de 500 cm³ de volumen, construidas de plástico transparente, cuyas paredes internas están recubiertas con el centelleador sulfuro de zinc, dopado con plata.

El calibrado del sistema ha sido realizado con una fuente de Plutonio-239, cuya actividad es de $90.400 + 1.800$ cpm. El resultado obtenido es de 2,3 cpm. por pCi/l. de Rn-222 de sensibilidad, para las células utilizadas. Por otra parte, se ha medido el ruido de fondo, que ha sido del orden de $80 + 9$ cpm.

Para llevar a cabo las medidas del contenido de Rn-222 en las muestras gaseosas tomadas en la Cueva, se ha procedido del modo siguiente: en primer lugar, se ha hecho el vacío en la célula de centelleo y se mide el ruido de fondo; después se toma la muestra de aire en la Cueva, abriendo la espita de la célula lentamente para proceder al llenado de la misma; se protege la célula con un trapo negro y se procede a la medida del número de cuentas debido al contenido de radón en la muestra.

En la figura 2 se representa la variación de la tasa de recuento α en función del tiempo posterior a la recogida de la muestra. Como hemos indicado existen tres radioisótopos emisores α y todos ellos contribuyen a la tasa de recuento α , hasta alcanzar el equilibrio. Uno de estos emisores es el Radón-222 y su contribución es inmediata y constante, razón por la cual la curva comienza en el 40 por 100 y no en el cero. El primer descendiente del radón es el Polonio-218, emisor α con una vida media de tres minutos, que alcanza el equilibrio con el radón al cabo de veinte minutos. El tercer emisor α es el Polonio-214, que establece el equilibrio secular con el radón al cabo de tres horas. Es por estas razones que la medida de la concentración del Radón-222 debe realizarse tres horas después de haber tomado la muestra.

Ya antes de poner a punto este método de evaluar cuantitativamente la ventilación de la Sala y de realizar las medidas citadas con un dispositivo especial, del que pudo disponerse desde 1983, nuestro equipo había tomado muestras de aire de la Sala de Pinturas en diferentes ocasiones para determinar el contenido de este gas radiactivo.

Las muestras de aire tomadas en tanques de acero fueron enviadas a los Laboratorios del Institute of Mining and Technology de New Mexico, que dirige el profesor Marvin Wilkening.

El interés por determinar la concentración del gas radón en la Sala de Pinturas estribaba no sólo en que los valores hallados permitiesen evaluar la ventilación, sino también en que visitantes y guías van a estar expuestos a una cierta dosis de radiación, cuyos niveles convenía conocer.

METODO PARA EVALUAR LA VENTILACION

Supongamos una cavidad subterránea de volumen V y área S , como lo es la Cueva, en la cual se tiene un flujo neto de E átomos de Rn²²². La variación con el tiempo de la concentración C , de átomos de Rn²²² por unidad de volumen puede expresarse en la forma siguiente:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{ES}{V} - \lambda C - \frac{Q}{V} (C - C_{ext}) \quad (1)$$

Los términos que aparecen a la derecha de esta actuación tienen el significado siguiente:

- $\frac{E \cdot S}{V}$: representa a la fuente de producción.
- $\lambda \cdot C$: da cuenta de la desintegración del radón.
- $\frac{Q}{V} (C - C_{ext})$: corresponde a la ventilación.

Q es la tasa de flujo natural y representa el intercambio de aire entre la Cueva y el ex-

terior; λ es la constante radiactiva del Rn^{222} , y $C - C_{ext}$ es la diferencia en concentración de Rn^{222} entre el aire de la Cueva y el aire del exterior.

Una vez que se alcanza el equilibrio, se tiene que $\frac{dC}{dt} = 0$, con lo cual la ecuación (1) queda:

$$E \cdot S/V - \lambda \cdot C - \frac{Q}{V} (C - C_{ext}) = 0 \quad (2)$$

Cuando la concentración de Rn^{222} es máxima, se tiene que el aire está estancado y, por tanto, la ventilación es nula, $Q = 0$, con lo cual tenemos:

$$E \cdot S/V = \lambda \cdot C_{m\acute{a}x}$$

Sustituimos esta condición en la ecuación (2), obteniendo:

$$\lambda (C_{m\acute{a}x} - C) = \frac{Q}{V} (C - C_{ext}) \quad (3)$$

En el caso particular de Altamira se tiene que existe un intercambio de aire entre el Hall y la Sala de Polícromos¹², que podemos calcular sin más que tener en cuenta los valores obtenidos para las concentraciones de Rn^{222} en estos dos sitios, por lo que la ecuación (3) la escribiremos en la forma siguiente:

$$Q = \lambda V [C_{m\acute{a}x} - C_s/C_s - C_H] \quad (4)$$

en donde C_s y C_H son las concentraciones de Rn -222 en la Sala de Pinturas y en el Hall, respectivamente.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de las medidas de concentración de Rn -222 realizados en el Hall y en la Sala de Polícromos durante todo un año vienen expresados en la tabla I, como valores medios mensuales, deducidos de tres determinaciones semanales.

TABLA I
Medidas de la concentración de Rn -222 en la Cueva, en pCi/l.

Mes	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Hall	47 ± 3	149 ± 8	162 ± 8	159 ± 9	43 ± 4	6,3 ± 0,8	13,5 ± 1
Sala	76 ± 4	159 ± 8	171 ± 9	185 ± 12	67 ± 5	27 ± 3	37 ± 5
Mes	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero		
Hall	16 ± 1,7	37 ± 5	117 ± 7	173 ± 9	177 ± 9		
Sala	38 ± 5	58 ± 4	143 ± 8	180 ± 11	181 ± 9		

a) Ventilación

Para evaluar la ventilación a través de la expresión (4), se ha considerado como valor máximo de la concentración la media de los valores máximos individuales encontrados en el mes de mayo, que ha resultado ser $C_{m\acute{a}x} = 195$ pCi/l. Suponiendo que este valor máxi-

mo no se superase en todo el año, correspondería a aquella situación en la que el aire está estanco y, por tanto, la ventilación es nula. Con este dato se ha calculado la ventilación Q de la Sala de Polícromos, en metros cúbicos de aire por hora, para todos los meses citados, obteniéndose los resultados de la tabla II.

Conviene hacer observar que estos resultados se han obtenido suponiendo que el aire de la Sala se renueva con el procedente del Hall, como se deduce de la aplicación de la expresión (4) a las medidas efectuadas en ambos recintos. Es por esto que se ha representado en la figura 3 la ventilación Q , en m^3/h , así como el valor absoluto de la diferencia de temperaturas existente entre el aire del Hall y de la Sala, $\Delta = T_{Hall} - T_{Sala}$ para los meses citados. La figura 3 muestra una correspondencia acorde con el proceso de convección supuesto.

TABLA II
Ventilación de la Sala de Polícromos

Mes	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Q ($m^3 \cdot h^{-1}$)	10,3	9,2	6,9	1,05	13,4	20,3

Mes	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.	Enero
Q ($m^3 \cdot h^{-1}$)	16,9	17,9	16,4	5,1	5,7	9,3

b) Niveles de exposición radiactiva para visitantes y guías ¹³

La normativa que debe aplicarse con el fin de establecer los niveles de exposición permisibles para personas expuestas a las radiaciones ha sido motivo de estudio en muy distintos países. Así, para los trabajadores expuestos, el nivel máximo admisible es tomado normalmente como 4 WLM, equivalente a 68.000 pCi-hr/l., admitiendo la existencia de equilibrio radiactivo entre el radón y sus descendientes de vida corta ¹⁴.

La concentración de Rn-222 puede ser convertida en WL si conocemos el grado de equilibrio entre éste y sus descendientes ^{15 16}. Este grado de equilibrio no ha sido determinado específicamente en las medidas llevadas a cabo en el interior de la Cueva; sin embargo, medidas realizadas por otros autores en cuevas de características similares muestran que el mismo oscila entre el 30 y el 90 por 100. No obstante, es posible en cualquier caso asumir la existencia de equilibrio durante los meses en los cuales la ventilación es prácticamente nula y, por tanto, se corresponde con las más altas concentraciones de radón en el interior de la Cueva, que en nuestro caso es de 185 pCi/l., y que se corresponde con el mes de mayo. En estas condiciones, dicha concentración representa un nivel de exposición de 332.860 pCi-hr/l. para una persona con una estancia promedio en el interior de la Cueva de 170 horas por mes, durante once meses. Este nivel resulta ser más de cuatro veces superior al establecido para los trabajadores de las minas de uranio. Aunque estas condiciones de exposición no tienen lugar en el momento presente debido al restrictivo régimen de visitas actual de la Sala, sin embargo, es de suponer que este límite máximo fue alcanzado durante el período 1970-76, con respecto a los guías que trabajasen cinco a seis horas diarias en la Cueva.

En las mismas condiciones y para el público en general, la concentración anterior da lugar a 89 pCi-hr/l. para un visitante que permanezca media hora en el interior de la Cueva. Teniendo en cuenta que para este caso el nivel máximo admisible está cifrado en 2.300 pCi-hr/l., la exposición a la que se encontrarían sometidos los visitantes únicamente representa un 4 por 100 de dicha dosis máxima; prácticamente, por tanto, despreciable.

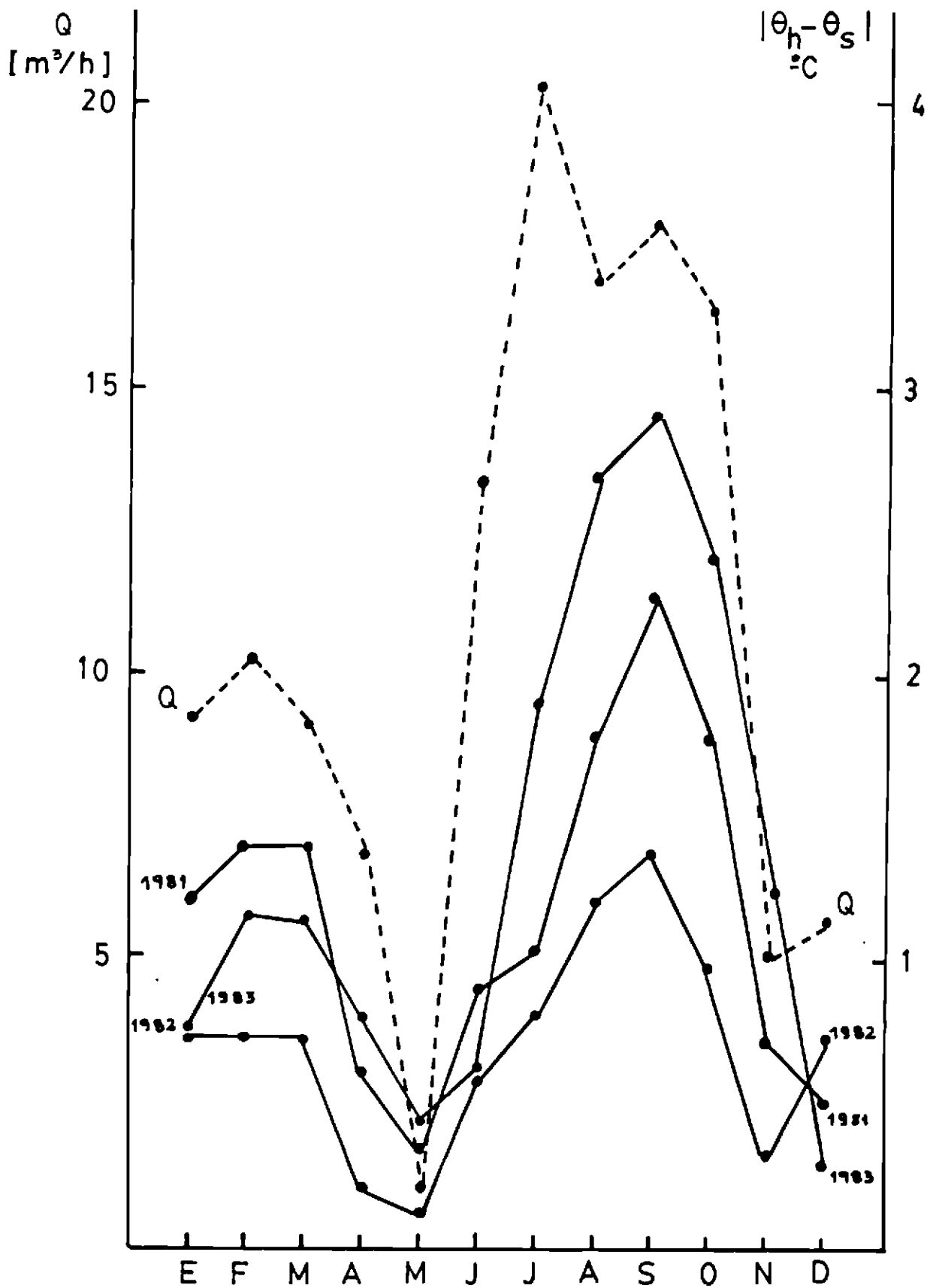


Fig. 3.—Variación de la ventilación Q (m^3/h) de la Sala de Polícromos y del valor absoluto, $|\theta_h - \theta_s|$ (en $^\circ\text{C}$), de la diferencia de temperatura entre el Hall y la Sala de Pinturas a lo largo del año.

Dentro del régimen actual de visitas, de tres turnos de cinco personas, a la hora, permaneciendo los visitantes en la Sala sólo diez minutos, establecido por nuestro plan de investigación para estudiar el efecto de las mismas en el microclima de la Cueva, los guías permanecen en el interior de la misma tiempos diferentes según el mes. Realizando el cálculo para cada mes y tomando los valores de la concentración de Rn-222 dados por la tabla I y asignándoles adecuados modos de equilibrio podemos obtener los distintos niveles de exposición que aparecen recogidos en la tabla III. Del análisis de los datos encontramos que los valores de concentración de radón en Altamira resultan ser similares a los encontrados por Ronaky, 1972¹⁷, en tres cuevas húngaras y superiores a los encontrados por Wilkening, 1976⁹, en las Cuevas de Carlsbad en New México, siendo en las actuales circunstancias los niveles de exposición inferiores al nivel máximo establecido tanto para personal como para el público visitante.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos indican claramente que la ventilación natural de la Sala de Pinturas, en ausencia de visitantes, es de muy débil intensidad. Si tenemos en cuenta que el volumen de la Sala es de 326 m³ y que el umbral de entrada de la misma es del orden de 2,81 m², resulta que harían falta quince días en renovarse el aire de la Sala durante el mes de mayo, fluyendo el aire a través del umbral de la Sala a razón de un centímetro por minuto, y en el mes de junio, cuando casi es máxima la ventilación de la Sala, se renovarían el aire en día y medio, fluyendo aproximadamente a casi 14 cm. por minuto.

TABLA III

Niveles de exposición en pCi-hr/l. para visitantes y guías dentro del régimen de visitas propuesto *

Mes	Concentración media (pCi/l.)	Grado de equilibrio (%)	Tiempo de exposición de los guías	Niveles de exposición (pCi · h/l.)	% respecto al máximo permisible
Febrero (83)	76	60	50	Guías: 12.540 Visit.: 7,6	18,40 0,33
Marzo	159	90	50	Guías: 39.353 Visit.: 23,85	59,90 1,04
Abril	171	90	50	Guías: 42.323 Visit.: 25,65	62,24 1,12
Mayo	185	100	20	Guías: 20.350 Visit.: 30,83	29,92 1,34
Junio	67	60	80	Guías: 17.688 Visit.: 6,7	26,01 0,29
Julio	27	40	70	Guías: 4.158 Visit.: 1,8	6,1 0,07
Agosto	37	40	70	Guías: 5.698 Visit.: 2,47	8,4 0,11
Septiembre	38	40	70	Guías: 5.852 Visit.: 2,53	8,6 0,11
Octubre	58	60	80	Guías: 15.312 Visit.: 5,8	22,52 0,25
Noviembre	143	90	40	Guías: 28.314 Visit.: 21,45	41,64 0,93
Diciembre	180	90	60	Guías: 53.460 Visit.: 27	78,62 1,17
Enero (84)	181	90	50	Guías: 44.798 Visit.: 27,15	65,90 1,18

(*) Los visitantes en todos los casos sólo están expuestos diez minutos.

El papel amortiguador de la Boca de la Cueva, unido a la especial configuración de la Cueva, en donde las salas más profundas son las más frías, y entre las que existe una pequeña diferencia de temperaturas entre el aire de las mismas, entorpecen la ventilación, que alcanza niveles muy bajos.

Estos resultados son coherentes con las estimaciones cualitativas obtenidas del análisis de las variaciones que experimenta la humedad y la concentración de gas carbónico en la Sala de Pinturas, así como de las diferencias de temperatura entre las paredes y el aire de esta Sala. En primer lugar, las fluctuaciones de estas magnitudes eran tan pequeñas que ya anunciaban una débil ventilación de acuerdo con los datos suministrados por el método del radón. Por otra parte, hemos visto que en mayo la ventilación es mínima y es precisamente en este mes cuando se presenta un máximo en la concentración del gas carbónico y cuando la temperatura de la roca coincide con la del aire, y también cuando se igualan las presiones parciales del vapor de agua en la Sala y en el Hall. Y en agosto cuando es mínima la concentración de radón por alcanzar la ventilación sus valores máximos, es precisamente cuando las diferencias de temperaturas entre la roca y el aire son mayores, cuando la concentración de carbónico es mínima y en cambio la humedad absoluta aumenta considerablemente, lo que resulta coherente con el hecho de que en esa época la humedad absoluta del Hall es superior a la de la Sala y el aire húmedo procedente del Hall va penetrando en la Sala, donde todo parece indicar que se produce condensación de vapor de agua por ser además la época del año en la que el techo está más frío.

Una descripción fenomenológica de la ventilación natural de la Sala de Polícromos, basada en las medidas realizadas, sería que durante el verano el aire del Hall, muy húmedo, penetra en la Sala a razón de 13 m^3 por hora aproximadamente, a ras del techo, pudiendo aparecer procesos de condensación de vapor sobre las pinturas. Posteriormente, la ventilación va disminuyendo en intensidad de modo que en el mes de octubre es muy pequeña, hasta detenerse en un momento determinado e invertirse el sentido de la circulación del aire caliente, que a ras del techo circula ahora desde la Sala al Hall. Luego, poco a poco, de nuevo se va intensificando la velocidad de renovación, siendo máxima en febrero. A partir de entonces, la ventilación va disminuyendo, de modo que otra vez el aire caliente llega a invertir el sentido de la circulación en mayo, época en la que se dirige del Hall a la Sala, hasta alcanzar un flujo máximo en agosto, repitiéndose el proceso.

Por último, puede decirse que los altos valores encontrados para las concentraciones de Radón-222 en determinadas épocas no se debe a altos contenidos de uranio y radio en las rocas que constituyen las paredes de la Sala, sino a la escasa ventilación de la misma.

Si bien en los años setenta, los visitantes no recibieron dosis importantes de radiación, en cambio los guías llegaron a niveles de exposición muy superiores a los admitidos actualmente. Los resultados de la tabla III nos muestran que con el actual régimen de visitas en grupos de cinco personas, con diez minutos de permanencia en la Cueva, tanto los visitantes como los guías están expuestos a niveles de radiación siempre inferiores al nivel máximo permisible.

BIBLIOGRAFIA

1. VILLAR, E., *et al.*, *El campo de temperaturas en la cueva de Altamira*. Monografía del C.I.M. de Altamira, Ministerio de Cultura (1983).
2. VILLAR, E., *et al.*, *Flujos de materia en la cueva de Altamira*. Monografía del C.I.M. de Altamira, Ministerio de Cultura (1983).
3. VILLAR, E., *et al.*, *La humedad natural de la cueva de Altamira*. Monografía del C.I.M. de Altamira, Informe al Ministerio de Cultura pendiente de publicación (1983).
4. PEARSON, J. E., *Soil concentrations of emanating Ra-226 and the emanation of Rn-222 from soils and plants*. *Tellus XVIII*, 653 (1966).
5. CRONTHAMEL, *Gamma-ray spectrometry of rocks*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1970).
6. SCHOEDER, L., *et al.*, *Diffusion of radon in several naturally occurring soil types*, «*Journal of Geophysical Res*», 70, 2, 471 (1965).
7. SCHEIDEGGER, *et al.*, *Fundamentals of transport: Phenomena in porous media*. Elsevier Publishing Co., Amsterdam (1972).
8. QUINDOS, L. S., *Desarrollo y puesta a punto de un nuevo método para la medida de la exhalación de radón*. Tesis doctoral, Universidad de Santander (1981).
9. WILKENING, M., *Air exchange and Rn-222 concentrations in the Carlsbad caverns*, «*Health Physics*», 31, 139 (1976).
10. WILKENING, M., *Radon levels and ventilation effects in underground enclosures*. Radon Workshop, Health and Safety Laboratory, U. S. Energy Research, New York (1977).
11. FERNANDEZ, P., *et al.*, *Medida del contenido de radio en tierras*, «*Anales de Física*» (1983), en prensa.
12. VILLAR, E., *et al.*, *Microclima de la Sala de Policromos de la Cueva de Altamira*, «*Rev. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*», tomo LXXVI, cuaderno 3.º, pág. 686 (1982).
13. FERNANDEZ, P., *et al.*, *Radon exposure levels in Altamira cave*. «*Health Physics*» (1983), en prensa.
14. ROBERTS, L., *Emission and control of radon at active uranium mines and mills*, «*Trans. Am. Nucl. Soc.*», vol. 3, pág. 154 (1979).
15. ABU-JARAD, F., *et al.*, *A study of radon emitted from building materials using plastic track detectors*, «*Phys. Med. & Biol.*», 25, pág. 593 (1980).
16. BUSHONG, S. C., *Radiation exposure in our daily lives*, «*Phys. Teacher*», vol. 24, pág. 135 (1977).
17. RONAKY, L., *Karzt-es-Barlángatutas*, vol. 7, pág. 127 (1972).