

Figura 2

Cuando se alcanza el equilibrio, es decir, cuando la producción de gas radón iguala a la pérdida de este gas debida a la desintegración y a la ventilación, la concentración C permanece constante en el tiempo, por lo que podemos escribir: $E.S/V = \lambda .C + Q(C - C_{ext})/V$ (2).

A lo largo de un año, como la temperatura del espacio exterior presenta oscilaciones estacionales, llega un momento en el que la corriente convectiva de aire que se establece con el exterior, cambia de sentido, por lo que durante un periodo pequeño de tiempo el aire permanece estanco, la ventilación Q es nula y la concentración de radón es máxima, lo que permite escribir:

$$E.S/V = \lambda .C_{m\acute{a}x} \quad (3)$$

Si ahora sustituimos esta condición en (2), se obtiene:

$$Q = \lambda .C.V\{C_{m\acute{a}x} - C/C - C_{ext}\} \quad (4)$$

expresión que permite calcular el volumen de aire que se renueva en el recinto por unidad de tiempo, mediante medidas de las correspondientes concentraciones del gas radiactivo Rn^{222} .

Para medir estas concentraciones de radón se toman muestras de aire mediante células de centelleo de volumen conocido, que se acoplan a un contador. Este sistema se calibra previamente mediante una fuente radiactiva de actividad conocida. En primer lugar, se hace el vacío en la célula y se mide el ruido de fondo. Hecho esto, se lleva al lugar que interese y se abre la espita de la célula, por lo que se llena de aire, e inmediatamente después se procede a la medida del número de cuentas.

En el caso de la Sala de Polícromos de la cueva de Altamira, la ventilación tiene lugar al intercambiarse el aire entre esta Sala y el Hall, por lo que las medidas de la concentración de Rn^{222} se realizaron en ambas salas, así es que en la expresión (4), en lugar de utilizar C_{ext} se tomaron los valores de la concentración C_{Hall} . En la Tabla I se muestran los valores medios mensuales de estas concentraciones en pCi/l. Se observa que es en el mes de Mayo cuando el valor medio de la concentración del Rn^{222} en la Sala de Polícromos es máxima, ya que es en esta época cuando se invierte el sentido de la corriente convectiva, y el aire llega a hacerse estanco, y durante este mes el valor máximo encontrado fue de 186 pCi/l, que hemos tomado como $C_{m\acute{a}x}$. Con estos datos se ha construido la Tabla II, en la que figuran los valores de Q , en $m^3/hora$. Los resultados obtenidos son coherentes con las variaciones de velocidad del proceso convectivo. En efecto, en la figura 3 se muestra mediante una línea de trazos los valores medios mensuales de la intensidad Q de la ventilación, y mediante trazo continuo las diferencias entre las temperaturas medias mensuales de la Sala de Pinturas y del Hall de la Cueva (para diferentes años), diferencias de las que depende la intensidad de los fenómenos de convección. Esta figura permite comprobar la coherencia de los resultados.

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	2,2±0,3
Sala	76±4	159±8	171±9	185±12	67±5	27 ± 3	37 ± 10

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

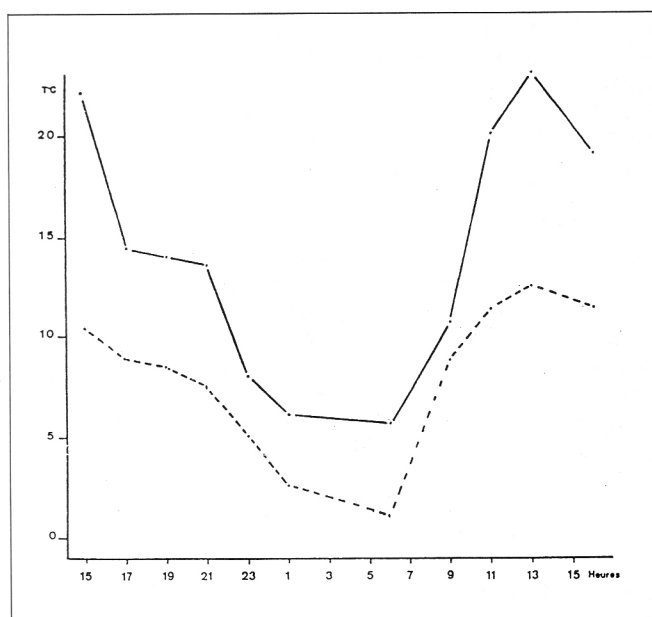


Figura 2

Cuando se alcanza el equilibrio, es decir, cuando la producción de gas radón iguala a la pérdida de este gas debida a la desintegración y a la ventilación, la concentración C permanece constante en el tiempo, por lo que podemos escribir: $E.S/V = \lambda .C + Q(C - C_{ext})/V$ (2).

A lo largo de un año, como la temperatura del espacio exterior presenta oscilaciones estacionales, llega un momento en el que la corriente convectiva de aire que se establece con el exterior, cambia de sentido, por lo que durante un periodo pequeño de tiempo el aire permanece estanco, la ventilación Q es nula y la concentración de radón es máxima, lo que permite escribir:

$$E.S/V = \lambda .C_{m\acute{a}x} \quad (3)$$

Si ahora sustituimos esta condición en (2), se obtiene:

$$Q = \lambda .C.V\{C_{m\acute{a}x} - C/C - C_{ext}\} \quad (4)$$

expresión que permite calcular el volumen de aire que se renueva en el recinto por unidad de tiempo, mediante medidas de las correspondientes concentraciones del gas radiactivo Rn^{222} .

Para medir estas concentraciones de radón se toman muestras de aire mediante células de centelleo de volumen conocido, que se acoplan a un contador. Este sistema se calibra previamente mediante una fuente radiactiva de actividad conocida. En primer lugar, se hace el vacío en la célula y se mide el ruido de fondo. Hecho esto, se lleva al lugar que interese y se abre la espita de la célula, por lo que se llena de aire, e inmediatamente después se procede a la medida del número de cuentas.

En el caso de la Sala de Polícromos de la cueva de Altamira, la ventilación tiene lugar al intercambiarse el aire entre esta Sala y el Hall, por lo que las medidas de la concentración de Rn^{222} se realizaron en ambas salas, así es que en la expresión (4), en lugar de utilizar C_{ext} se tomaron los valores de la concentración C_{Hall} . En la Tabla I se muestran los valores medios mensuales de estas concentraciones en pCi/l. Se observa que es en el mes de Mayo cuando el valor medio de la concentración del Rn^{222} en la Sala de Polícromos es máxima, ya que es en esta época cuando se invierte el sentido de la corriente convectiva, y el aire llega a hacerse estanco, y durante este mes el valor máximo encontrado fue de 186 pCi/l, que hemos tomado como $C_{m\acute{a}x}$. Con estos datos se ha construido la Tabla II, en la que figuran los valores de Q , en $m^3/hora$. Los resultados obtenidos son coherentes con las variaciones de velocidad del proceso convectivo. En efecto, en la figura 3 se muestra mediante una línea de trazos los valores medios mensuales de la intensidad Q de la ventilación, y mediante trazo continuo las diferencias entre las temperaturas medias mensuales de la Sala de Pinturas y del Hall de la Cueva (para diferentes años), diferencias de las que depende la intensidad de los fenómenos de convección. Esta figura permite comprobar la coherencia de los resultados.

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	27±3
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

TABLA II
Ventilación de la Sala de Polícromos

Mes	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Q (m. ³ h ⁻¹)	10,3	9,2	6,9	1,05	13,4	20,3
Mes	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.	Enero
Q (m. ³ h ⁻¹)	16,9	17,9	16,4	5,1	5,7	9,3

TABLA III

Datos más significativos para el estudio de la influencia de los visitantes en la humedad de la Sala

Mes	VALORES MEDIOS MENSUALES			
	H ₀ (%)	H _S - H ₀ (g m ⁻³)	Q (m ³ h ⁻¹)	φ máx (gh ⁻¹)
Enero ...	97,4	0,56	9,3	11,625
Febrero ...	96,9	0,62	10,3	12,051
Marzo ...	97,8	0,42	9,2	9,936
Abril ...	97,7	0,46	6,9	3,933
Mayo ...	98,2	0,26	1,05	0,378
Junio ...	98,6	0,14	13,4	3,752
Julio ...	98,9	0,05	20,3	0,0
Agosto ...	99,2	-0,09	16,9	0,0
Sept. ...	98,6	0,01	17,9	0,0
Octubre ...	98,8	0,20	16,4	6,560
Nov. ...	98,1	0,36	5,1	3,672
Dic. ...	97,1	0,53	5,7	3,591

En la Sala de Polícromos hemos comprobado que el flujo de agua es prácticamente constante, no apreciándose diferencias entre las distintas estaciones, lo que conduce a que el aporte de anhídrido carbónico también es constante⁵. Esto quiere decir que las variaciones de concentración del CO₂ en la atmósfera de la Sala dependen exclusivamente de la ventilación. Este hecho se pone de manifiesto en la figura 4, donde puede apreciarse como la concentración de este gas es mínima cuando la ventilación es máxima y viceversa⁶.

La determinación de la magnitud de la ventilación natural en una sala hipogea con pinturas prehistóricas, sometida a visitas turísticas, es esencial en los estudios de conservación. En efecto, una persona elimina vapor de agua a razón del 7% de su peso, por hora (2/3 en la respiración y 1/3 por transpiración cutánea), y unos 17 litros de CO₂, por hora. Supongamos que la sala se halla en condiciones de equilibrio, tales que las pinturas no sufren

deterioro. Cuando un grupo de personas visitan la sala, permaneciendo en ella un cierto tiempo, se modifican la humedad relativa y el contenido de gas carbónico del recinto. Una vez acabada la serie diaria de visitas de grupos sucesivos, cuando ha salido el último visitante, las condiciones ambientales de la sala han quedado alteradas, y si la ventilación natural de la cueva no es lo suficientemente intensa para que el recinto recupere las condiciones iniciales antes de comenzar las visitas del día siguiente, se parte de un aumento remanente de estos parámetros, de modo que el efecto es acumulativo. Solamente un conocimiento preciso de la intensidad de la ventilación puede conducir a determinar el número de visitantes y el tiempo de permanencia para que el tiempo de recuperación de las condiciones iniciales sea inferior al intervalo de tiempo que transcurre entre dos series de visitas.

En el caso de Altamira⁷, considerando que la variación natural de los parámetros ambientales de la Sala de Polícromos es muy lenta, pueden tomarse, como valores iniciales de la humedad, de la temperatura y de la concentración de anhídrido carbónico, los valores medios mensuales H₀, T₀ y C₀, con gran aproximación. Se ha aceptado este criterio porque estos parámetros siguen leyes periódicas que se rigen exclusivamente, por las oscilaciones estacionales. Por otra parte, dadas las pequeñas dimensiones de la Sala, de tan solo 326 m.³ de volumen y 450 m² de superficie interior, resulta extraordinariamente sensible a los efectos producidos por la presencia de visitantes en su interior, que modifican casi de modo inmediato los parámetros que determinan el equilibrio de este ecosistema.

En relación a las modificaciones que experimenta la humedad absoluta H, en g/m³, se ha tenido en cuenta que el deterioro de las pinturas por efecto de la emisión de vapor de agua por los visitantes se debe fundamentalmente a la condensación del vapor de agua en el techo de la Sala, por lo que el tiempo de permanencia de los visitantes no debe superar al que se necesita para alcanzar la humedad saturante H_s a la temperatura del techo. Esto se debe a que la condensación supone diluir la concentración iónica de las aguas que permanentemente bañan el techo policromado, lo que supone disminuir el índice de saturación, con la consiguiente probabilidad de que estas aguas incrustantes se conviertan en agresivas y comiencen a disolver el carbonato cálcico, componente principal de la roca soporte de las pinturas. Si el déficit de humedad saturante es (H_s - H₀) g/m³, el tiempo necesario para que N personas logren que la humedad ambiental de la Sala alcance la saturación, viene dado por:

$$t_0 = 6,25 (H_s - H_0)/N \text{ horas}$$

Si designamos por Φ a la producción de vapor de agua, en g/hora, debida a la evaporación de techos y paredes, se obtiene para el tiempo de recuperación t_r , necesario para que la humedad recobre el valor inicial a partir del momento en que se alcanza la saturación:

$$t_r = \frac{326 (H_s - H_o)}{Q (H_s - H_o) + \Phi} \ln \{10 (H_s - H_o)\}$$

Como puede observarse, la ventilación es un factor decisivo. En la Tabla III se muestran los valores medios de los datos que interesan. En la Tabla IV, se dan los resultados concernientes al tiempo de permanencia de 6 perso-

nas para lograr que se inicie la condensación. La Tabla V, muestra los tiempos medios necesarios para que la Sala, una vez alcanzada la humedad de saturación, recupere la humedad inicial. De esta Tabla V se deduce que durante los meses de Abril, Mayo, Noviembre y Diciembre, no debe permitirse que las visitas lleguen a saturar la Sala de humedad, puesto que al día siguiente todavía estaría la Sala saturada y la entrada de cualquier visitante daría lugar a la condensación, fenómeno que hay que evitar a toda costa.

En relación a las variaciones de concentración del CO_2 en la Sala de Altamira⁸, tomando para la exhalación de este gas por los visitantes, el antes indicado, se llega a la conclusión de que un grupo de 6 personas que permaneciese t horas en la Sala, aumentaría la presión parcial de este gas en:

$$\Delta P \text{ CO}_2 = \frac{6.17.t}{326.000} \cdot 100 = 0,0313.t$$

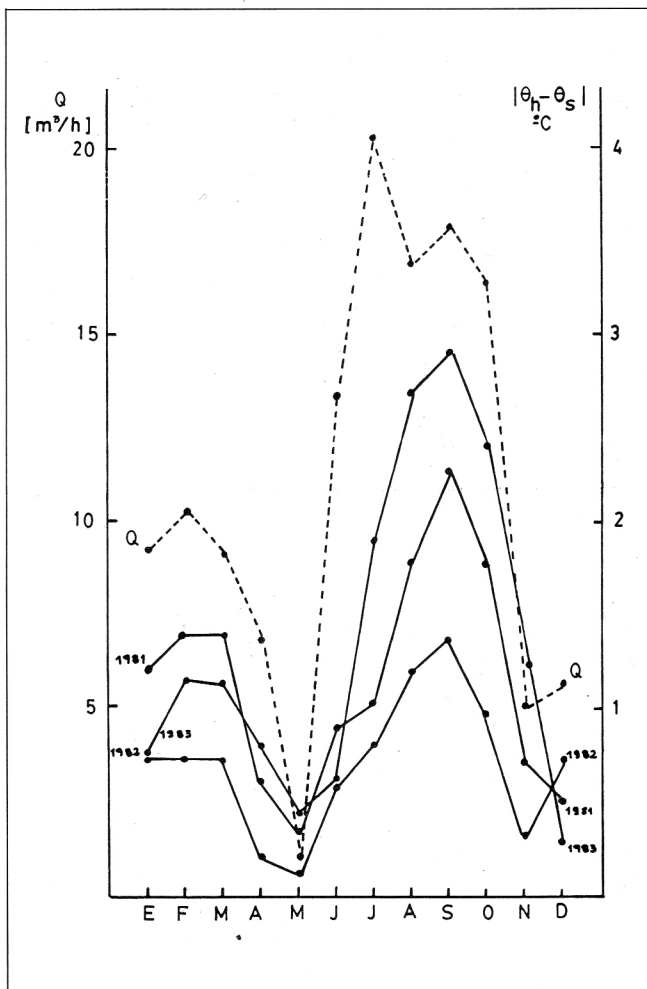


Figura 3

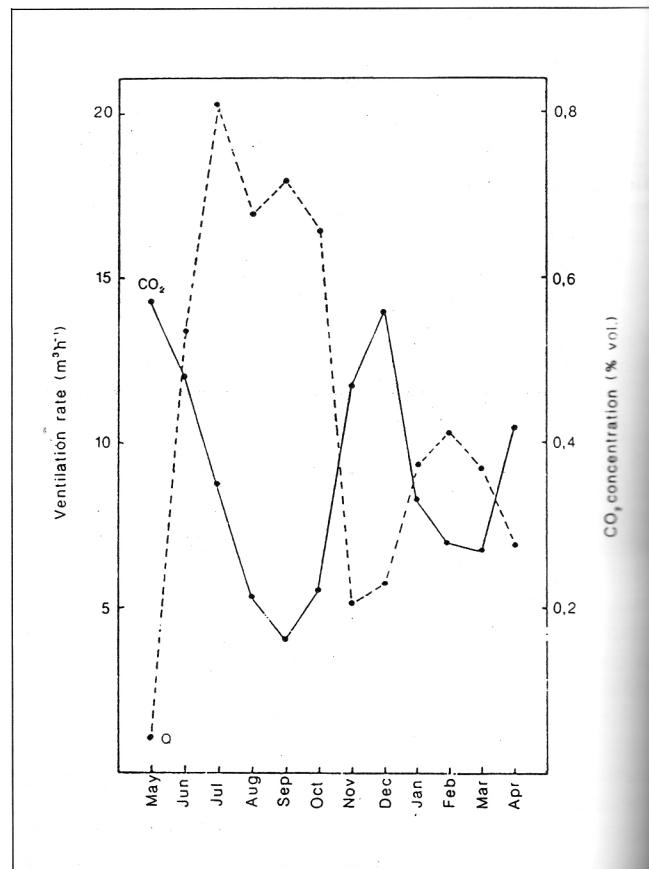


Figura 4

cuando t se expresa en horas. Alcanzada una cierta concentración C_f de este gas al finalizar las visitas de un día, es la ventilación Q la que se encarga de ir reduciendo esta concentración. Planteando un razonamiento análogo al utilizado en el caso de la humedad, se obtiene para el tiempo de recuperación de la concentración inicial, la expresión:

$$t_c = \frac{V (C_{\max} - C_o)}{Q (C_{\max} - C_{\text{ext}})} \ln \frac{(C_f - C_o)}{(C_i - C_o)}$$

en donde, C_i y C_f son las concentraciones inicial y final, y C_{\max} y C_o , son la concentración máxima observada y el valor medio del mes considerado, expresadas todas ellas en % en volumen. Como $C_i = C_o$, se ha tomado para $C_i - C_o = 0,01$, que es el error de medida; para la C_{ext} se ha tomado 0,03 y siendo la concentración máxima medida $C_{\max} = 0,85$, resulta finalmente:

$$t_c = (397,56/Q)(0,85 - C_o) \ln \{100 (C_f - C_o)\}$$

en donde de nuevo se pone de manifiesto la importancia de la ventilación. En la Tabla VI se muestra el tiempo máximo de permanencia, en minutos, de un grupo de 6 personas para que la Sala de Polícromos de Altamira recuperase en 24 horas el valor inicial de la concentración del gas carbónico. En la última columna se expresa el número de grupos de 6 personas que podrían estar contemplando las pinturas durante 10 minutos, si la única causa de deterioro fuese el aumento de la presión parcial del anhídrido carbónico a consecuencia de las visitas.

TABLA IV

Tiempo de permanencia, t_o , de seis personas para lograr que se inicie la condensación; aumento $\Delta\theta_a$ que experimenta la temperatura del aire de la Sala, y humedad relativa final h_f

Mes	t_o (minutos)	Núm. de grupos (10 ^{min} de visita)	$\Delta\theta_a$ (°C)	h_f (%)
Enero.....	36,5	3	0,3	100,0
Febrero....	40,4	4	0,4	99,7
Marzo.....	27,4	2	0,2	99,6
Abril.....	30,0	3	0,3	99,1
Mayo.....	17,0	2	0,2	99,3
Junio.....	9,1	1	0,2	98,5
Julio.....	3,3	0	0,0	98,9
Agosto.....	0,0	0	0,0	99,2
Septiembre..	0,7	0	0,0	98,6
Octubre....	13,0	1	0,2	99,3
Noviembre..	23,5	2	0,2	99,7
Diciembre..	34,6	3	0,3	100,0

TABLA V

Tiempos medios de recuperación τ_H de la humedad de la Sala de Polícromos para los diferentes meses del año

Mes	τ_H (horas)
Enero.....	18,68
Febrero.....	20,00
Marzo.....	14,24
Abril.....	32,20
Mayo.....	124,41
Junio.....	2,73
Julio.....	0,00
Agosto.....	0,00
Septiembre.....	0,00
Octubre.....	4,59
Noviembre.....	27,29
Diciembre.....	43,58

Evidentemente a la hora de establecer un régimen final de visitas, además de tener en cuenta las variaciones de humedad y de CO_2 , hay que considerar el tiempo de recuperación de las temperaturas de la Sala.

La medida de la concentración del gas radiactivo radón presenta también un interés adicional, puesto que las personas que se hallen dentro de un recinto hipogeo están recibiendo una dosis radiactiva que puede no ser despreciable si permanecen largo tiempo, como podría ocurrir con los guías, sobre todo en cuevas poco ventiladas. Así en las Cuevas de Carlsbad, llegaron a medirse 48 pCi/l, cuando en verano la atmósfera de la cueva está prácticamente en reposo, debido a la escasa ventilación⁸. En la Sala de Pinturas de Altamira, durante el mes de Mayo, en el que el aire de la Sala está prácticamente estanco, se alcanzan los 160 pCi/l, concentración que representaría un nivel de exposición de 299.200 pCi/hr/l para una persona que trabajase 170 hr/mes, durante 11 meses⁹, valor que es cuatro veces mayor que el nivel máximo establecido para los mineros que trabajan en la extracción de los minerales de uranio. Lógicamente, con las limitaciones de grupos de visitantes y de tiempo de permanencia impuestos actualmente, ni visitantes, ni guías, alcanzan en ningún momento los niveles límites establecidos por la International Commission on Radiological Protection (ICRP). Así, para un visitante que estuviera media hora en la Sala recibiría 80 pCi-hr/l que supone un 4% de la dosis aceptada como permisible, y un guía que trabajase en el interior de la Sala durante 15 hr/mes, recibiría una dosis de 26.400 pCi-hr/mes, es decir un 38% del máximo nivel establecido.

TABLA VI

Tiempos máximos de permanencia de un grupo de seis personas para que la Sala recupere, en veinticuatro horas, el valor inicial de la concentración de CO₂

Mes	0,85 - C ₀ (%)	Q (m ³ · h ⁻¹)	t (min)	Núm. de grupos (*)
Enero	0,52	9,3	56	5
Febrero	0,57	10,3	57	5
Marzo	0,58	9,2	50	5
Abril	0,43	6,9	50	5
Mayo	0,28	1,05	24	2
Junio	0,37	13,4	171	17
Julio	0,50	20,3	222	22
Agosto	0,64	16,9	94	9
Septiembre	0,69	17,9	92	9
Octubre	0,64	16,4	90	9
Noviembre	0,38	5,1	43	4
Diciembre	0,29	5,7	63	6

(*) Se supone que cada grupo realiza una visita de diez minutos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) E. VILLAR, P. L. FERNANDEZ, L. S. QUINDOS, J. R. SOLANA, J. SOTO. *Cave Science*, 11, N° 2, 92-98, 1984.
- (2) J. BRUNET, P. VIDAL, J. VOUE. *Etudes et Documents sur le Patrimoine Cultural*, CLT-85/WS/38. UNESCO.
- (3) M. WILKENING. *Health Physics*, 31, 139-145, 1976.
- (4) E. VILLAR, A. BONET, B. DIAZ-CANEJA, P. L. FERNANDEZ, I. GUTIERREZ, L. S. QUINDOS, J. R. SOLANA, J. SOTO. Ministerio de Cultura, Centro de Investigación y Museo de Altamira, Monografía N° 11, 21-34, 1984.
- (5) E. VILLAR, A. BONET, B. DIAZ-CANEJA, P. L. FERNANDEZ, I. GUTIERREZ, L. S. QUINDOS, J. R. SOLANA, J. SOTO. *Cave Science*, 12, N° 1, 21-24, 1985.
- (6) P. L. FERNANDEZ, I. GUTIERREZ, L. S. QUINDOS, J. SOTO, E. VILLAR. *Nature*, 321, N° 6070, 586-588, 1986.
- (7) Véase (4), pp 82-93.
- (8) E. VILLAR, P. L. FERNANDEZ, I. GUTIERREZ, L. S. QUINDOS, J. SOTO. *Cave Science*, 13, N° 1, 21-23, 1986.
- (9) P. L. FERNANDEZ, L. S. QUINDOS, J. SOTO, E. VILLAR. *Health Physics*, 46, N° 2, 445-447, 1984.