

METODOLOGIA Y MODELIZACION EN EL ESTUDIO DE LA CONSERVACION DEL ARTE RUPESTRE

Eugenio Villar García*

I. OBJETO DE ESTA COMUNICACION

Los estudios que se han llevado a cabo por equipos científicos franceses y españoles^{(1) (2) (3) (4) (5)}, demuestran que la conservación de pinturas rupestres requiere una metodología de trabajo, así como la elaboración de modelos matemáticos que describan, dentro de márgenes de error aceptables, tanto el comportamiento natural del recinto en el que se encuentran las pinturas, como las alteraciones que pueden experimentar los parámetros ambientales, a consecuencia de la ocupación humana. Podría hablarse de un método general de trabajo, que podría servir de punto de partida para la elaboración y realización de cualquier Programa encaminado a resolver el problema de la conservación de pinturas rupestres, aunque se trate de vestigios. Esta metodología general puede dar lugar a una sistemática particular bien definida, según el tipo de ecosistema en el que se hallen las pinturas prehistóricas, ofreciendo a su vez, una gama de alternativas de decisión, a la hora de adoptar medidas concretas de protección. En base a la experiencia adquirida en estos estudios, y sin ser pretencioso, quisiera esbozar los aspectos generales de esta metodología, especialmente para el caso de recintos hipogeos, poniendo constantemente como ejemplo, el trabajo sistemático y original que hemos realizado en la cueva de Altamira. Desde esta reducida tribuna, sugiero que sería de gran interés para este tipo de estudios editar un Tratado para la Conservación del Arte Rupestre, en cuya elaboración participarían todos aquellos equipos que han profundizado en el tema.

II. CARACTERISTICAS GENERALES DE TODA INVESTIGACION ENCAMINADA A LA CONSERVACION DE PINTURAS RUPESTRES

A) No puede tomarse como objetivo el devolver a las pinturas las condiciones ambientales en las fueron realizadas, por las siguientes razones: 1.^a) porque no es lícito suponer que fuesen las mejores para su conservación; 2.^a) porque la paleoclimatología ha puesto de relieve los cambios climáticos ocurridos durante la era cuaternaria; 3.^a) porque en la mayor parte de los casos, una vez descubiertas unas pinturas rupestres, el hombre ha modificado su entorno, irreversiblemente.

Por estas razones hay que plantearse el estudio partiendo de las condiciones climáticas y de todo tipo en las que se encuentran las pinturas en el momento en que se ha decidido tomar medidas para su protección.

B) Si bien los resultados que se obtengan en estos estudios no pueden extrapolarse globalmente a otras obras de arte rupestre, situadas en otro tipo de emplazamientos y de climas, sin embargo, podría establecerse una sistemática general a la hora de elaborar un programa de trabajo y de ejecutarlo.

C) A la hora de planificar y de realizar estos estudios de conservación, se necesita la colaboración y coordinación de especialistas en diferentes áreas de conocimiento. Un equipo multidisciplinar adecuado sería el constituido, en principio, por físicos, químicos, geólogos, biólogos, ingenieros y arqueólogos.

D) En todos los casos, y muy particularmente en el caso de recintos subterráneos, puede definirse adecuadamente un ecosistema constituido por un espacio, más o menos extenso, limitado por una superficie, en parte real y en parte ficticia, que engloba una serie de elementos básicos, tales como las superficies rocosas que limitan su emplazamiento geológico, el aire que contiene, el agua que empaña sus superficies internas, las poblaciones biológicas que habitan en las rocas, en el aire y en el agua, y las propias pinturas prehistóricas.

E) Objetivo prioritario es estudiar la dinámica interna y las interacciones con el entorno de este ecosistema. La dinámica interna está caracterizada por una serie de procesos físico-químicos que afectan al deterioro de las pinturas: a) por depósito de materia: precipitación de sales, más o menos insolubles, eflorescencias, partículas de arrastre, establecimiento de colonias de hongos, algas, etc.; b) por acción química: disolución de la roca soporte y de los pigmentos, ataque de los productos del metabolismo de las colonias biológicas, corrosión por contaminantes de su atmósfera; c) por desprendimiento y arrastre: desescamación, levantamiento y caída de lascas, hundimientos gravitacionales. La interacción con el entorno se realiza a través de flujos de materia y de energía. El flujo de agua y de aire, el aporte de gas carbónico, las ondas térmicas, el calor de condensación y evaporación, el calor sensible etc. dan lugar un microclima determinado, con fluctuaciones periódicas, caracterizado fundamentalmente por un campo de temperaturas, por la humedad, por la concentración de gas carbónico y por la ventilación.

F) El comportamiento natural del ecosistema debe describirse mediante modelos matemáticos que permitan cuantificar, con la máxima aproximación posible, la influencia de su microclima e hidrología en los diferentes procesos físicos-químicos, geológicos y biológicos que tienen lugar sobre las superficies pintadas. Para ello se requiere que el ecosistema permanezca absolutamente sin perturbación alguna, por lo menos durante un año, antes de co-

* Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Universidad. 39005 Santander.

menzar este estudio, si es que con anterioridad ha sido visitado o se ha actuado sobre él o su entorno.

G) Este conocimiento es básico para realizar un estudio de las modificaciones que experimenta su equilibrio natural ante la presencia de personas en él, así como de sus efectos sobre los procesos de deterioro. La utilización de modelos que describan cuantitativamente estas alteraciones permite elaborar un régimen de visitas adecuado. Estos modelos deben contrastarse con los datos experimentales que se obtengan "in situ", introduciendo grupos de personas, bajo un control riguroso de su número y de sus tiempos de permanencia.

H) En cualquier caso, las decisiones tomadas entre las posibles soluciones alternativas encaminadas a la protección de las pinturas, deben ser cuidadosamente meditadas, y una vez que se hayan establecido los criterios para su conservación, se requiere la aplicación de sistemas telemétricos que garanticen la continuidad de las condiciones adoptadas.

I) Característica fundamental de estos trabajos es que deben encuadrarse en el marco de una investigación de seguimiento indefinido. Es decir, no basta con implantar un sistema automático de medidas que controlen los parámetros que determinan las condiciones climáticas impuestas al ecosistema para minimizar los procesos de deterioro, sino que periódicamente debe obtenerse información sobre el estado del ecosistema y sobre la intensidad de estos procesos, con el fin de conocer si las medidas adoptadas son realmente las adecuadas, lo que permitiría modificarlas.

J) Finalmente conviene recalcar que se precisa no conformarse con los conocimientos que se tienen sobre todos los fenómenos estudiados, sino que se debe profundizar constantemente en su origen e incluso prever otras nuevas causas posibles. Por lo tanto, las conclusiones alcanzadas, y aún las decisiones tomadas, nunca deben aceptarse como totalmente definitivas.

III. METODOLOGIA Y MODELIZACION PARA EL ESTUDIO DEL ECOSISTEMA Y DE SU EVOLUCION CON EL TIEMPO

—La definición del ecosistema requiere: I) evaluar su volumen y superficie interna; II) realizar un levantamiento topográfico, con claras especificaciones del espesor y profundidad de techos, suelos y paredes; III) conocer la estabilidad geológica del recinto rocoso, el tipo de rocas, la estratigrafía, su origen, kárstico o no, y en cualquier caso conocer a fondo los aspectos hidrogeológicos; IV) determinar con detalle la textura y la composición mineralógica y química del soporte rocoso de las pinturas; V) obte-

ner información del régimen pluviométrico del exterior y de la permeabilidad de las estructuras geológicas que conforman el ecosistema y evaluar con la máxima aproximación posible el flujo neto de agua; VI) analizar la composición de los pigmentos utilizados por los hombres prehistóricos.

—En principio, para conocer el comportamiento del ecosistema, en su estado natural actual, se precisa determinar cuantitativamente los valores medios, referidos a intervalos de tiempo adecuados, y su evolución a lo largo de un año, de todas aquellas variables y características que le definen: campo de temperaturas, estado higrométrico, concentración de gas carbónico, ventilación, flujo, composición y carácter del agua, contaminación de su atmósfera, cordenadas cromáticas de puntos de color significativos, malformaciones superficiales, y flora microbiana del aire, agua y tierra.

—La aplicación de modelos adecuados es eficaz para describir, con suficiente aproximación, el comportamiento natural del ecosistema y las alteraciones originadas por los visitantes. En una de las Comunicaciones anteriores hemos visto las variaciones que experimenta la humedad y la concentración de CO_2 en un recinto hipogeo a consecuencia de la presencia de personas, y como mediante modelos podían determinarse estas variaciones en función del tiempo t de permanencia y del número N de personas.

—En el caso de Altamira también se modelizó el efecto de los visitantes sobre la temperatura de la Sala de Polícromos⁽⁶⁾. Partiendo de que una persona emite a razón de 71 a 100 Kcal/hora (según los autores), un 30% por convección, que pasa directamente al aire elevando su temperatura y un 70% por radiación, de la cual una parte es absorbida por las paredes, que se las puede considerar como cuerpo negro, que no modifican su temperatura debido a su gran capacidad calorífica, y otra es absorbida y emitida por el vapor de agua y por el CO_2 . Si la diferencia de temperaturas entre la roca y el aire es $\Delta\theta$, y L la longitud característica, el calor transferido por convección natural por una superficie A , por unidad de tiempo, viene dado por

$$dq/dt = m.C_p.(d\theta/dt) = K.A.(\Delta\theta)^{1,25}.L^{-0,25} \quad (1)$$

Si ϵ_G es la emisividad media del gas a la temperatura T_G , y es T_p la temperatura de las paredes, la emisión de calor por radiación del gas, por unidad de tiempo, cuando T_G no discrepa mucho de T_p , se expresa por

$$dq/dt = A.[\sigma^*\epsilon_G (4 + a + b - c).T_m^3].(T_G - T_p) \quad (2)$$

siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, T_m la temperatura media entre T_G y T_p , y a , b y c parámetros carac-

terísticos del gas, que en este caso es la media ponderada entre el vapor de agua y el CO_2 .

Si N personas permanecen en el interior de la Sala de Pinturas durante el tiempo t , el incremento de entalpía del recinto, con un contenido m de aire húmedo, viene dado por $N.t.(dH/dt)$, resultando para el incremento de temperatura.

Para el incremento de temperatura, ΔT , originado por estas N personas en ese tiempo t , se obtiene la expresión

$$\Delta T = \frac{N.t}{m.C_p} \cdot (dH/dt) = \frac{K.A.t.(\Delta T)^{1,25}}{m.C_p.L^{0,25}} - \frac{A \cdot \sigma \epsilon_G \cdot t}{m.C_p} \cdot (4+a+b-c) \cdot T_p^3 \cdot \Delta T \quad (3)$$

Una vez salen los visitantes, el aire húmedo va disminuyendo su entalpía, por radiación y convección, y suponiendo que en el tiempo que transcurre, la ventilación no es significativa, se tiene

$$dt = \{(m.C_p \cdot dt) / [A \cdot \sigma \epsilon_G \cdot (4+a+b-c) T_p^3 \cdot (T - T_p) + K.A.L^{-0,25} \cdot (T - T_p)^{1,25}]\} \quad (4)$$

de la que se obtiene para el tiempo de recuperación

$$\tau_T = (4.m.C_p / C.T_p^3) \cdot \left[\ln(\Delta T / \Delta T_{\text{máx}})^{0,25} - \ln \frac{B(\Delta T)^{0,25} + C.T_p^3}{B(\Delta T_{\text{máx}})^{0,25} + C.T_p^3} \right] \quad (5)$$

en donde ΔT es la diferencia de temperaturas entre el aire y la roca $T - T_p$ en el instante t , $\Delta T_{\text{máx}}$ la diferencia de temperaturas del aire al final de la visita y la inicial de las paredes, $B = K.A.L^{-0,25}$ y $C = A \cdot \sigma \epsilon_G \cdot (4+a+b-c)$

Las soluciones numéricas de la ecuación (3) nos permiten ir describiendo la elevación de la temperatura de la Sala con el tiempo hasta el final de la visita; la ecuación (5) nos describe la disminución de temperatura desde el momento que salió el último visitante hasta que se alcanza la temperatura que existía antes de comenzar la visita, asignando a la temperatura final $T_f = T_p + 0,1$, ya que $0,1^\circ\text{C}$ es el error con el que se han medido las temperaturas.

Se han comparado estas curvas teóricas con las medidas experimentales obtenidas con diferentes grupos de personas y diferentes tiempos de exposición. Los resultados se muestran en las figuras 1 y 2; la primera para un grupo de 20 visitantes con un guía, que permanecieron 13 minutos en el interior de la Cueva, y la segunda para tres grupos consecutivos constituidos por 5 visitantes y un guía, permaneciendo cada grupo 10 minutos en la Cueva.

Se observa que el modelo elaborado responde bien a la realidad.

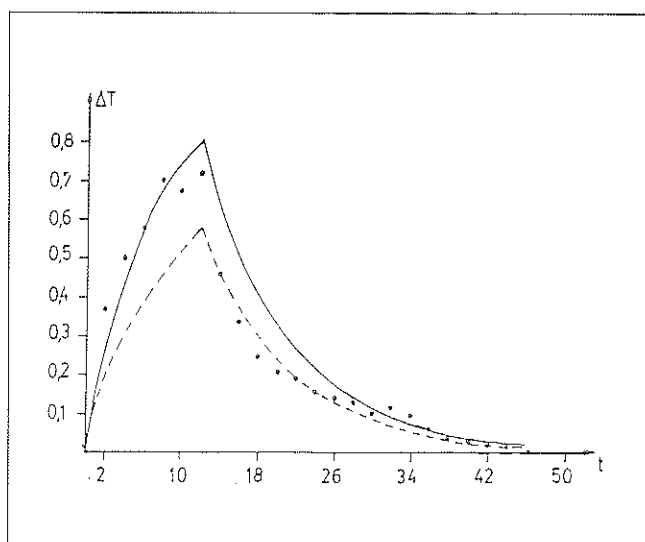


Figura 1

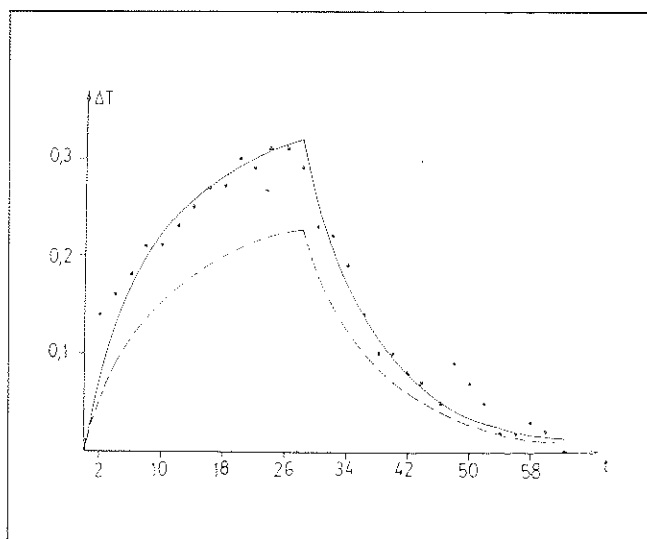


Figura 2

IV. CONCLUSIONES

Cuando opinamos que la conservación de las pinturas rupestres es un imperativo categórico de nuestra cultura actual, en el fondo lo que se pretende conseguir es que el hombre del futuro pueda gozar de la contemplación de esas

formidables huellas de nuestra prehistoria, tal y como nosotros lo hacemos actualmente. Pero esa contemplación, tanto la presente como la futura, supone un riesgo que obliga a buscar soluciones para lograr que perduren.

Evidentemente, aunque pueden presentarse problemas de conservación de índole muy diversa, podrían adoptarse normas generales, que en cada caso podrían requerir soluciones específicas puntuales.

Desde un amplio punto de vista, cabe adoptar dos actitudes, frente al problema de la conservación, cuando se considera que las pinturas rupestres puedan ser visitadas. Una es lograr que la presencia de personas no contribuya a aumentar el deterioro natural que experimentan las pinturas con el paso del tiempo, es decir, asumir que el lento deterioro natural es inevitable y que pueden transcurrir otros tantos miles de años hasta que desaparezcan irremisiblemente. Otra actitud consiste en pensar que es posible tomar determinadas medidas, aunque sean drásticas, que conlleven a modificar las condiciones naturales, imponiendo otras que se juzguen como más convenientes para que se conserven indefinidamente.

Basándose en el primer criterio, la conservación puede lograrse limitando rigurosamente las visitas, de tal modo que las alteraciones que experimenten los parámetros de equilibrio por la presencia de personas, no superen el orden de magnitud de los errores de medida. Imponiendo además la condición de que el tiempo que debe transcurrir para que estos parámetros recuperen los valores que tenían, al comienzo de la visita, sea inferior al intervalo de tiempo en el que el ecosistema permanece sin visitantes. Según el otro criterio, pueden tomarse medidas técnicas, a través de instalaciones adecuadas, que mantengan las pinturas del recinto en el microclima que se haya considerado más oportuno para su conservación. En cualquier caso, ambos criterios implican riesgos imprevisibles, aún a pesar de tener un conocimiento suficientemente preciso de la influencia que ejercen los factores ambientales en los procesos de deterioro de las pinturas.

Debido a que los procesos de deterioro son extraordinariamente lentos, nunca puede asegurarse de un modo radical que las decisiones tomadas y puestas en práctica, sean realmente las más convenientes. La posibilidad de no haberse apercebido de la existencia de otros factores efectivos de deterioro, que aquellos que se han estudiado en

cada caso concreto, de haber evaluado la intensidad del deterioro con algún grado de incertidumbre, de haber elaborado alguna hipótesis que no sea del todo rigurosa, o de haberse apoyado en algún criterio no del todo correcto, podría dar lugar a consecuencias que sólo podría ponerse de manifiesto después de muchas generaciones.

Son estas circunstancias las que obligan, como antes se ha indicado, no sólo a la instalación de una instrumentación de control continuo y sistemático, sino también a una investigación de seguimiento, que periódicamente nos proporcione informes cuantitativos de todos los procesos fisicoquímicos, hidrogeológicos y biológicos, que tienen lugar en el ecosistema, y que permitirían ir implantando regímenes de visitas adecuados. Y todo ello en razón de que el grado de deterioro que se alcance, en cualquiera de sus diversas formas, es irremediablemente irreversible.

Con la presente comunicación sólo se ha pretendido poner de manifiesto, esbozadamente, que la conservación de las pinturas rupestres podría intentarse en el marco de una metodología general, punto de partida para una sistemática particular en cada caso, basada no sólo en la experimentación, sino también en la aplicación de modelos matemáticos, elaborados a partir de hipótesis contrastadas y con fundamento teórico, aún a sabiendas de que en muchos casos la cuantificación de los factores de deterioro puedan ser solo aproximadas y que presente problemas de gran complejidad.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J. BRUNET, P. VIDAL, J. VOUVÉ. *Etudes et Documents sur le Patrimoine Cultural*, CLT-85/WS/38. UNESCO. 1985.
- (2) J. BRUNET, J. MARSAL, P. VIDAL. *Arqueologie*. Nº 49, 37-50, 1980.
- (3) E. VILLAR. *Monografía CIMA*, Nº 5, 1-14. Ministerio de Cultura, 1979.
- (4) E. VILLAR, P. L. FERNANDEZ, L. S. QUINDOS, J. R. SOLANA, J. SOTO. *Monografía CIMA*, Nº 9, 1-180, Ministerio de Cultura, 1983.
- (5) E. VILLAR, A. BONET, B. DIAZ-CANEJA, P. L. FERNANDEZ, I. GUTIERREZ, L. S. QUINDOS, J. R. SOLANA, J. SOTO. *Cave Sciencè*, 11, Nº 2, 99-104, 1984.