

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA

MONOGRAFIAS

N.º 9

**ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS
SOBRE LA
CUEVA DE ALTAMIRA**



MINISTERIO DE CULTURA
DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS

MADRID, 1983

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS
SOBRE LA
CUEVA DE ALTAMIRA

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA

MONOGRAFIAS

N.º 9

**ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS
SOBRE LA
CUEVA DE ALTAMIRA**

**DEPARTAMENTO DE FISICA FUNDAMENTAL
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE SANTANDER**

**MINISTERIO DE CULTURA
DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS**

MADRID, 1983

Depósito Legal: M. 20873-1983
I.S.B.N.: 84-7483-306-X
Artegraf. Sebastián Gómez, 5. Madrid-26

INDICE

Caracterización cromática del techo policromado de la sala de pinturas de la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto	7
Evolución del color de la cierva pintada en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L. Plaza, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto	27
Flujos de materia en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto	45
El campo de temperaturas en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto	67

FLUJOS DE MATERIA EN LA CUEVA DE ALTAMIRA

E. Villar; P.L. Fernández; L.S. Quindós; J.R. Solana y J. Soto*

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

INDICE

- I. INTRODUCCION
- II. LOS INTERCAMBIOS DE AIRE EN LA CUEVA
- III. FLUJOS DE AGUA EN LA SALA DE POLICROMOS
- IV. LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE EN LA CUEVA
- V. EL ANHIDRIDO CARBONICO DE LA SALA DE POLICROMOS. SU CONCENTRACION COMO INDICE DE VENTILACION
- VI. LA CONTAMINACION DE LA ATMOSFERA DE LA SALA DE POLICROMOS
- VII. CONCLUSIONES

I. INTRODUCCION

En el presente trabajo se exponen, de acuerdo con el proyecto elaborado (1), los resultados generales relativos a los flujos de materia que tienen lugar en la Sala de Policromos de la cueva de Altamira, en régimen natural, sin la presencia de visitantes.

En principio, los diversos flujos de materia que puedan tener lugar en la Sala de Policromos, omitiendo en esta descripción los flujos de materia viva, derivarán por una parte de la dinámica hidrológica que caracteriza a este ecosistema (2) descrita a través de las aguas filtradas desde el exterior y que gravitacionalmente continúan su curso filtrándose por los estratos rocosos inferiores, que no sólo influirán en la humedad de microclima ambiente, a través de los procesos de evaporación y condensación, sino que también son un posible vehículo de transporte de diversos materiales de arrastre y sustancias disueltas; por otra parte, existirá una dinámica atmosférica del microclima del ecosistema originada por el intercambio de masas de aire que tiene lugar entre la Sala de Policromos y el resto de la Cueva y finalmente entre ésta y el exterior, modificándose con ello las características ambientales de la Sala y originando a su vez flujos de materia, debido a los diferentes productos disueltos en el aire intercambiado, como son el vapor de agua, el anhídrido carbónico o los posibles contaminantes procedentes de la atmósfera exterior. En particular, la concentración del anhídrido carbónico en la atmósfera de la Sala y la humedad de ésta, procedente de los procesos hidrológicos, se correlacionan entre sí, y, a la vez, están íntimamente ligadas a la dinámica general del ecosistema. La importancia de los flujos entrante y saliente de estas dos especies moleculares, el CO_2 y el H_2O , es máxima, en cuanto que determinan el nivel de agua que bañan las superficies rocosas y la precipitación de carbonato cálcico que puede tener lugar sobre estas, afectando por lo tanto a las variaciones que experimenta la humedad de las pinturas y consecuentemente, a su posible arrastre y desescamación y al posible velado u ocultación de las pinturas, al originarse depósitos blanquecinos (enfermedad blanca) (3) debido a las sales cálcicas.

II. LOS INTERCAMBIOS DE AIRE DE LA CUEVA

El campo de temperatura existente en la cueva de Altamira (4) permite formular algunas previsiones referentes a los intercambios de aire inducidos por las diferencias térmicas que presenta. El estudio térmico de la Cueva ha demostrado que dentro de una misma Sala, las diferencias de las temperaturas medias entre suelos y techos, a lo largo de todo un año, o son nulas o no sobrepasan las dos décimas de grado en el 85% de los casos. Estos datos sugieren que, en principio, es el intercambio radiativo, entre techo y suelo, el que iguala las temperaturas de ambos, así como que el prácticamente nulo gradiente de temperatura establecido entre ellos, impide una convección significativa dentro de una misma Sala. Ni aún en las situaciones más extremas, cuando esta diferencia de temperatura entre techo y suelo alcance los $0,5^\circ\text{C}$, el bajo valor del gradiente térmico establecido entre ambos, la mala conductividad calorífica del aire que constituye la capa límite adherida a la roca y la misma viscosidad del aire, hacen suponer que no se alcancen las condiciones precisas para iniciar la convección en el interior de la Sala, o que es tan débil que su influencia en el flujo general del aire sólo debe de tener lugar a través de corrientes convectivas entre las diferentes Salas y entre éstas y el exterior. La intensidad de estos procesos convectivos dependerá de las profundidades y volúmenes relativos entre las Salas implicadas y de la diferencia de temperatura existente entre el aire de las mismas. De todos modos, como las salas más interiores de la Cueva son simultáneamente las más frías y profundas, estos intercambios de aire no pueden ser muy intensos.

En particular, la Sala de Policromos y la Sala de los Muros tienen una temperatura semejante pudiendo tener ambas Salas intercambios convectivos con el Hall. Estos tendrán lugar principal-

mente cuando la diferencia de temperaturas de estas Salas con la del Hall sea máxima y, por tanto, en los meses de enero, febrero y marzo y en los de agosto, septiembre y octubre como se determinó en un trabajo anterior (4).

Análogamente los intercambios de aire entre el Hall de la Cueva y el exterior serán más intensos cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre ambos. Las gráficas de las figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 muestran las variaciones que con el tiempo, a lo largo de un año, experimentan las diferencias de temperatura entre el aire de la Boca de la Cueva (exterior) y el de las diferentes Salas de la Cueva, como son las denominadas Hall, Ante-2ª puerta, Pasillo Sala, Sala de Polícromos, Segundo Ramal, Sala de los Muros y Pre-Gran Sal. Las máximas diferencias de temperaturas entre el Hall y la Boca de la Cueva (exterior) ocurren en el mes de agosto y principalmente en los meses de diciembre y enero. Por otra parte, las mayores diferencias de temperatura entre el resto de la Cueva y el exterior también tienen lugar durante los mismos meses prácticamente.

Para poder evaluar cuantitativamente la ventilación de cualquier Sala de la Cueva, es decir, el flujo de aire para las diferentes situaciones convectivas, pueden seguirse diferentes métodos. Uno de ellos, basado en las variaciones que experimenta la concentración del gas radiactivo natural, radón, con el tiempo, en una sala de volumen conocido, será motivo de un próximo trabajo.

También pueden dar cuenta de la ventilación de una Sala las variaciones que experimenta con el tiempo la concentración del anhídrido carbónico en el aire que contiene, estudio que hemos realizado y exponemos más adelante. Sin embargo, basándose exclusivamente en el conocimiento del campo de temperaturas y sus variaciones con el tiempo, es posible comparar las predicciones que se deducen de las diferencias de temperaturas entre las distintas Salas con el transporte de aire que realmente tiene lugar en la Cueva. Para ello, hemos determinado la diferencia de temperaturas que existe entre la superficie rocosa y el aire de cada Sala y hemos estudiado la variación que esta diferencia térmica experimenta con el tiempo. En efecto, si el aire estuviese estanco, éste y las superficies tendrían la misma temperatura. La existencia de una diferencia de temperaturas entre ambos pondrá de manifiesto que se está intercambiando de manera continua, aunque lentamente, una cierta cantidad de aire. En las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13 hemos representado los valores medios mensuales de la diferencia de temperatura existente entre la superficie rocosa, tomada como el valor medio de las del suelo y del techo, y la temperatura del aire. En todas ellas se observa, en primer lugar, que estas diferencias de temperatura no son grandes en ninguna de las Salas, lo que indica que la temperatura del aire viene determinada principalmente por la de la superficie rocosa. Los intercambios de aire entre las distintas Salas y a través de ellas con el exterior son, por lo tanto débiles, lo que explica, teniendo en cuenta que en la Cueva existe agua en estado líquido, el valor alto, próximo al 100%, que posee la humedad relativa del aire.

Las diferencias de temperatura representadas en las figuras anteriores, son generalmente siempre mayores en los meses de diciembre, enero y febrero y tienen en ellos valores positivos, presentando en general diferencias negativas máximas en los meses de agosto y septiembre. Este era el resultado previsible dadas las diferencias de temperaturas entre el Hall y la Boca de la Cueva. Esto indica la existencia de intercambios convectivos con el exterior durante los meses citados, aunque es necesario añadir que no señalan obligatoriamente la existencia de intercambios máximos durante ellos, debido a que la diferente temperatura del aire intercambiado provoca efectos cuantitativamente distintos.

Cuando las diferencias de temperaturas entre las temperaturas de las superficies rocosas y la del aire de una Sala se estudian comparativamente se encuentran valores diferentes para cada una de las Salas de la Cueva. Este hecho puede justificarse como una consecuencia del distinto nivel de intercambio de aire en cada Sala. Admitiendo esta hipótesis se concluye, del examen de las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13, que existe en la Cueva un nivel gradual de intercambios de aire con valores de mayor a menor intensidad en el Hall, en el 2º Ramal, en el Pasillo que lleva a la Sala de Polícromos y en la Sala de los Muros, Sala de Polícromos y Pre-Gran Sala, respectivamente.

III. FLUJOS DE AGUA EN LA SALA DE POLICROMOS

La existencia de una alta humedad relativa del aire de la Sala de Polícromos es debida a que el agua impregna constantemente las superficies de esta sala, produciendo goteo en diferentes puntos del techo policromado. Este goteo es representativo del aporte de agua que tiene lugar en la Sala, y

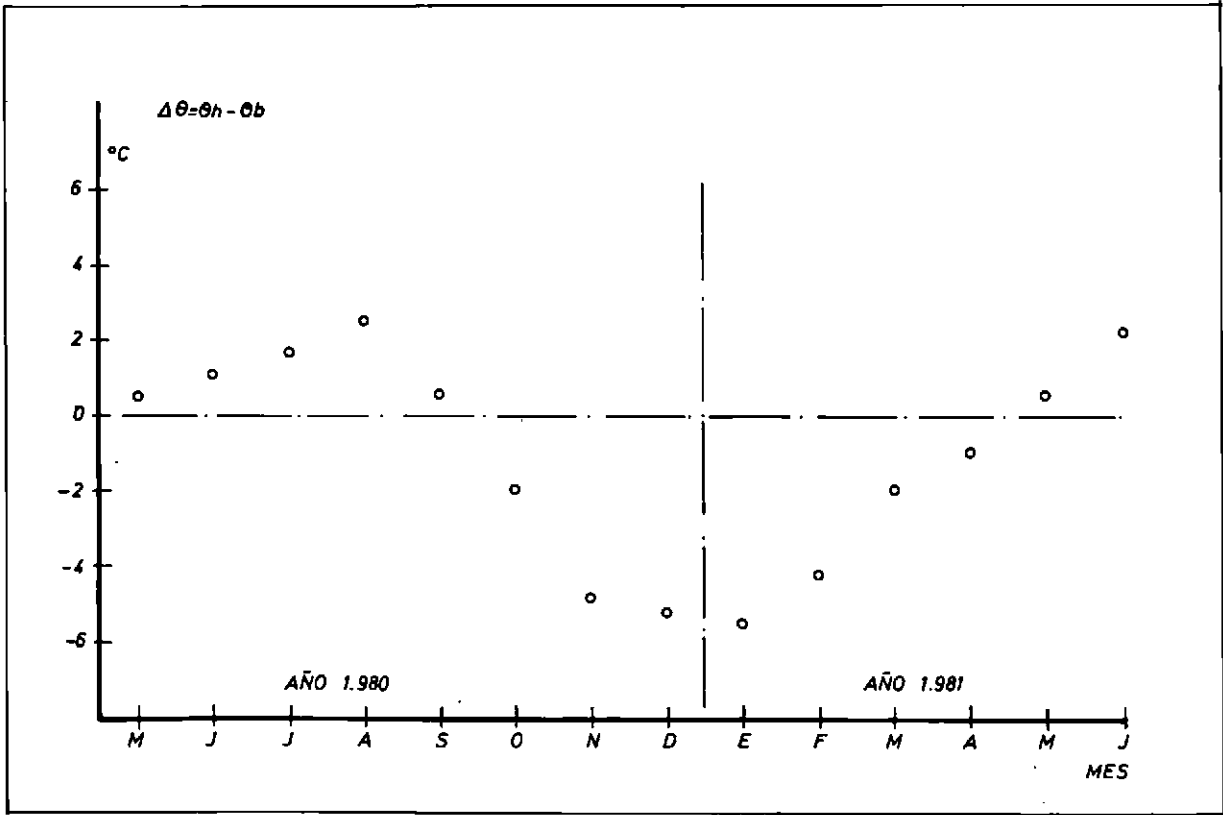


Figura 1.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_h - \theta_b$ entre el aire del Hall y el de la Boca de la Cueva (exterior).

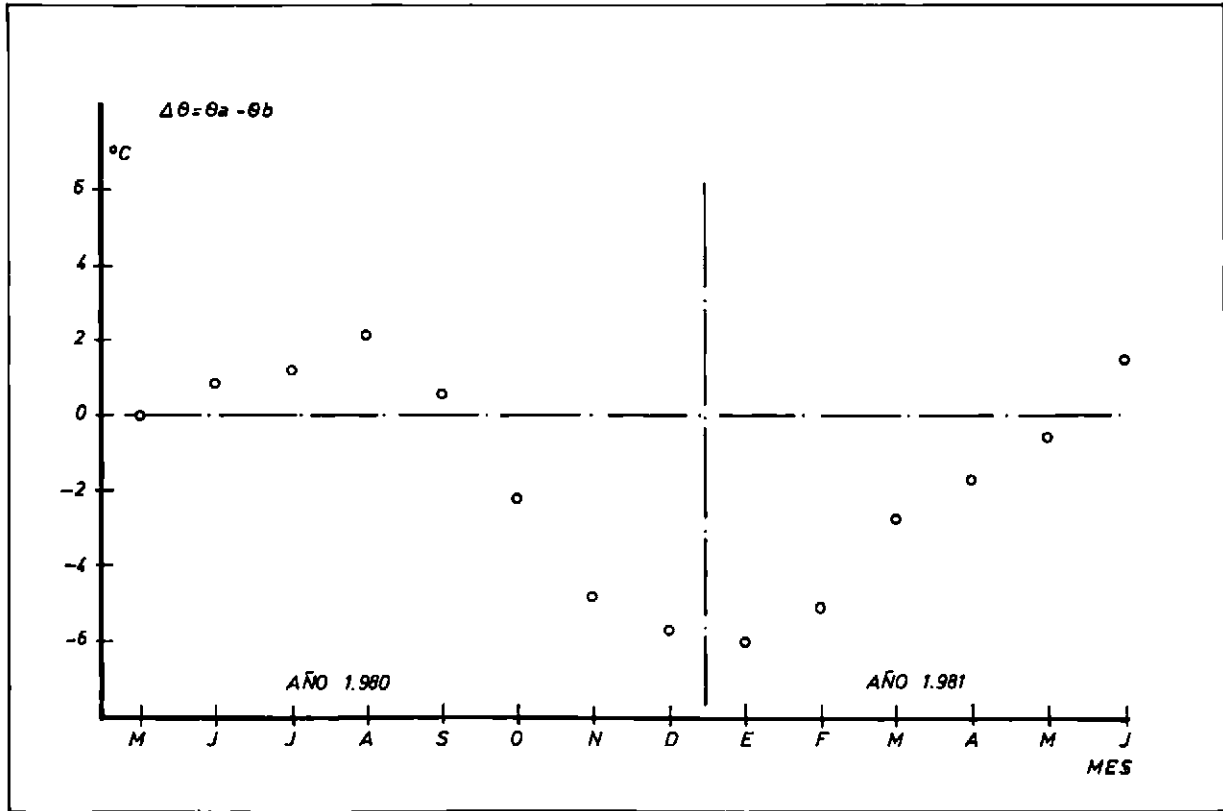


Figura 2.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_a - \theta_b$ entre el aire de la zona denominada «Ante segunda puerta», inmediatamente a continuación del Hall, y el de la Boca de la Cueva (exterior).

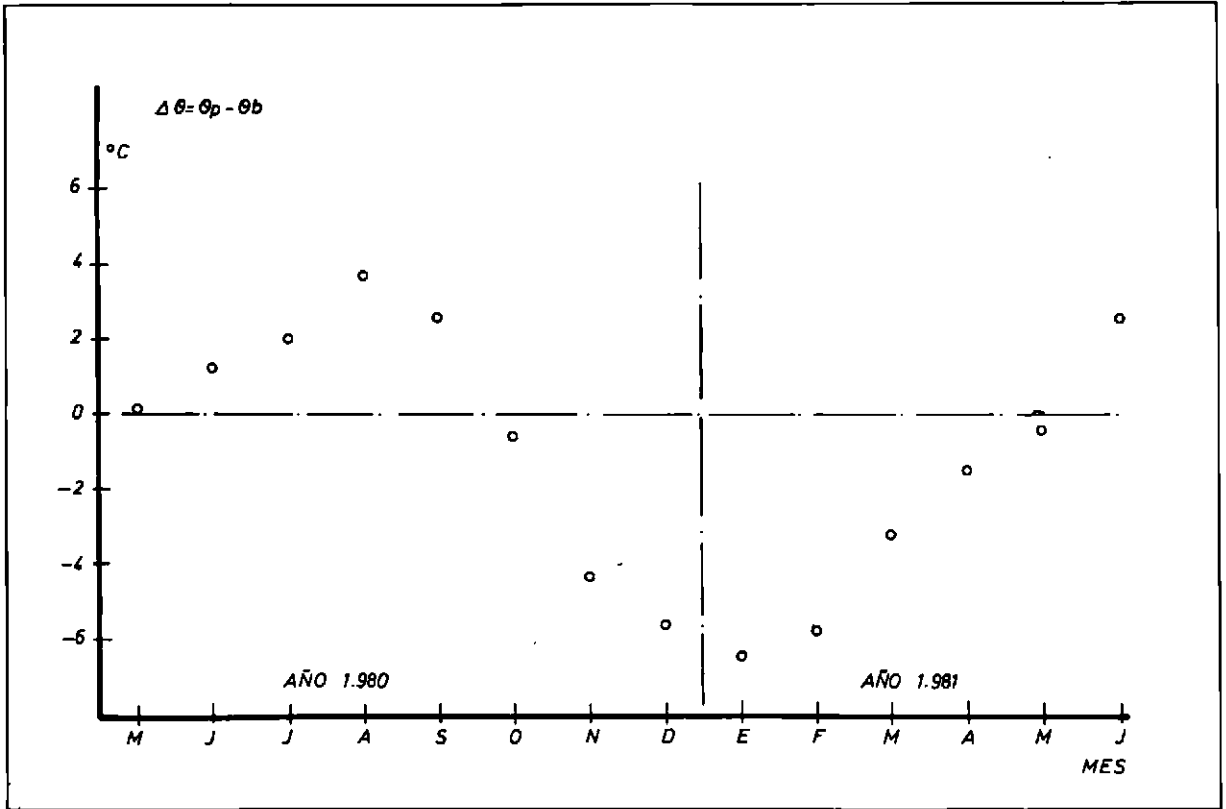


Figura 3.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_p - \theta_b$ entre el aire del pasillo que conduce a la Sala de Polícromos y el de la Boca de la Cueva (exterior).

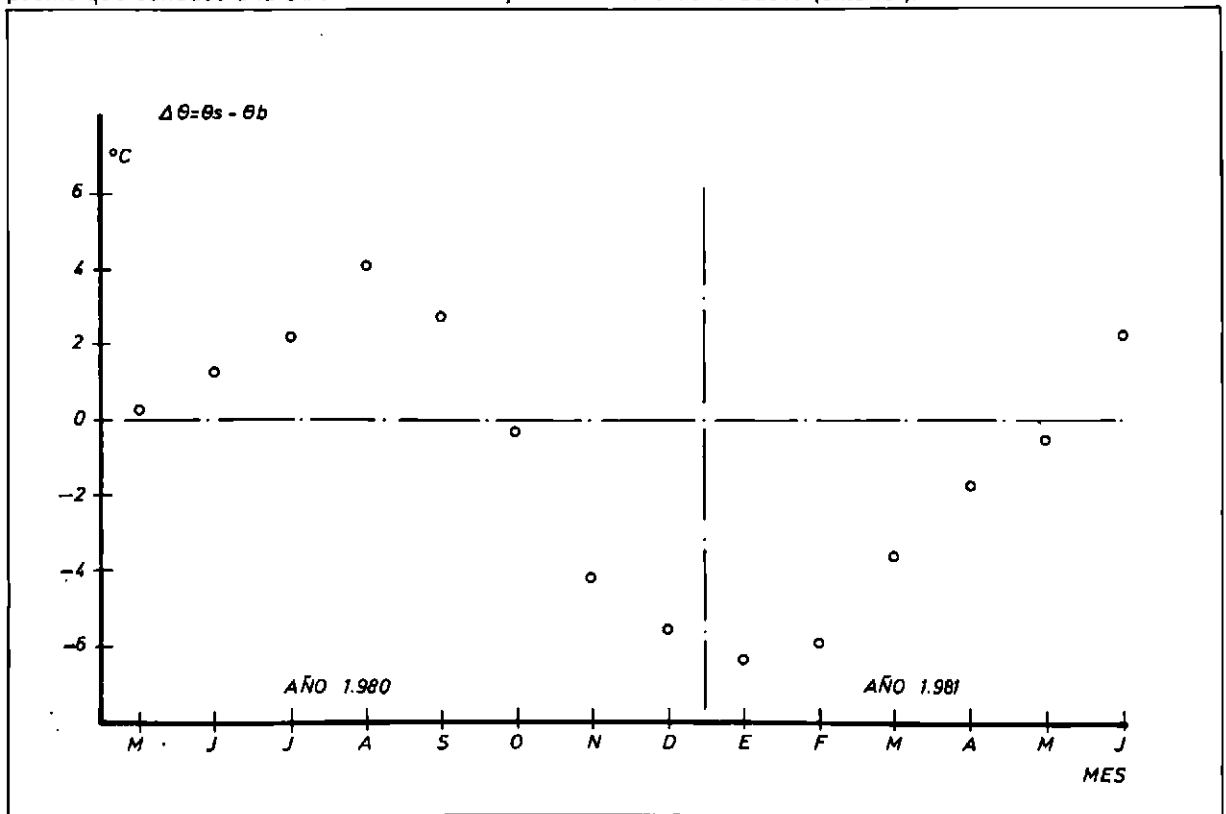


Figura 4.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_s - \theta_b$ entre el aire de la Sala de Polícromos y el de la Boca de la Cueva (exterior).

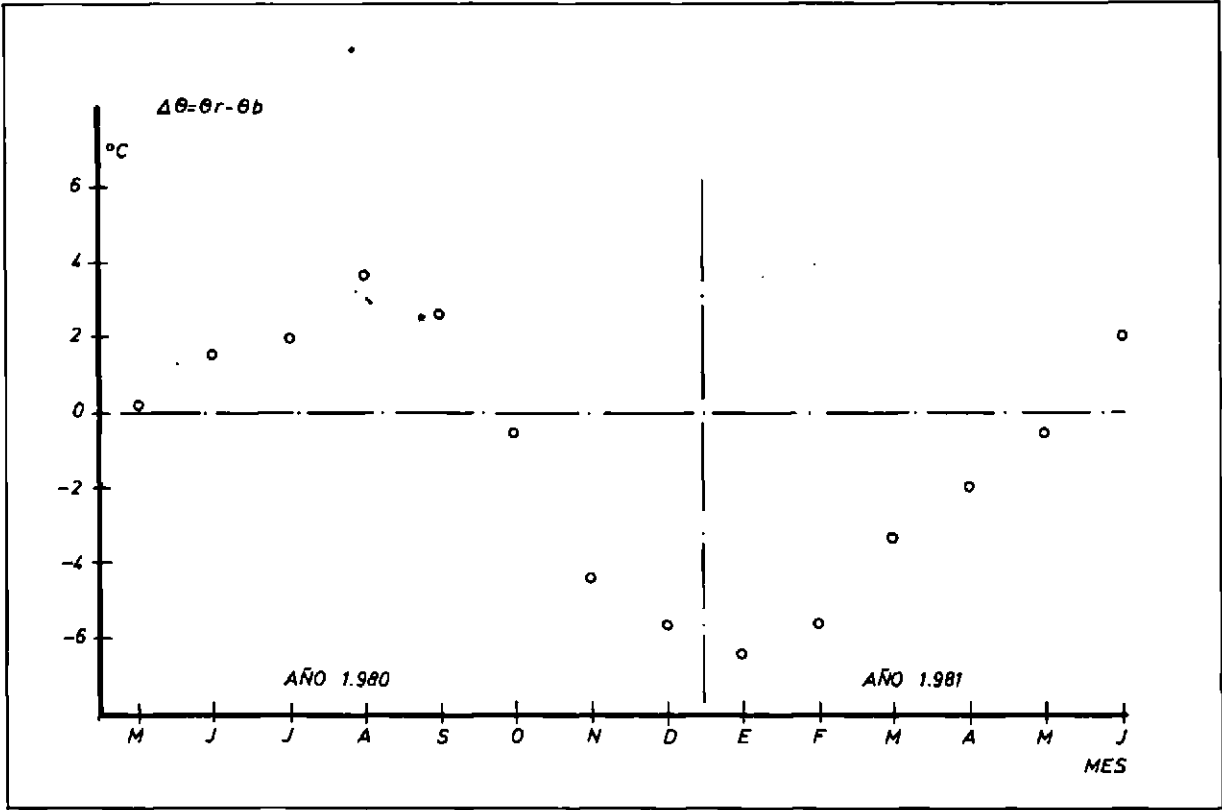


Figura 5.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_r - \theta_b$ entre el aire del Segundo Ramal y el de la Boca de la Cueva (exterior).

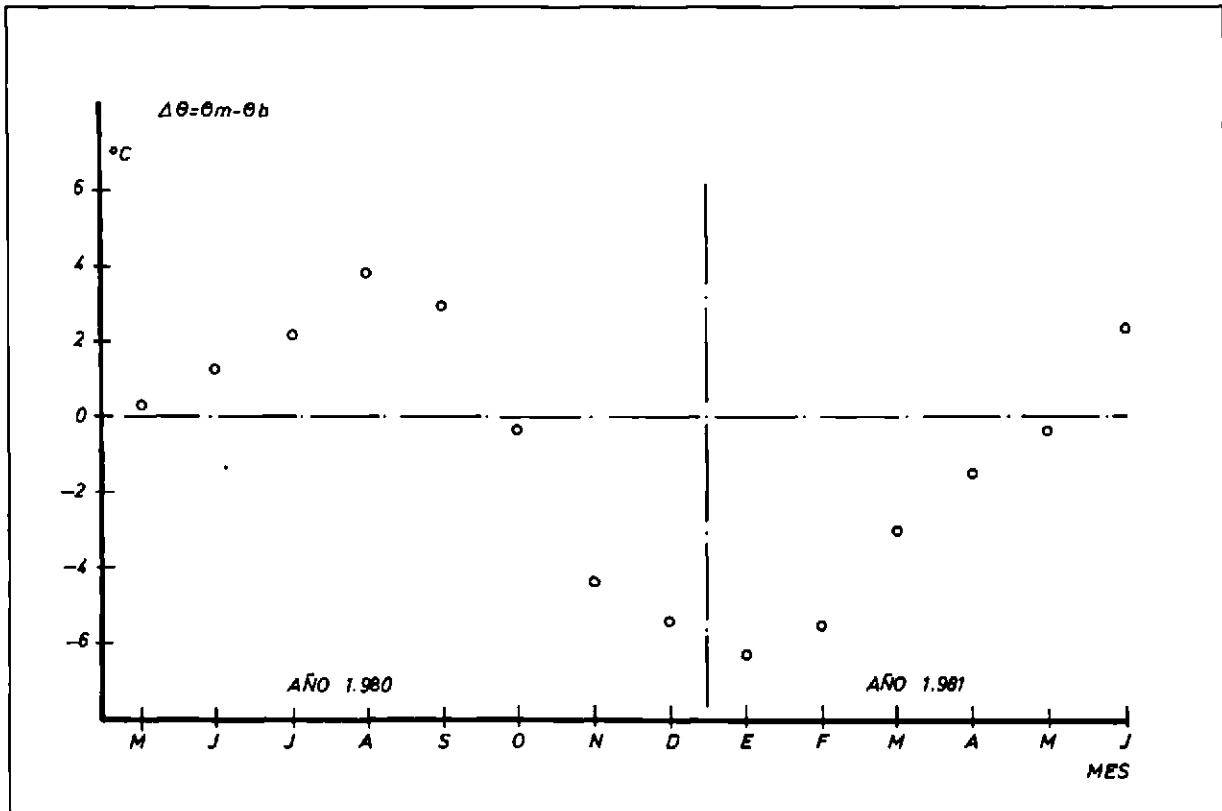


Figura 6.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_m - \theta_b$ entre el aire de la Sala de los Muros y el de la Boca de la Cueva (exterior).

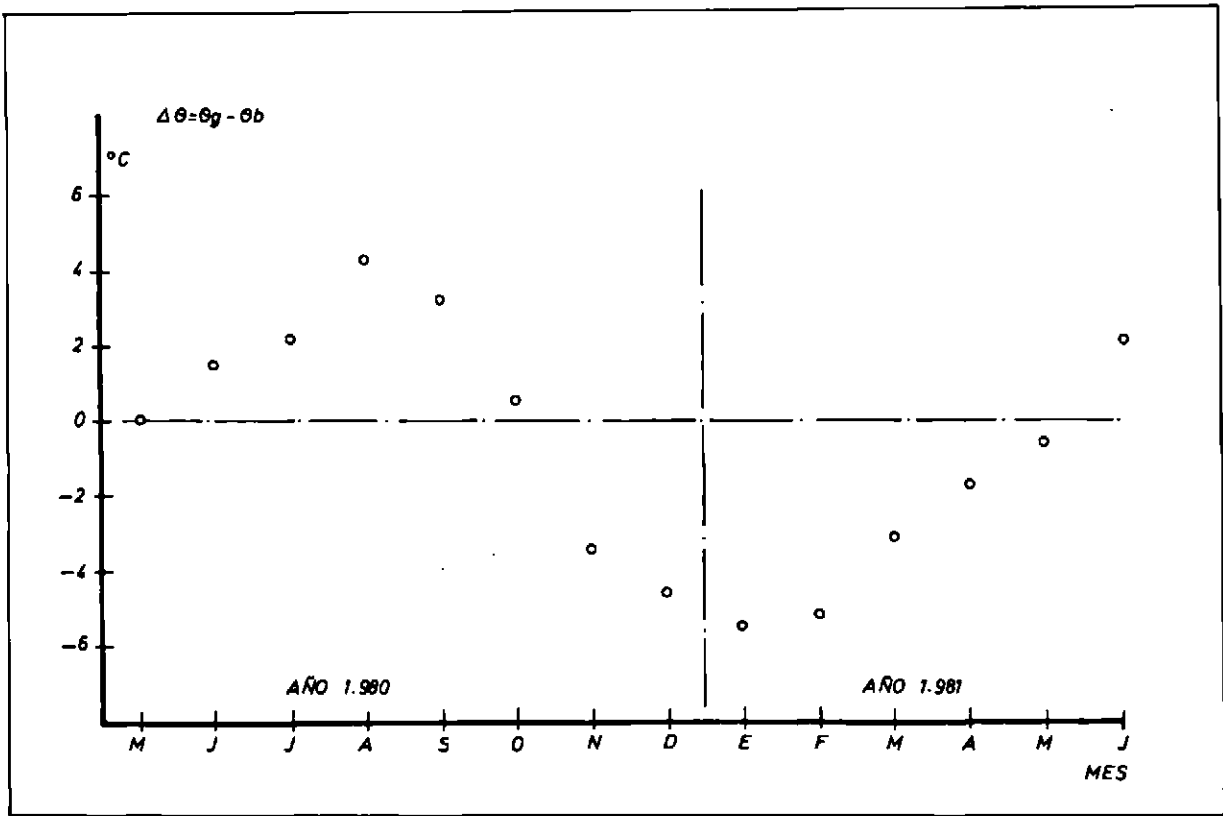


Figura 7.—Variación anual de la diferencia de temperaturas medias mensuales $\Delta\theta = \theta_g - \theta_b$ entre el aire de la Pre-Gran Sala y el de la Boca de la Cueva (exterior).

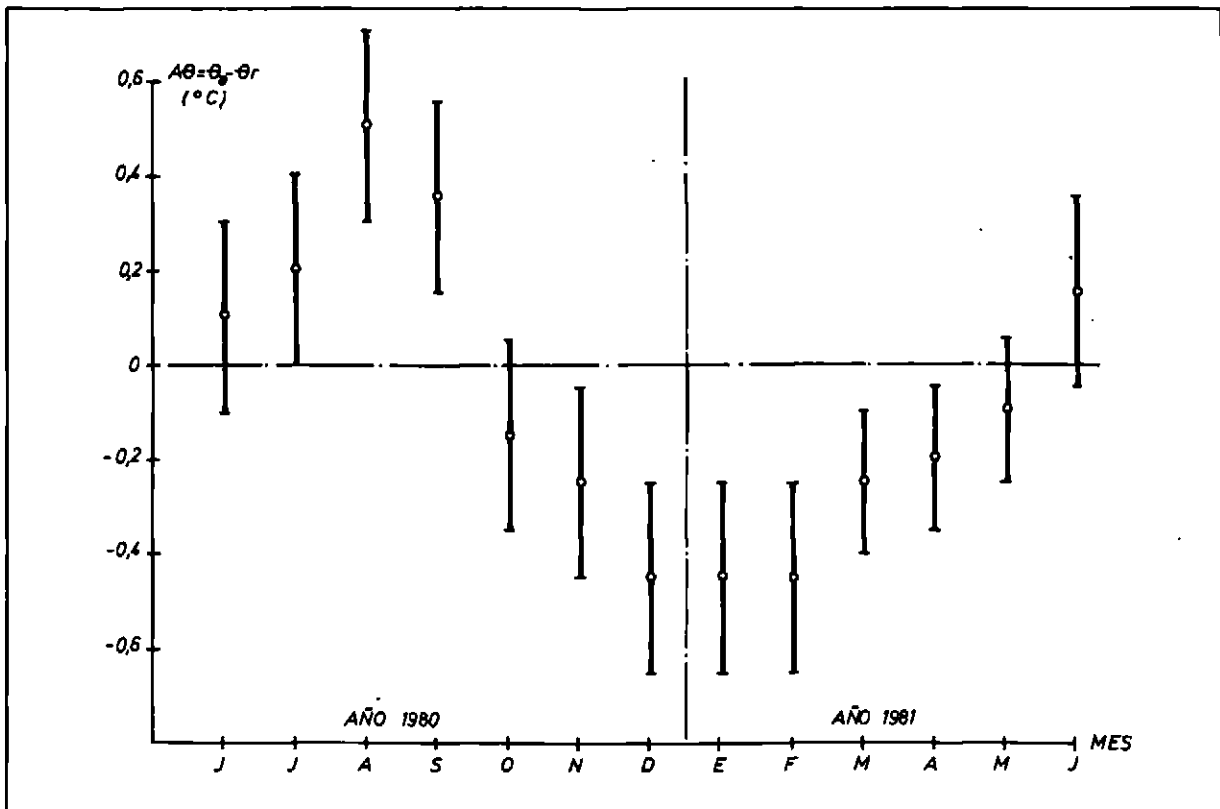


Figura 8.—Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_s y de la roca θ_r en el Hall de entrada a la Cueva.

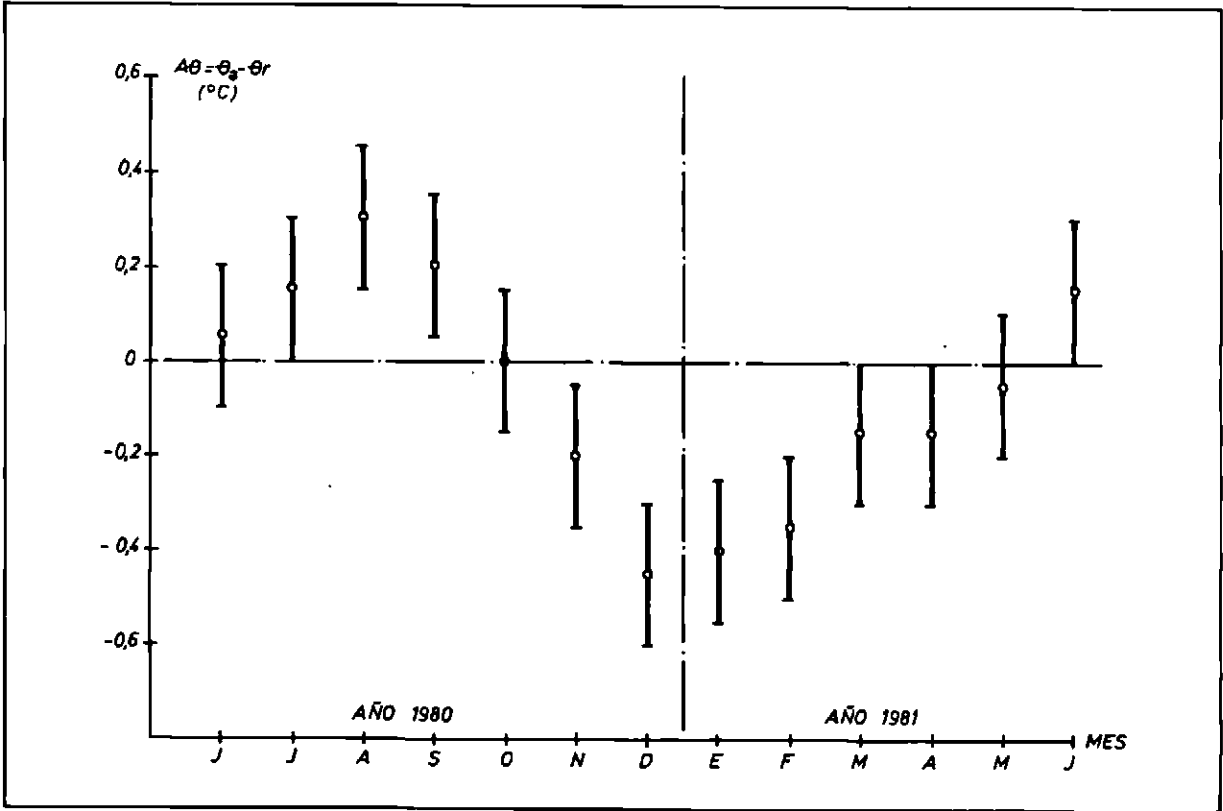


Figura 9.— Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_a y de la roca θ_r , en el pasillo de acceso a la Sala de Polícromos.

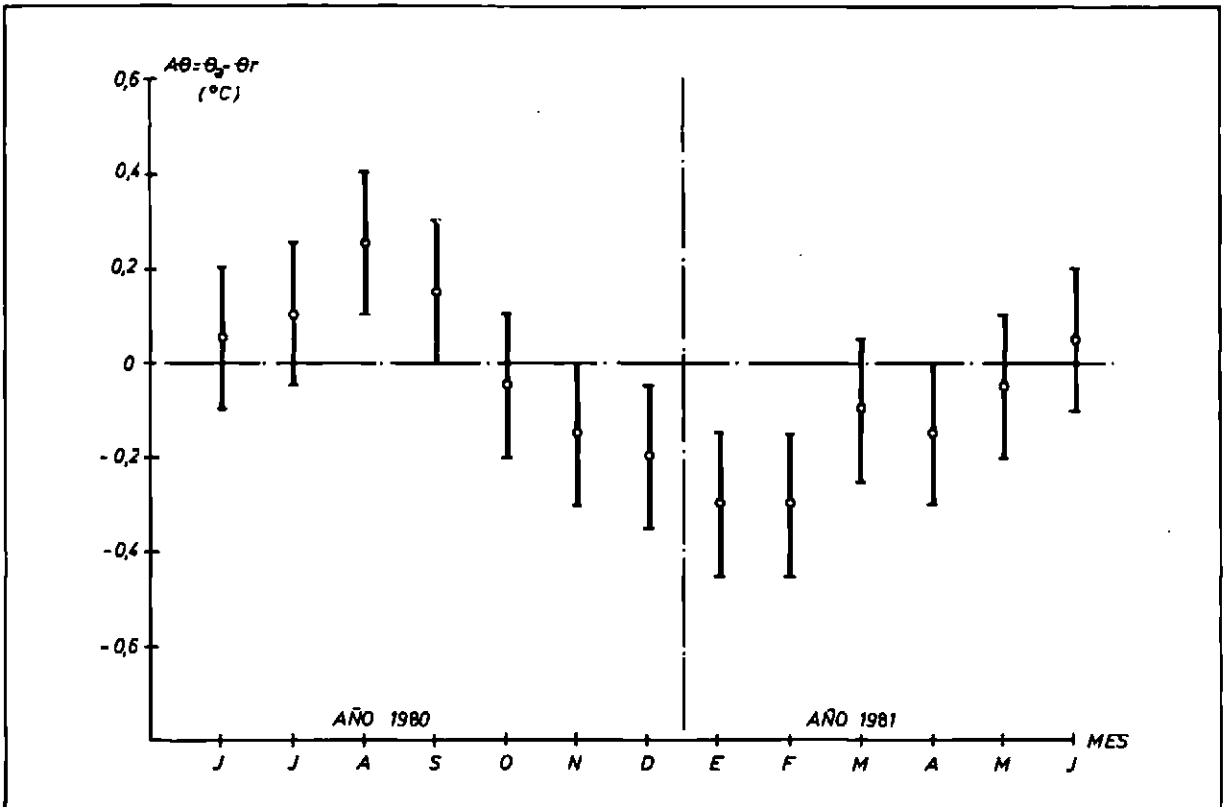


Figura 10.— Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_a y de la roca θ_r , en la Sala de Polícromos.

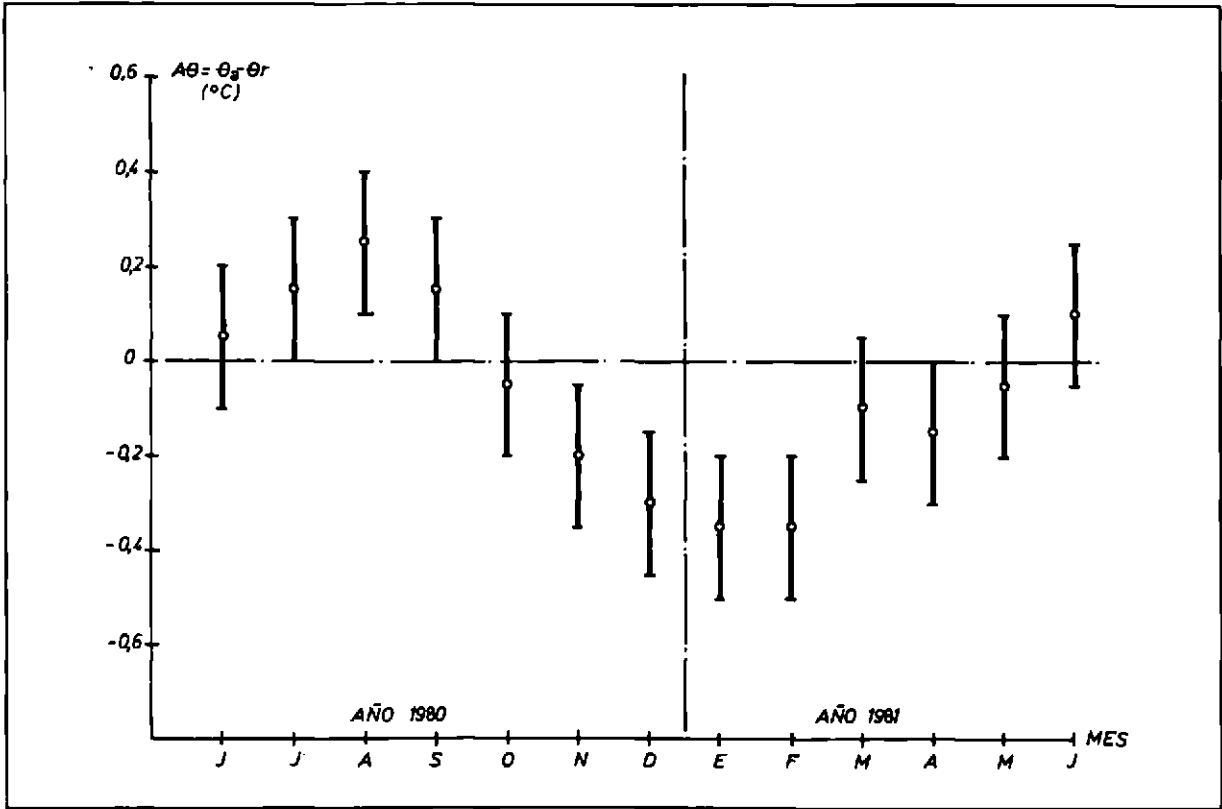


Figura 11.— Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_a , y de la roca θ_r , en el Segundo Ramal.

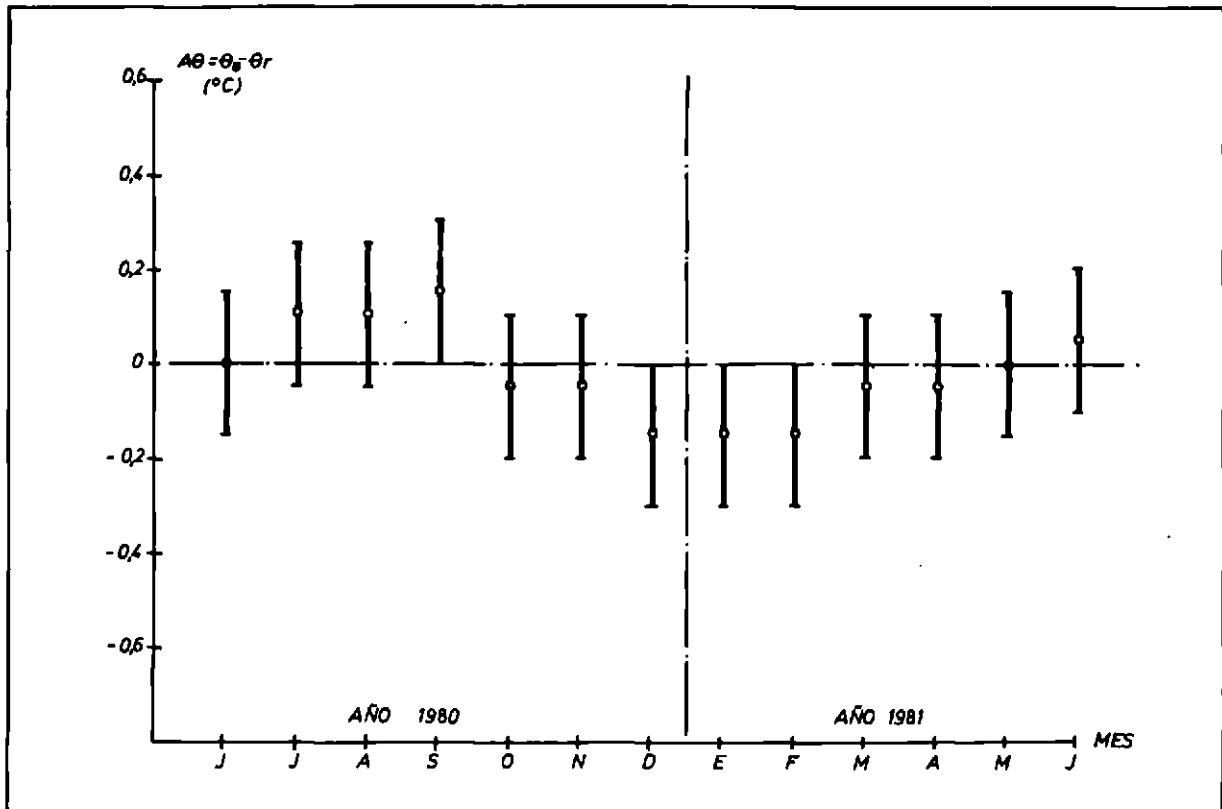


Figura 12.— Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_a , y de la roca θ_r , en la Sala de los Muros.

para su estudio hemos elegido diez puntos de goteo del techo, bien significativos, y hemos situado convenientemente diez probetas de vidrio (sobre las que hemos colocado embudos de aproximadamente 60 cm² de boca) con el fin de recoger el agua que rezuma de dichos puntos. Los diez puntos estudiados son los que están representados y numerados en la figura 14.

En la figura 15 se han representado los caudales medios mensuales de los puntos marcados como 1, 3, 11, 12 y 15, hallados a partir de los valores medios diarios, en cm³/día, del caudal de agua en cada punto. Asimismo, en la figura 16, se han representado los caudales medios mensuales, obtenidos del mismo modo, correspondientes a los puntos numerados como 2, 4, 5, 13 y 14. En ambas gráficas se observa como los primeros muestran un caudal prácticamente constante en el tiempo, con fluctuaciones anuales inferiores al 25%. En cambio, los puntos 2, 4, 13 y 14 muestran unas variaciones de caudal más acentuadas a lo largo del año. En un punto del techo, fuera de la Sala Policromada, situado enfrente de la escalera que conduce a ésta, no solamente el goteo es muy importante, sino que también lo son las variaciones temporales del caudal que se recoge.

En la figura 17 hemos representado la cantidad de lluvia, en mm, recogida en un pluviómetro situado en el exterior de la cueva, en función del tiempo. Comparando los volúmenes recogidos en los diferentes puntos de la Sala de Pinturas con los valores pluviométricos, no se observa ninguna correspondencia clara entre ellos, durante el período de medida señalado.

En la figura 18 se ha representado el caudal total mensual que fluye a la Sala proveniente de los diez puntos de goteo indicados. El valor medio mensual es de aproximadamente 6 litros y la fluctuación de ± 1 l, que es relativamente pequeña. Cuando se comparan las variaciones temporales del caudal total medido en el interior de la Sala de Pinturas con las correspondientes a los datos pluviométricos del exterior (*), no se encuentra más que una débil correspondencia, proveniente del hecho de que ambos caudales alcanzan su valor mínimo durante los meses del verano, aunque algo desplazado.

Siendo el volumen de la Sala de Pinturas de aproximadamente 326 m³ y considerando el aire del recinto con humedad saturante, el contenido de agua a cualquier temperatura (entre 13^o C y 15^o C) es inferior al flujo de agua líquida que penetra en la Sala, por lo que este flujo es capaz de mantener el aire en estado de humedad saturante.

IV. LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE LA CUEVA

Según el reciente informe geológico (2) y otros informes anteriores, (5) el tramo calizo en el que se halla enclavada la cueva de Átamira tiene un nivel muy superior al del nivel freático, lo que, conjuntamente con el estado de una karstificación muy débil, hace pensar que la dinámica hidrológica natural de nuestro ecosistema no experimenta apenas variaciones en el momento actual. En esta situación, cuasiestacionaria, las aguas filtradas, procedentes de las lluvias recientes o antiguas, impregnan constantemente paredes y techos y fluyen lentamente hacia zonas más profundas, que vierten, finalmente, en el río Saja. Aunque existen en la cueva oquedades importantes, que posiblemente comunican con pozos profundos, la mayor aportación de agua hay que atribuirla al régimen pluviométrico de la zona. El agua de lluvia que recoge la superficie exterior se distribuye por el terreno, a tenor de la permeabilidad de éste, siendo captada en parte por las raíces vegetales, y en parte evaporada según la insolación. Este agua que empapa el terreno, va penetrando hacia zonas más profundas, con una velocidad que es función de las características del suelo. Durante esta filtración, el agua va disolviendo y arrastrando diversas sustancias, por lo que la naturaleza de las sustancias disueltas y de los materiales de arrastre reflejará las características del terreno que atraviesa. El agua que aflora a los techos de la cueva, se acumula en los puntos más convexos, desprendiéndose en forma de gotas. Una vez que el agua ha alcanzado el suelo de la cueva, el proceso de filtración continúa, aunque en algunos casos se almacene en forma de charcos. El agua que va llegando a las distintas salas de la cueva tiende a evaporarse. Las condiciones de goteo permanente en las que se encuentra la cueva y la constante impregnación de agua en techos y paredes, hace suponer que la cantidad de agua que aflora es superior a la que se evapora. Entonces, si las salas fuesen recintos cerrados, esta evaporación daría lugar a una humedad relativa de saturación a la temperatura de la sala. Si la humedad de la sala no fuese, en cambio, del 100%, sería debido a fenómenos de ventilación, en los que estarían implicados intercambios de masas de aire de menor humedad relativa. La humedad relativa de una sala puede ser en estos casos indicativa del grado de ventilación de la misma.

Si la temperatura de la sala aumenta por cualquier causa, disminuye su humedad relativa y, en

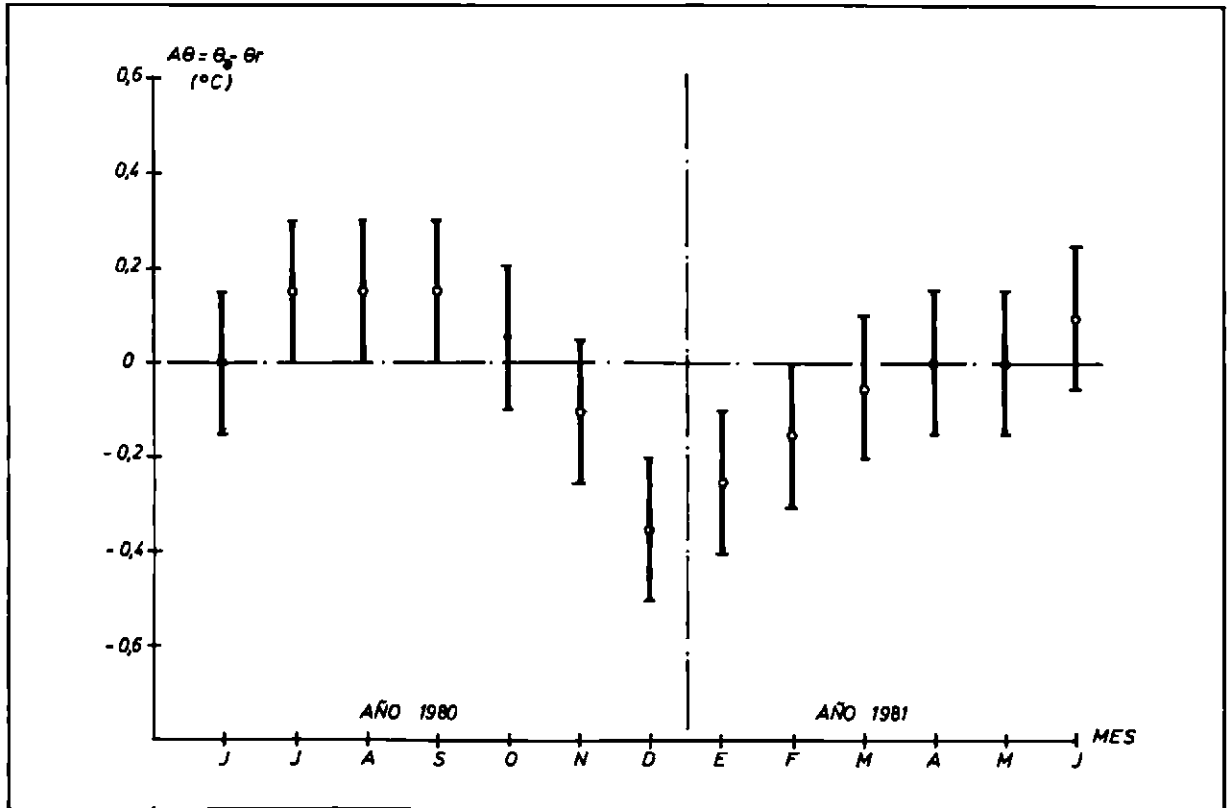


Figura 13.— Variación anual de la diferencia $\Delta\theta$ entre la temperatura media mensual de la superficie del aire θ_s , y de la roca θ_r , en la Pre-Gran Sala.

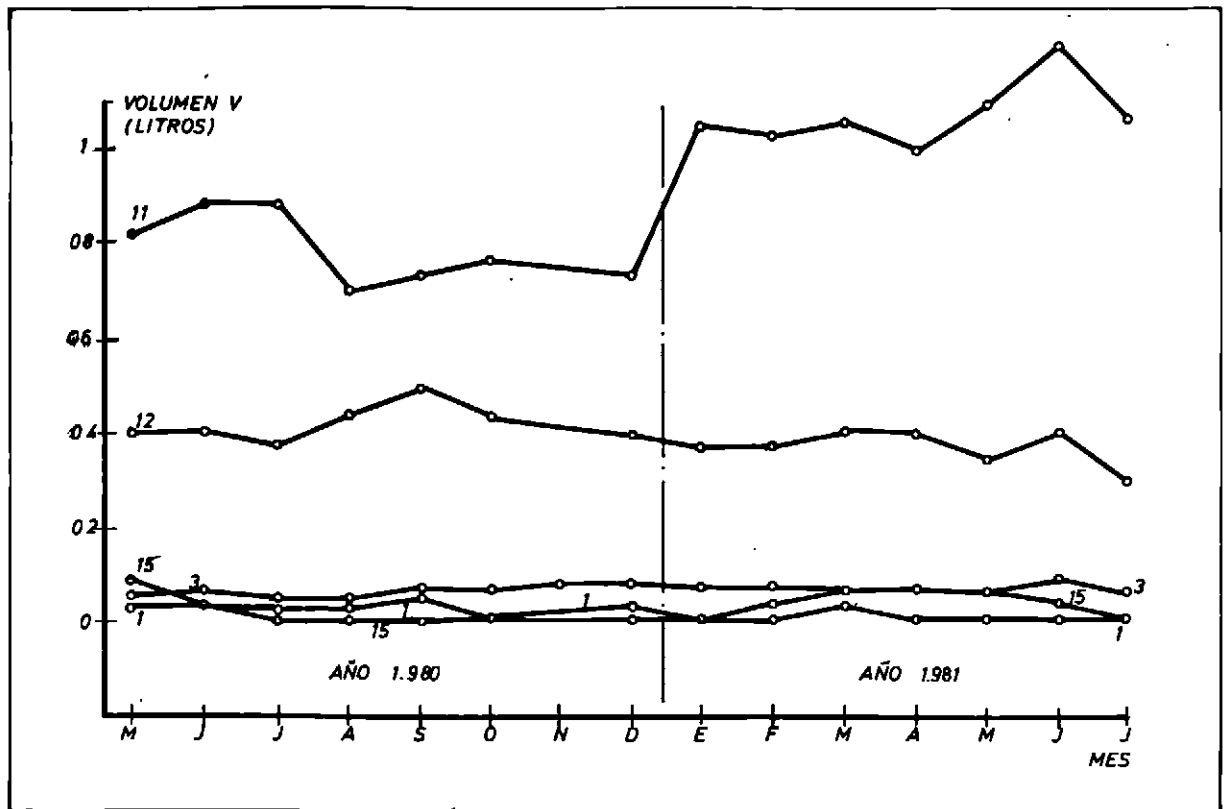


Figura 15.—Variación anual de los caudales medios de agua recogidos mensualmente en los puntos que se indican (1-3-11-12-15).

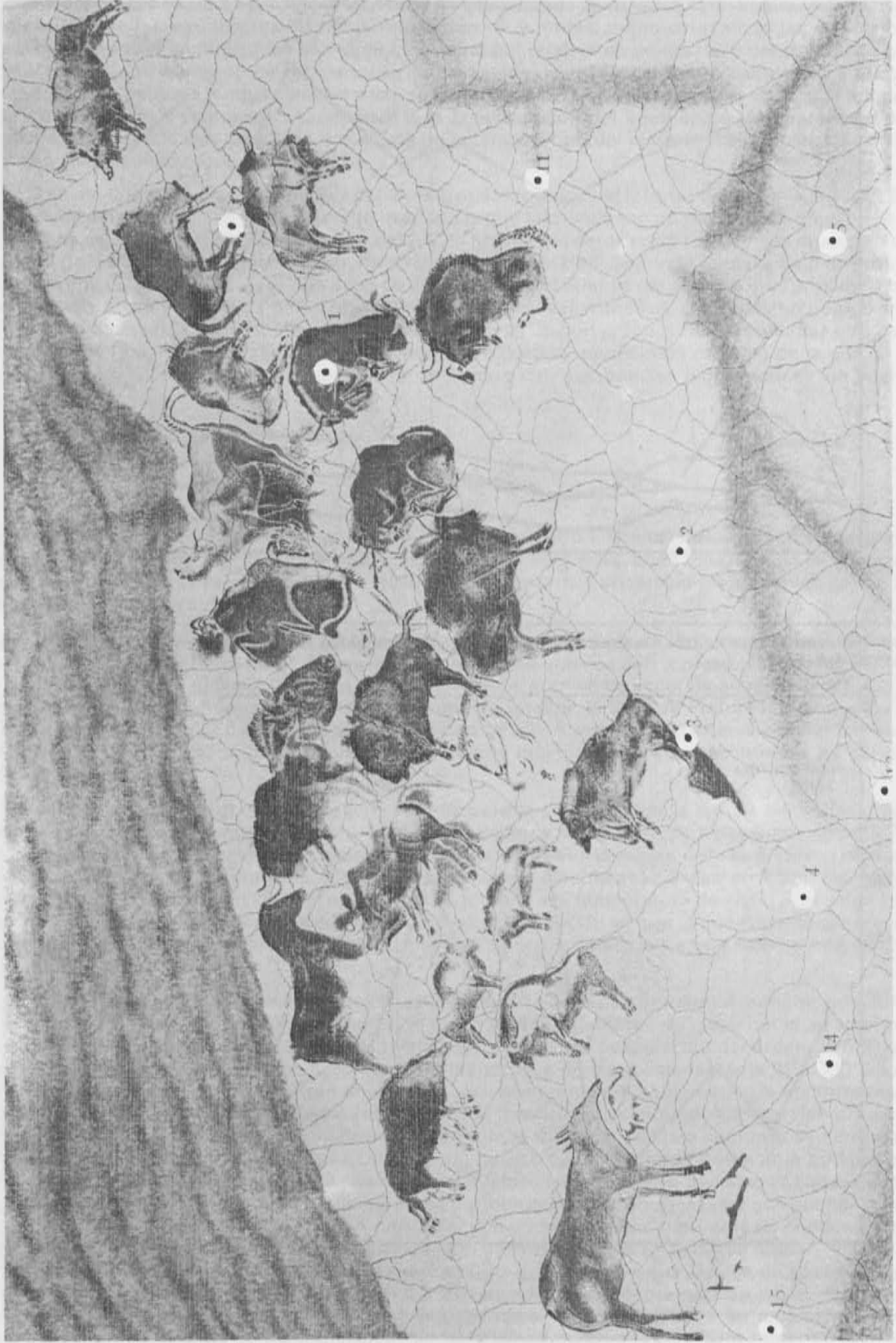


Figura 14.—Localización de los 10 puntos de goteo en la Sala de Policromos.

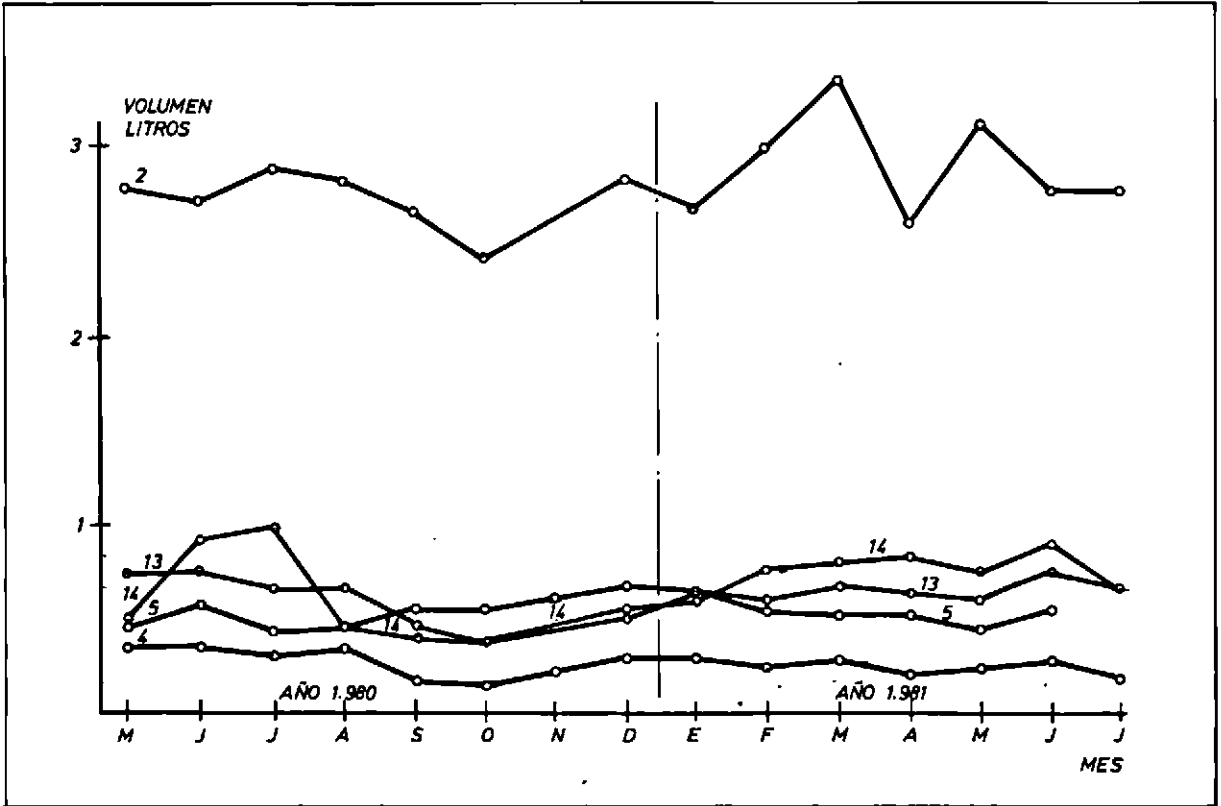


Figura 16.—Variación anual de los caudales medios de agua recogidos mensualmente en los puntos que se indican (2-4-5-13-14).

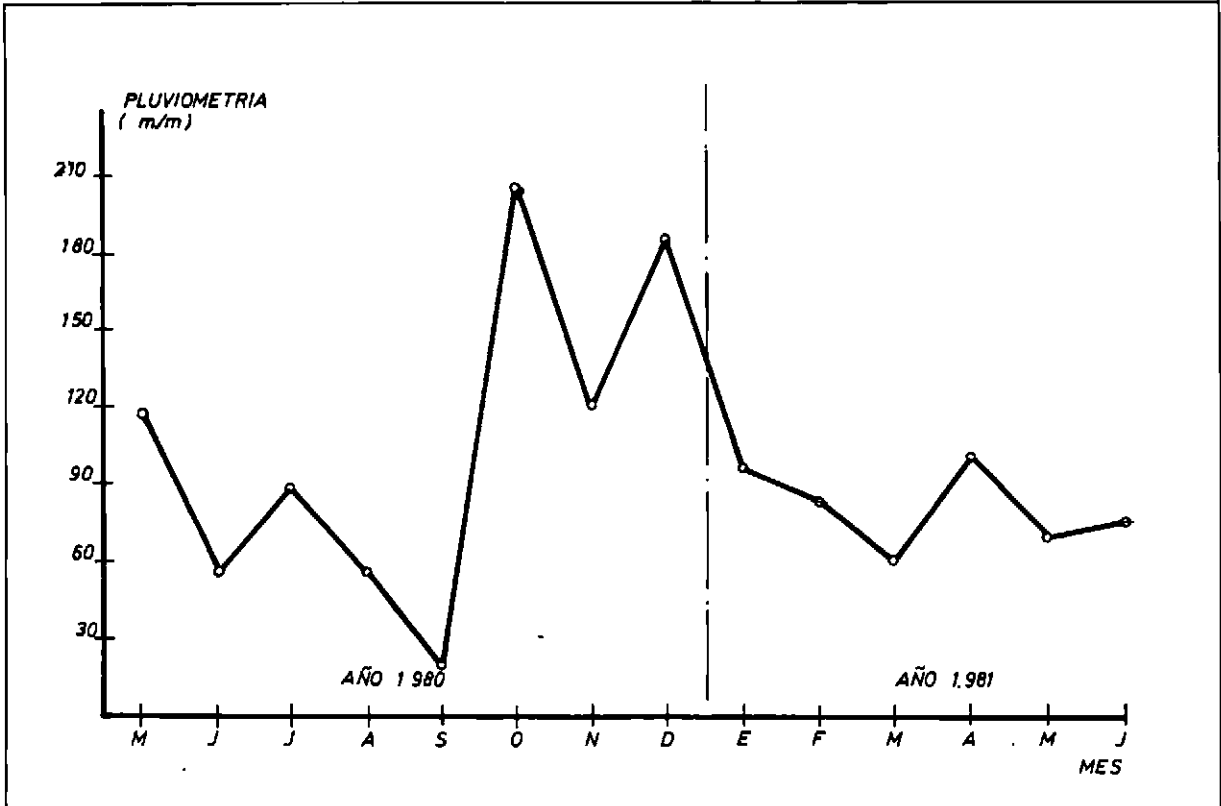


Figura 17.—Variación anual de la pluviometría exterior (mm) en Altamira.

consecuencia, se inicia un proceso de evaporación que tiende de nuevo a saturar el aire de vapor de agua. Cuando las variaciones de temperatura son muy lentas, como ocurre con las oscilaciones provocadas por la onda térmica estacional, la humedad relativa no se apartará demasiado de la de saturación. Si el aumento de temperatura fuese rápido, la humedad relativa disminuirá también rápidamente, bajando temporalmente a valores inferiores al 100%. En cualquier caso, si la temperatura de una sala disminuyese, se produciría la condensación del agua sobre las superficies de la misma, provocando una elevación transitoria de la temperatura del recinto, si el proceso de condensación fuese suficientemente rápido.

Las medidas de humedad relativa del aire en cuatro puntos del interior de la cueva, figura 19, se han realizado desde mayo de 1980 mediante sondas que proporcionan un registro continuo en banda de papel, estando afectadas por un error del 5%. El análisis de estos registros gráficos muestran que, dentro de los errores de medida, las humedades relativas de Hall, Segundo Ramal y Sala de Pinturas oscilan entre 95% y 100%. Este resultado de que la humedad relativa del aire sea muy próxima a la de saturación, se ve confirmada por el hecho de que sendos evaporímetros, colocados en puntos próximos a los de medida de la humedad, registran una evaporación prácticamente nula. Por otra parte, medidas de humedad realizadas con un psicrómetro portátil, en distintos recintos de la cueva, con errores del 1%, confirman los resultados obtenidos con las sondas higrométricas de registro continuo.

Haciendo uso de la fórmula usual

$$m_v = \frac{290}{T} \cdot P_v \quad (\text{g.m}^{-3}) \quad (1)$$

que nos da la masa de vapor de agua contenida en un metro cúbico de aire húmedo, a la presión atmosférica $P_0 = 760$ mm de Hg y a la temperatura T grados Kelvin, cuando la presión de vapor es P_v mm de Hg, podemos evaluar las características más importantes en relación al contenido de vapor de agua en la atmósfera de la cueva.

Con el supuesto de que en las condiciones naturales de la Sala de Pinturas el aire interior está siempre saturado de humedad, y disponiendo de las tablas que nos dan la presión saturante P_s a cada temperatura, hemos elaborado la Tabla I, que nos da los gramos de vapor de agua contenidos en un metro cúbico de aire húmedo, así como el contenido total de la Sala de Pinturas, suponiendo que posee un volumen de 326 m^3 , y además la densidad del aire húmedo, en el intervalo de temperaturas que va de 13° C a 15° C , que comprende los valores máximo y mínimo encontrados en nuestras determinaciones.

Admitiendo que en el término de 6 meses, debido a la onda térmica, la temperatura puede variar en $\Delta\theta = 2^\circ \text{ C}$, podrían condensarse $M_v = 0.4851$ kg de agua sobre las superficies internas de la Sala. Esto equivale a una condensación diaria, durante el lento enfriamiento debido a este proceso, de aproximadamente 2,7 gramos de agua, con una emisión calorífica del orden de 1.580 calorías por día. Si tomamos como densidad del aire húmedo saturado a la temperatura de 14° C el valor de $1,229 \text{ kg.m}^{-3}$, la masa total de aire húmedo en la Sala será de 398,079 kg, por lo que suponiendo que sólo el aire absorbiese esta energía calorífica, elevaría su temperatura en aproximadamente $0,02^\circ \text{ C}$, totalmente despreciable.

Aún en el Hall, en donde en algunas ocasiones, el aire puede experimentar aumentos de temperatura del orden de los dos grados en un solo día, o más exactamente en cinco horas, si admitimos que aquí el aire también estaba saturado de vapor de agua, se evaporarían del orden de 500 g del agua que impregna las paredes, pero aún suponiendo que las aproximadamente 300.000 calorías necesarias para este proceso fueran absorbidas exclusivamente del aire, originaría un enfriamiento de éste de unos $0,8^\circ \text{ C}$, si aproximamos el volumen de aire húmedo contenido entre el Hall y la Cocina a cuatro veces el de la Sala de Polícromos y admitimos que este espacio conjunto se comportase independientemente de las restantes salas, como parece deducirse de la autonomía que prácticamente gozan las distintas salas de la cueva en sus evoluciones naturales. Si a esto añadimos que las grandes masas rocosas también participarán en los intercambios caloríficos que acompañan a estos cambios de fase, pueden afirmarse, en principio, que estos procesos naturales de condensación y evaporación, apenas van a influir en la distribución de temperaturas de la cueva. Conviene considerar que quizás podrían existir salas en las que el flujo entrante de agua líquida de filtración fuese inferior al flujo saliente de vapor de agua por convección, como consecuencia de la velocidad de evaporación, y produjese una disminución importante de la humedad relativa, aunque esta situación no parece probable dada la débil intensidad de los intercambios convectivos.

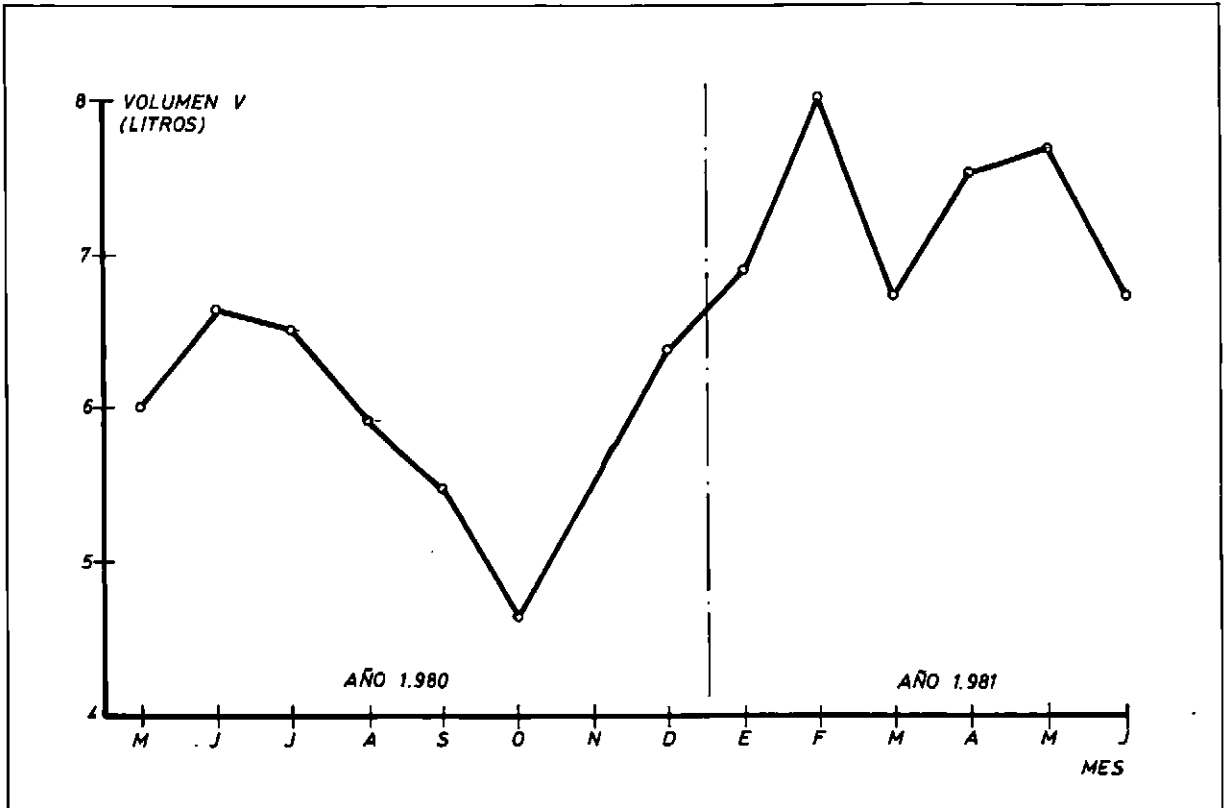


Figura 18.—Variación anual del caudal total de agua que fluye a la Sala mensualmente proveniente de los diez puntos de goteo elegidos.

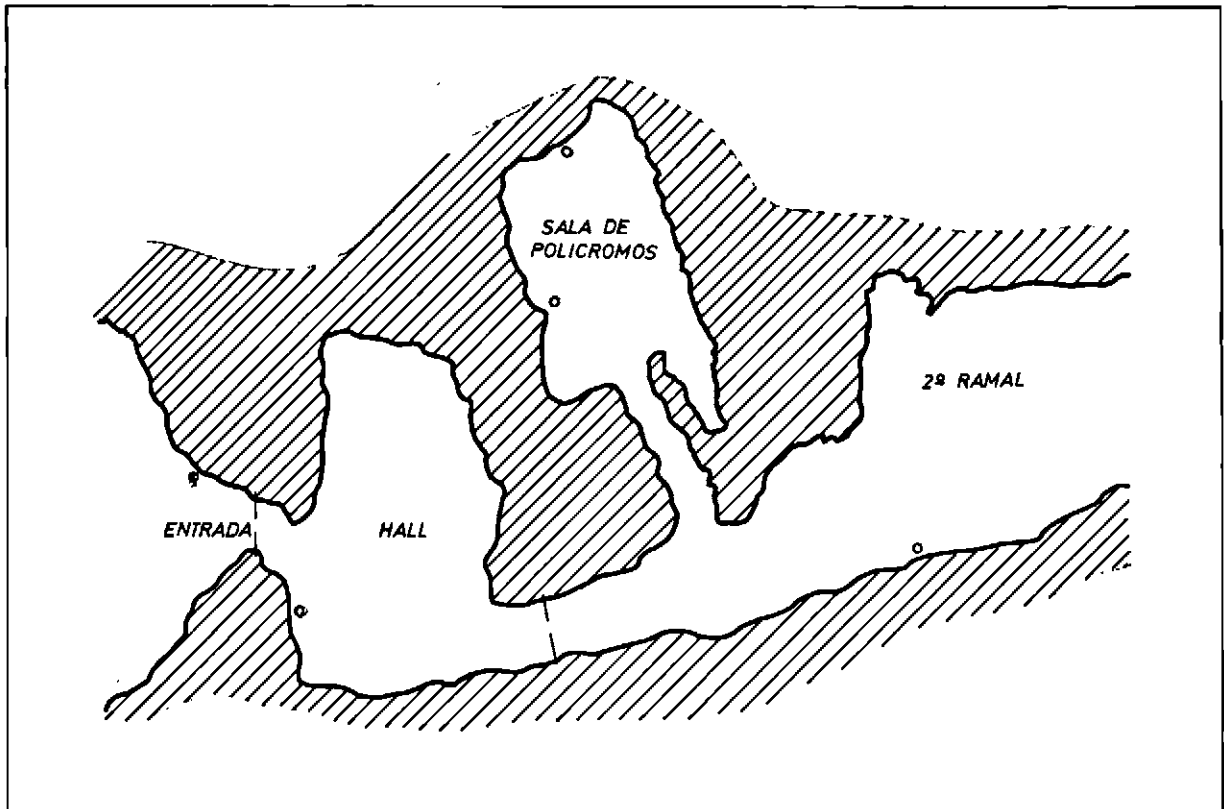


Figura 19.—Localización de los puntos en los que se han situado sondas termohigrométricas para las medidas de humedad relativa del aire.

TABLA I

Densidades y masas del aire húmedo saturado en la Sala de Polícromos para diferentes temperaturas.

θ (°C)	13,0	13,2	13,4	13,6	13,8	14,0	14,2	14,4	14,6	14,8	15,0
m, (gr/m ³)	11,3821	11,5240	11,6668	11,8124	11,9584	12,1060	12,2560	12,4068	12,5594	12,7139	12,8701
M, (Kg) (Total en la Sala)	3,7106	3,7568	3,8034	3,8508	3,8986	3,9466	3,9955	4,0446	4,0944	4,1447	4,1957
Masa total del aire húmedo en la Sala (Kg)	399,480	399,187	398,926	398,633	398,372	398,079	397,492	397,198	396,938	396,644	396,383
Densidad del aire húmedo (g/m ³)	1225,4	1224,5	1223,7	1222,8	1222,0	1221,1	1219,3	1218,4	1217,6	1216,7	1215,9

En particular, en la Sala de Polícromos, el agua que aflora es muy superior a los órdenes de magnitud de las masas de agua que intervienen en los procesos de evaporación y condensación, que pueden tener lugar a las temperaturas del aire de la Sala. En efecto, podemos evaluar la masa de vapor de agua M_c que se condensa (o evapora) mensualmente en las superficies rocosas de la Sala de Pinturas, en las condiciones de presión parcial de vapor P_v y temperatura del aire húmedo T , a través de la expresión aproximada

$$M_c = 0.26 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_v}{T} \quad (\text{kg/mes}) \quad (2)$$

deducida del número de choques

$$\phi = 1/4 \cdot n \cdot \langle v \rangle = 62 \cdot 10^{12} \cdot \frac{P_v}{T} \quad (3)$$

que por unidad de tiempo y de superficie efectúan las moléculas de agua del aire húmedo contra las superficies de la Sala, en donde $\langle v \rangle$ es la velocidad media y suponiendo que la superficie de la Sala es 1,5 veces la que se obtiene de considerar un recinto de 9 x 14 x 2,5 m³, dadas las rugosidades, grietas y prominencias. Resulta así que a 13° C, la masa de vapor de agua puesta en juego es de 230 g y a 15° C de 261 g. Por lo tanto, los órdenes de magnitud encontrados confirman que ni la masa total de vapor de agua contenida en los 326 m³, ni la que se pone en juego con los procesos de evaporación-condensación, superan la del flujo entrante, que como ya hemos visto es aproximadamente de 6 kg por mes.

V. EL ANHIDRIDO CARBONICO DE LA SALA DE POLICROMOS. SU CONCENTRACION COMO INDICE DE VENTILACION

Para determinar la concentración de anhídrido carbónico (CO₂) en nuestro ecosistema, la Sala de Pinturas, y su evolución con el tiempo, disponemos de una sonda, que actúa aspirando lentamente aire de la cueva y sometiéndolo a un proceso químico, que permite comparar el contenido de CO₂ del aire interior con el contenido de esta gas en el aire exterior. Los resultados que se obtienen, basados en las diferencias de conductividad térmica de las dos muestras de aire comparadas, se representan en una banda continua de papel, de manera gráfica y automática.

Mediante este dispositivo experimental, hemos realizado una campaña de medidas de un año de duración, desde mayo de 1980. Los datos recogidos a lo largo de toda la campaña demuestran que la concentración de CO₂ presenta a lo largo del día variaciones pequeñas, menores generalmente del 20% del valor de la concentración media existente, y relativamente lentas. A veces, sin embargo, tienen lugar disminuciones rápidas de la concentración, desde el valor inicial hasta otro mucho más bajo, y que tienen lugar en determinadas condiciones, cuando es muy distinta la temperatura exterior a la de la Sala. Estos fenómenos, evidentemente no estacionarios, no son significativos a la hora de realizar un estudio globalizado de la variación en el tiempo de la concentración de CO₂. Por lo tanto, al ser relativamente pequeñas las variaciones normales que se producen a lo largo del día, alrededor del valor medio, podemos suponer que la concentración de CO₂ sigue en este tiempo un régimen descrito esencialmente por su carácter estacionario, en el que no existen variaciones de la concentración.

Para caracterizar estos estados cuasiestacionarios, hemos calculado las medias mensuales a partir de los datos del registro continuo. Estas se han obtenido como promedio de los valores diarios del mes, que a su vez, han sido calculados como promedio de los valores encontrados cada tres horas. En la figura 20 se representa la variación que experimenta la concentración media mensual del CO₂ con el tiempo, en la Sala de Policromos. Se observa en ella que el valor máximo de la concentración de CO₂ corresponde al mes de mayo y el mínimo a septiembre. Los valores diarios, fuera de las condiciones extremas antedichas, son semejantes a los mensuales correspondientes, así, por ejemplo, en estas condiciones, el valor máximo diario obtenido a lo largo del mes de mayo, que a su vez es el valor máximo anual, y que resulta ser de 0,84%, no se separa del promedio mensual del mes de mayo, más que un 29%, del valor de éste.

Para analizar los resultados experimentales encontrados en estas condiciones estacionarias, hemos comparado las curvas de la figura 20, en la que también se representa la diferencia de temperatura, en valor absoluto, entre el aire de la Sala de Policromo y el del Hall, a lo largo del año. El desfase entre las dos curvas indica que debe existir una dependencia entre las dos magnitudes. Así, se encuentra que la concentración de CO₂ en la Sala de Policromos presenta una dependencia exponencial con la diferencia de temperaturas existente entre el aire de la Sala y el del Hall de la Cueva. Esta dependencia podría justificarse como una consecuencia de que los intercambios de aire, y por lo tanto, la ventilación de la Sala, son la causa principal de la variación que experimenta la concentración de CO₂, suponiendo en principio una producción constante de este gas, aportado por el flujo de agua de la Sala. Por ello, cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el Hall y la Sala de Policromos los intercambios de aire entre ambos también serán mayores, y como el aire del Hall posee una proporción menor de CO₂ que el de la Sala, un aumento de esta diferencia de temperaturas, dará lugar a una menor concentración de CO₂ en la Sala. La relación entre las dos magnitudes es independiente de que la diferencia de temperaturas entre las dos salas sea positiva o negativa, y puede expresarse de manera numérica mediante la exponencial decreciente (ver figura 21):

$$C = 0,70 \cdot \exp(-0,6335 \cdot |\Delta\theta|) \quad (4)$$

Esta ecuación expresa además que la concentración de CO₂ que puede esperarse para una diferencia nula de temperaturas es del 0,70%, y que una concentración igual a la del aire exterior, de 0,03%, se obtiene para una diferencia de temperaturas de aproximadamente 5 grados. Entre estos dos valores la concentración de CO₂ puede predecirse, siempre que se cumplan condiciones cuasiestacionarias, para cualquier diferencia de temperaturas entre el Hall y la Sala de Pinturas. El coeficiente de correlación de la ecuación (4) resulta ser del 95,4%.

VI. LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA DE LA SALA DE POLICROMOS

En varias ocasiones se han determinado los niveles de contaminación del aire de la Sala de Pinturas, mediante tubitos de control y análisis DRAGER, que se insertan firmemente en la cabeza de una pequeña bomba aspirante, cuya estanquidad se verifica cuidadosamente antes de la medida. Estos tubitos llevan una escala incorporada, sobre la que se puede leer directamente la concentración del contaminante estudiado, a través de la longitud de la columna interna que se ha coloreado, como consecuencia de la reacción química que ha tenido lugar entre el producto químico del que se compone y el aire aspirado.

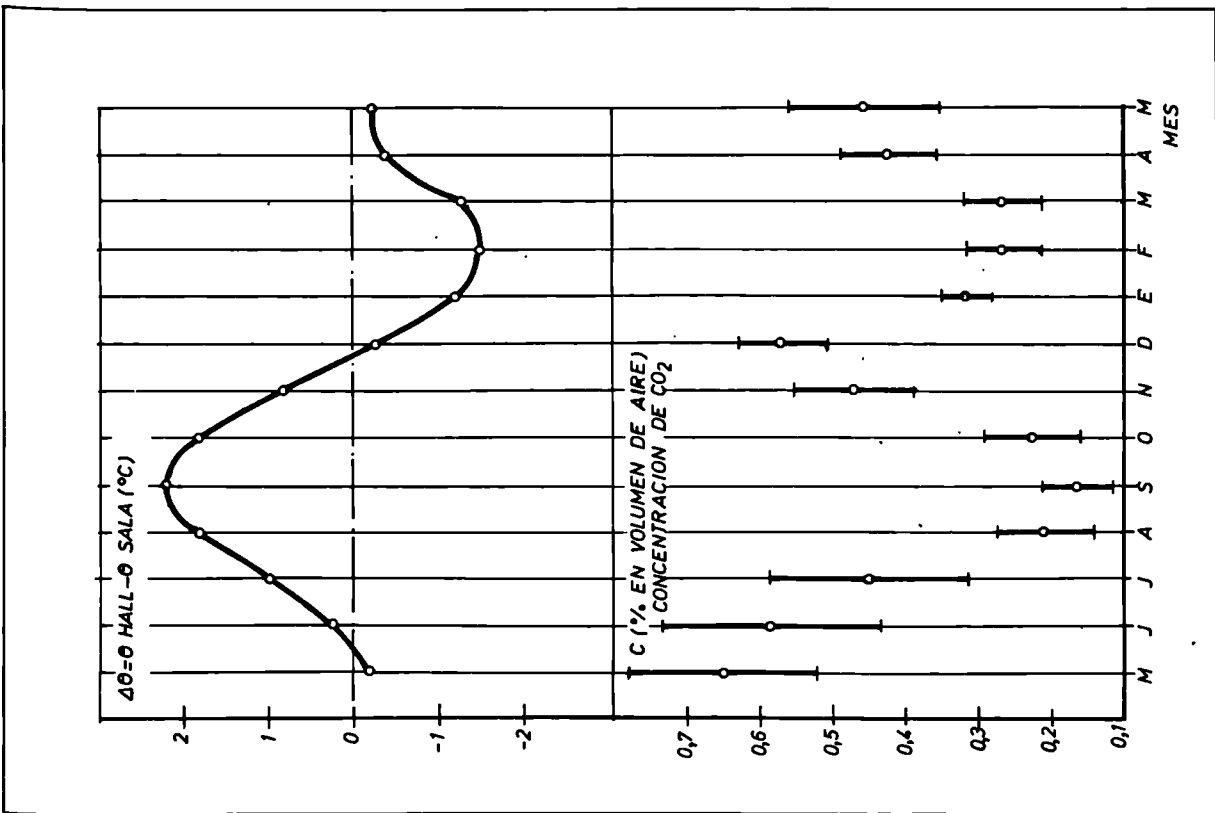


Figura 20.—Variación anual de la concentración media mensual de CO₂ C (en % de volumen de aire) en la Sala de Polícromos y de la diferencia de temperaturas $\Delta\theta = \theta_i - \theta_e$, entre el aire del Hall de entrada a la Cueva y el de la Sala.

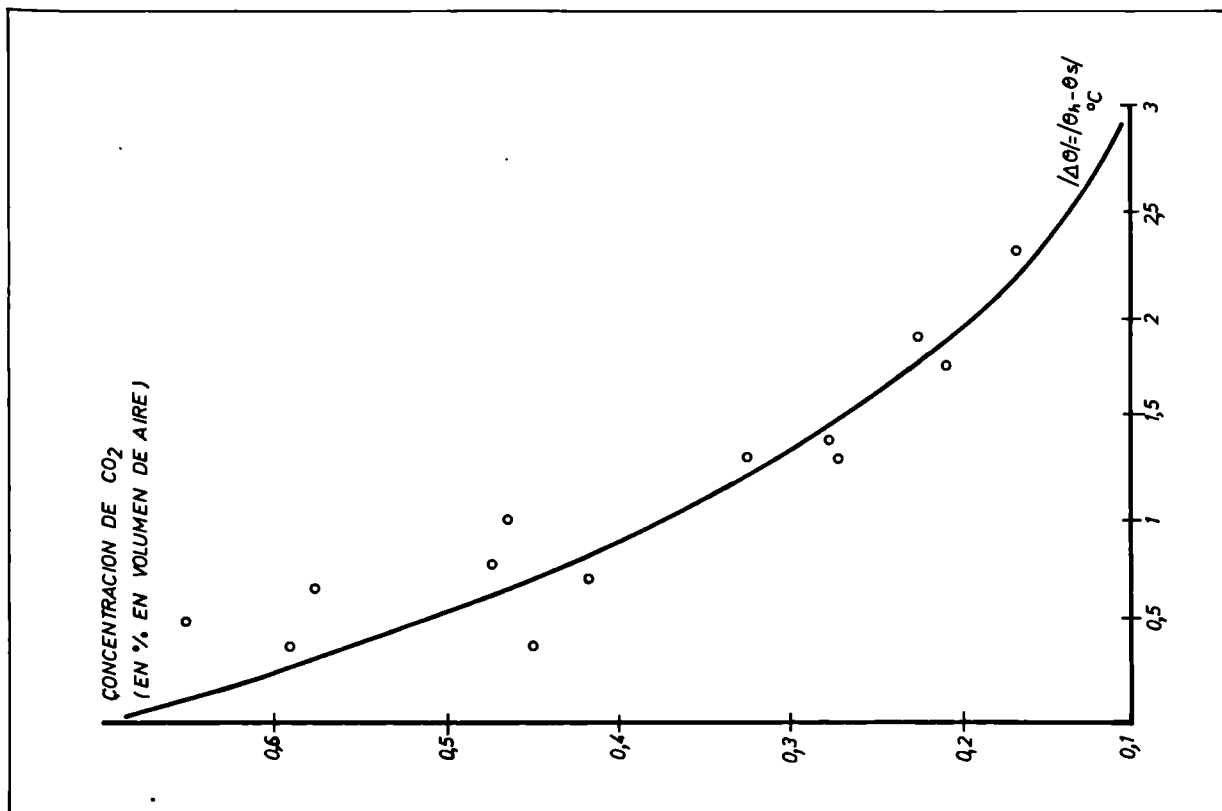


Figura 21.—Variación de la concentración de CO₂ en la Sala de Polícromos en función de la diferencia de temperaturas $|\Delta\theta| = |\theta_h - \theta_s|$ en valor absoluto, entre el aire de la Sala y el del Hall.

La última medida, realizada en un día de agosto, época en la que el intercambio de aire entre la Sala y el aire exterior, a través del Hall, era significativa, solamente el tubo detector de anhídrido carbónico ha presentado variación de color, indicando una concentración del 0,10%, coincidente con la registrada en el dispositivo de medida continua. Este mismo valor bajo de la concentración de CO₂ es un índice, como decíamos, de la ventilación de la cueva, es decir, de la entrada de aire del exterior, con pobre contenido de CO₂, pero posible portador de contaminantes.

Sin embargo, los resultados negativos encontrados para el anhídrido sulfuroso (SO₂), óxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO), indican que la concentración de contaminantes en la Sala de Polícromos es inferior a los límites de sensibilidad del instrumento de medida utilizado.

VII. CONCLUSIONES

Se han estudiado las características generales que presentan los intercambios de aire, agua, anhídrido carbónico y contaminantes que tienen lugar en la cueva de Altamira, y en particular en la Sala de Polícromos, y que hemos considerado como los flujos de materia inorgánica más importantes. Aunque el análisis de los datos obtenidos, mediante las mediciones realizadas, no permite calcular todavía estos flujos cuantitativamente; sin embargo, sí que ha permitido estudiar su dinámica, correlacionándolos entre sí y, sobre todo, con el campo de temperaturas, encontrando a su vez órdenes de magnitud, leyes de comportamiento y valores límites.

Respecto al flujo de aire, es decir, a la ventilación general de la Cueva las variaciones temporales que experimenta la diferencia de temperatura entre las superficies rocosas y el aire de cada sala, demuestran, en general, que en octubre y mayo es prácticamente nula, de acuerdo además con el hecho de que en estas fechas también son mínimas las diferencias de temperatura entre el aire del Hall, y el espacio llamado Post-Segunda Puerta, del Pasillo que conduce a Sala de Pinturas, de la Sala de Pinturas, del Segundo Ramal, de la Sala de los Muros, de la Pre-Gran Sala, y el aire de la Boca de la Cueva (exterior).

En particular, en la Sala de Polícromos el proceso convectivo podría describirse así: las masas de aire caliente del exterior van penetrando a la altura del techo durante los meses de junio y julio, hasta alcanzar un máximo en su movimiento a primeros del mes de agosto, aproximadamente. A partir de entonces, los flujos de aire entrante y saliente, debido a su lentitud o sea a la débil ventilación, hacen que la temperatura del aire se vaya igualando a la de la roca, hasta llegar a una situación prácticamente estanca, a mediados del mes de septiembre, en la que la temperatura del aire sigue las variaciones periódicas de la temperatura de las superficies rocosas que le encierran. Desde mediados de noviembre, el aire caliente, en contacto con el techo, se dirige ahora hacia el exterior, penetrando aire frío, de modo que la diferencia entre la temperatura más caliente del techo y la del aire de la Sala de Polícromos va aumentando hasta alcanzar un máximo a mediados del mes de enero. De nuevo, estas temperaturas tienden a igualarse, disminuyendo su diferencia y volviendo a una situación de aire estanco, a finales del mes de abril o primeros de mayo, y el proceso se repite. El proceso descrito tiene lugar también en el resto de las Salas de la Cueva y prácticamente en las mismas fechas, aunque la intensidad de los intercambios de aire varía de unas a otras, siendo más intensos en el Hall, siguiéndole con menor intensidad progresivamente el Segundo Ramal, la Sala de los Muros, la Sala de Polícromos y la Pre-Gran Sala, como lo indica la amplitud de las diferencias $\Delta\theta$ en la misma época.

En cuanto al flujo de agua, a pesar de la débil dinámica kárstica de la Cueva, da lugar a una humedad relativa comprendida entre el 95% y el 100%, en todas sus Salas. En particular, en la Sala de Polícromos se encuentran puntos de goteo cuyo caudal, a lo largo de todo un año, no experimenta apenas variación; en cambio, existen otros que, de alguna manera, siguen las fluctuaciones que experimenta la precipitación local de Altamira, —aunque con un cierto retraso. En general, el muestreo de puntos de goteo elegido, parece indicar, que el caudal mensual de agua, que fluye desde el techo es prácticamente constante en la Sala de Polícromos. Los diez puntos de goteo más significativos proporcionan un flujo de agua de aproximadamente 6 ± 1 litros por mes, que aunque, desde luego, no representa el caudal total, todo hace suponer que este es relativamente reducido, aunque suficiente para mantener la humedad relativa de los aproximadamente 326 m³ de la Sala en estado saturante, en el intervalo de temperaturas de 13,3º C - 15,0º C.

Por otra parte, el flujo de anhídrido carbónico y, por lo tanto, la concentración de CO₂ en la

atmósfera de la Sala de Polícromos, experimenta variaciones periódicas con oscilaciones anuales que presentan un máximo de 0,65%, en el mes de mayo y un mínimo del 0,17%, en el de septiembre. Realmente si el flujo de agua es prácticamente constante, también lo será el aporte de CO₂ a la Sala, por lo que evidentemente la variación de su concentración, será función de la ventilación de la misma. Esta ventilación depende, como hemos visto, del valor absoluto de la diferencia de temperaturas $|\Delta\theta|$ entre el aire del Hall y el de la Sala, por lo que la concentración del gas carbónico dependerá asimismo de $|\Delta\theta|$. La ley de dependencia resulta ser exponencial decreciente, de modo que, cuando es nula la diferencia de temperaturas, la concentración de anhídrido carbónico resulta ser de 0,70%, y suponiendo que durante todo el año podemos asignar a la temperatura de la Sala de Polícromos un valor medio de $14 \pm 1^\circ \text{C}$, sólo en las épocas en las que la temperatura del Hall igualase o superase los $19 \pm 1^\circ \text{C}$, o iguale o sea inferior a $9 \pm 1^\circ \text{C}$, se alcanzarán concentraciones de CO₂ en el aire de la Sala iguales a la de la atmósfera exterior. Resulta que estas situaciones no han tenido lugar durante el año de medidas, encontrando como temperaturas máxima y mínima del Hall $16,4^\circ \text{C}$ y $12,5^\circ \text{C}$, respectivamente, en los meses de septiembre y marzo, lo que conduce según (4) a unas concentraciones de CO₂ de 0,17% y 0,31%, respectivamente, en buen acuerdo con las mediciones de esas fechas. En cambio la menor diferencia de temperatura entre el Hall y la Sala tiene lugar durante el mes de mayo, y presenta un valor de $0,3^\circ \text{C}$, que da lugar, mediante la aplicación de la expresión (4), a una concentración de 0,61%, que coincide con el valor encontrado experimentalmente para esta época. Por lo que respecta a la concentración de contaminantes en el interior de la Sala de Polícromos y en el aire exterior, las medidas efectuadas en diferentes ocasiones proporcionan resultados negativos para los tres contaminantes más importantes (SO₂, NO₂ y CO), lo cual indica que éstos se encuentran en concentraciones inferiores a los límites de sensibilidad del instrumento utilizado: 0,5 ppm. de NO₂, 0,1 ppm. de SO₂ y 0,1% (en volumen) de CO. Asimismo, los resultados encontrados en estas medidas confirman los valores de anhídrido carbónico (CO₂) registrados en el dispositivo de medida continua.

BIBLIOGRAFIA

- (1).— E. VILLAR: «Proyecto científico-técnico encaminado a la conservación de las pinturas de la cueva de Altamira». Noviembre (1979).
- (2).— G. GOMEZ-LAA: «Nota geológica e hidrológica sobre la situación de la Cueva de Altamira, en la provincia de Santander». Universidad de Santander (1980).
- (3).— R. GARCIA LORENZO, J. ENDERIZ: «La conservación de las cuevas prehistóricas y las pinturas ubicadas en ellas». Resúmenes de Symposium Internacional de Arete Rupestre, Santander, 1970, pp. 525-55 (1972).
- (4).— E. VILLAR, P. FERNANDEZ, L. QUINDOS, J. SOTO, R. SOLANA: «El campo de temperaturas en las cuevas de Altamira». Septiembre (1981).
- (5).— A. CENDRERO, J. NOYA, J. VALLE: «Estudio de la roca soporte de las pinturas rupestres de la Cueva de Altamira». Zephyrus XXVIII-XXIX, pp. 5-15 (1976).