

# LA CONSERVACIÓN DEL ARTE RUPESTRE EN CUEVA

Marina Martínez de Marañón Yanguas \*

La conservación de la cueva como soporte indisoluble, tanto conceptualmente como físicamente, de las manifestaciones artísticas en ella contenidas, es el punto de partida de este artículo. En él se expresan los elementos que rigen su equilibrio interno así como los procesos de alteración y las causas que pueden llevar a ella. Todos estos aspectos han sido estudiados desde diferentes disciplinas y se entienden aquí como premisa para la elaboración de cualquier proyecto de conservación del arte rupestre en cueva.

**Palabras Clave:** Cueva, arte rupestre, conservación, dinámica de la cueva, procesos de alteración.

## ON SITE CONSERVATION OF CAVE ART

*The starting point of this paper is the conservation of caves considered as the basic support, both conceptually and physically, of the artistic manifestations which they contain. The elements that govern the internal stability of caves, as well as the different processes and causes of deterioration, have been studied by other disciplines and are presented here as the basis for all conservation plans of cave paintings.*

**Key words:** Cave, Cave painting, Conservation, Dynamics inside the cave, Deterioration processes.

Las cuevas han suscitado un gran interés desde mucho antes de que se conociera la existencia de manifestaciones artísticas en su interior. Las primeras exploraciones científicas en cuevas se realizan de forma esporádica en el siglo XVII. El espíritu romántico del siglo XIX agudiza el interés de la sociedad por las cuevas y se comienza su explotación turística lo que llevó aparejado, inevitablemente, la modificación de su morfología para hacerlas más accesibles.

El arte rupestre en cueva se descubre tardíamente, en la segunda mitad del siglo XIX. Este nuevo componente de mundo subterráneo reactivó aún más el interés social y las visitas se hicieron masivas. En pocos años, la presión del turismo fue tal que sus efectos se plasmaron en la rápida degradación de las manifestaciones. Se intentó controlar el turismo introduciendo primero regímenes de visitas regulados y finalmente, cerrando la práctica totalidad de las cavidades. Al mismo tiempo se iniciaron los trabajos de investigación para la conservación tanto de las cavidades como del arte ya que ambos constituyen una unidad indisoluble tanto física como conceptualmente.

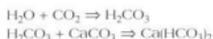
En este trabajo se pretende abordar una visión general de la problemática de la conservación del arte rupestre en cueva partiendo de la descripción de los elementos que lo componen, la cueva y las manifestaciones, para abordar luego las principales causas y procesos de alteración que se pueden dar en ellas. Finalmente se plantea una

propuesta metodológica que podría ser seguida a la hora de estudiar los problemas de conservación de una cueva de estas características.

## La cueva

Una cueva es parte de un sistema cársico resultado de la acción del agua sobre un determinado tipo de rocas que se denominan rocas carstificables. El caso más frecuente de formación de sistemas cársicos es el de las rocas carbonatadas cuyo principal componente es el  $\text{CaCO}_3$ .

El proceso por el que el agua es capaz de formar sistemas cársicos en rocas carbonatadas es el resultado de una doble erosión, por un lado, una erosión física que ensancha progresivamente las paredes y, por el otro, una acción química por la que el agua es capaz de disolver la caliza y transformarla en Bicarbonato soluble con la ayuda del  $\text{CO}_2$ . El agua interacciona químicamente con el  $\text{CO}_2$  dando como subproducto Ácido Carbónico con capacidad de disolver los carbonatos de la roca a través de la siguiente reacción:



El agua de lluvia cargada de  $\text{CO}_2$  es el principal factor de erosión de un sistema cársico. En el suelo va a ir disolviendo el  $\text{CO}_2$  de producción metabólica de los vegetales y de

\* Licenciada en Geografía e Historia.  
Restauradora.

la descomposición de la materia orgánica. Al llegar a los horizontes rocosos comienza su acción de disolución de la calcaia aumentando su concentración hasta llegar a la superficie de la roca donde se produce su liberación por evaporación del agua. Este fenómeno tiene lugar ya que la capacidad de disolver  $\text{CO}_2$  por parte del agua tan sólo se da cuando esta se encuentra en estado líquido. En estado sólido el agua no interacciona con el  $\text{CO}_2$  y en estado gaseoso tiene capacidad de generar una mezcla pero no un compuesto químico.

Los dos tipos de erosión están presentes siempre aunque, en función de volumen de agua que intervenga y de la morfología del camino que siga, predominará uno u otro al estar determinando la velocidad de circulación. A mayor velocidad, la erosión física aumenta en detrimento de la erosión química y viceversa debido a la diferente velocidad a la que se desarrollan ambos fenómenos. La velocidad es directamente proporcional a la ley de máxima pendiente y mínima resistencia. También tendrá importancia en estos procesos el volumen de agua que interviene. Si el agua llena completamente la fisura por la que circula además de los factores contemplados va a intervenir también el peso de la columna de agua o presión hidrostática que determinará asimismo la fisonomía del conducto.

En el interior de la cavidad que se ha formado por estos procesos se están dando otro tipo de fenómenos. En el momento en que el agua cargada de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  llega a la superficie de la cueva y comienza su evaporación va a producirse una liberación de vapor de agua y  $\text{CO}_2$  y la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  ya que la atmósfera del interior de la cueva es menos rica en  $\text{CO}_2$  que el agua. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



El  $\text{CaCO}_3$  liberado va a precipitar en forma de estalactitas, estalagmitas y diferentes espeleotemas sobre la superficie de la roca. Esta reacción es reversible por lo que la condensación de agua sobre la superficie de la roca trae consigo una nueva disolución de  $\text{CO}_2$  y con ello la transformación del  $\text{CaCO}_3$  en  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  soluble.

Se consigue así el equilibrio interno natural de la cueva en el que interviene el vapor de agua, el gas carbónico y la calcaia o, más propiamente, los iones disueltos de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . El equilibrio en el vapor de agua se consigue a través de su producción por evaporación y pérdida por la ventilación y el intercambio con el exterior. De manera que la HR se mantiene con muy pocas variaciones a lo largo de todo el año. El  $\text{CO}_2$  se mantiene también en equilibrio dinámico en esta reacción a través de la producción por desgasificación

en el momento de la evaporación y la pérdida por redisolución en el momento de la condensación.

### Dinámica interna de una cueva

Para comprender cómo funciona una cueva debemos partir de considerar las diferencias que presenta con respecto a la superficie terrestre. Una cavidad cárstica es un recinto cerrado pero no estanco. La primera peculiaridad que se deriva de ello es su singular régimen energético. En el exterior la energía calorífica en forma de radiación solar incide sobre la superficie del suelo produciendo su calentamiento y por conducción se calientan las capas de aire más bajas de la atmósfera. Este aire caliente se eleva transportando la energía calorífica ahora por convección.

El comportamiento de una atmósfera subterránea es muy diferente ya que no existe radiación solar y por lo tanto diferencia de calentamiento en las superficies y circulación de masas de aire. Así mismo, la turbulencia en el interior de una cueva es muy pequeña. Por todo esto, en interior de una cavidad epigea se configura una atmósfera de temperatura prácticamente constante. Sin embargo, se ha dicho que la cueva es un medio cerrado pero no estanco. Esto es, existe una comunicación con el exterior y, por lo tanto, intercambio.

El intercambio de masas de aire entre el interior y el exterior de una cueva se realizará de acuerdo a las características de cada una de ellas. La diferencia entre dos masas de aire viene determinada por su peso específico que a su vez está en función de su contenido de vapor de agua y  $\text{CO}_2$ . La cantidad de  $\text{CO}_2$  en el aire afecta variando su peso específico, es una mezcla en la que no existe un límite de saturación y puesto que el peso molecular de gas es superior al del aire, cuanto mayor sea el contenido de  $\text{CO}_2$  en el aire mayor será el peso de la mezcla.

El vapor de agua tiene un efecto opuesto ya que en este caso se están dando fenómenos de disolución y existe ya un límite de saturación. El peso del aire es ahora inversamente proporcional a la cantidad de vapor de agua que contenga. La solubilidad del agua en el aire aumenta con la temperatura.

La atmósfera del interior de la cavidad tiene, por lo general, un elevado contenido de vapor de agua que frecuentemente llega al punto de saturación, ya que los fenómenos de evapotranspiración que se dan en el suelo aquí no tiene lugar. El aire exterior más seco que llega al interior de la cavidad va a humidificarse a expensas del aire interno. Esta relación puede ser inversa en algunas circunstancias. La humidificación del aire es un fenómeno de evaporación de agua. Este

tipo de cambios de estado se producen por medio de reacciones endotérmicas, es decir, consumen energía. Como en el interior de la cavidad no existe una fuente externa de energía el calor se obtiene del medio. El mecanismo por el que se produce este calor para llevar a cabo el cambio de estado del agua es descendiendo la temperatura del resto de los componentes de esta atmósfera. Esto va a dar lugar a un desfase entre la temperatura del aire y de la pared rocosa y una transfusión de calor por convección. La energía que se acumula en el medio se conoce como entalpía y juega un papel muy importante en la dinámica de las cavernas ya que, cuanto mayor sea la entalpía del medio mayor será su inercia a cambiar las condiciones.

La primera consecuencia de los intercambios de aire entre el interior y el exterior de la caverna son los fenómenos de evaporación y condensación del agua. Como consecuencia de la condensación de agua se produce la solubilización del CO<sub>2</sub> y el aumento de la agresividad del agua ya que para conservar el equilibrio de la reacción será necesario un aumento en su concentración iónica a través de la disolución de la calcita. Los fenómenos de evaporación producen la liberación del CO<sub>2</sub> a la atmósfera y el aumento de su peso específico. El equilibrio entre la producción de vapor de agua por evaporación y su disminución por ventilación es lo que determina que las condiciones se mantengan constantes.

La condensación de agua en el interior de la cueva no es uniforme en toda la superficie sino que está determinada por las vías de circulación de las corrientes de aire. La circulación del aire llevará una dirección diferente en función de la estación del año en la que nos encontremos. La circulación del aire y los fenómenos de condensación están también condicionados por la textura de la superficie rocosa y la morfología interna de la caverna.

La cueva es un ecosistema definido además por una serie de elementos bióticos que contribuyen a su equilibrio. El equilibrio de la biocenosis cavernícola se establece tanto en el interior de la cueva como en intercambio con el exterior.

Los tres tipos de pobladores que se pueden encontrar en las cuevas son:

1. Troglóxenos: son especies que viven aprovechando las ventajas de temperatura constante y ausencia de enemigos pero tienen que salir en busca de alimentos.
2. Troglófilos: son las especies que pueden pasar la vida en el interior de la cueva o en el exterior.
3. Troglóbios: son especies que se desarrollan exclusivamente en el interior de cavernas.

Este último tipo de poblaciones se caracterizan por ser, mayoritariamente estenofílicas, esto es, que se desarrolla en unos medios con límites muy estrechos de concentración de determinados iones. La concentración iónica del agua de una cueva está determinada por los fenómenos de evaporación-condensación, esto significa que la alteración del equilibrio físico-químico de la cueva puede provocar el colapso de estas poblaciones o los desequilibrios biológicos en el interior.

#### El arte en el interior de la cueva

Las manifestaciones artísticas en el interior de una cueva se componen de pinturas, grabados y modelados en barro. Se han realizado muchos estudios estilísticos y de tecnología sobre el arte rupestre pero tan sólo las recientes técnicas analíticas están permitiendo obtener datos fiables y gracias a ellos, se está pudiendo descubrir matices y aspectos importantes de estas manifestaciones.

Los primeros estudios que se realizan sobre las técnicas se basaban en el tipo de materiales localizados en los contextos arqueológicos y que se identificaban con la elaboración de los pigmentos. También se ha recurrido a la realización de reproducciones experimentales de los procesos de elaboración para poder obtener conclusiones sobre las posibles técnicas que se emplearon.

A través de la aplicación de diferentes análisis se ha podido conocer la existencia de complejos procesos de elaboración de las pinturas con las que se realizó el arte rupestre. Se ha confirmado la existencia de cargas y de aglutinantes, la existencia de dibujos preparatorios y se ha delatado el importante papel que juegan aquí también las texturas y los acabados.

Los pigmentos que se han conocido en el arte rupestre varían algo según la época y los yacimientos estudiados pero, en general, se pueden identificar algunos compuestos que se utilizan recurrentemente. Los rojos, naranjas y amarillos son, por lo general, Óxidos de Hierro tanto anhidros (Hematita y Oligisto) como hidratados (Limonita, Siderita y Goethita). También aparecen arcillas ricas en Óxido de Hierro (ocres). En los negros se ha podido detectar el empleo de Óxido de Manganeso y carbón vegetal.

Con respecto a las cargas los análisis han permitido determinar la presencia de minerales de mayor granulometría que aparecen en conexión íntima con los pigmentos. El grado de homogeneidad de la mezcla ha llevado a considerar que se tratan de cargas y se han ofrecido una serie de argumentos en favor de esta teoría como son la evidencia

de que en la naturaleza no aparecen estos minerales combinados con Óxidos de Hierro o con carbón, no es combinación de la pared porque se han documentado tanto en pinturas parietales como en arte mueble y la gran homogeneidad de las muestras permite descartar la posibilidad de que sean restos del proceso de molienda.

El estudio de la asociación de pigmentos y cargas ha posibilitado a un grupo de investigadores franceses, Menu y Walter principalmente, la identificación de lo que han denominado recetas, esto es, la mezcla intencional de determinadas cargas y pigmentos en el arte paleolítico. Han descrito tres recetas en base a sus estudios en las cuevas de Ariege:

- Receta F que incorpora Feldespato Potásico como carga (K Na)(Si<sub>3</sub> Al O<sub>8</sub>)  
 Receta B que además de Feldespato Potásico incorpora Biotita K(Mg Fe)<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub> |  
 Receta T que incluye Talco como carga Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>

#### Causas de alteración

##### Alteración paisajística

Una de las principales causas desencadenantes de los procesos de degradación es la alteración del paisaje que rodea a la cueva. Las transformaciones del paisaje pueden darse en los alrededores de la entrada o en el terreno sobre la cavidad.

La modificación paisajística del entorno de la entrada afecta directamente a la conservación de la cueva en la medida en que altera los regímenes de intercambio de temperatura, humedad y gas carbónico entre el interior y el exterior que es la base del equilibrio de la cavidad. Asimismo, va a influir directamente en las poblaciones bióticas del interior de la cavidad que basan su equilibrio en los intercambios de materia orgánica.

Otro tipo de modificaciones que afectan directamente al equilibrio son las que se realizan en el ámbito de influencia sobre la cueva. Es importante determinar la magnitud de esta influencia por medio de los estudios de la hidrología de la zona. Si se altera la vegetación del suelo que recubre la roca encajante de la cavidad se altera su régimen interno ya que se modifica la composición y propiedades del suelo. La vegetación en el suelo actúa como regulador de la insolación de los aportes de agua, de la composición de las aguas y los ritmos de evapotranspiración en superficie.

##### Alteración de la morfología de la cueva

La modificación de los accesos para ampliarlos influye en el equilibrio en la medi-

da en que se aumenta la ventilación interna provocando con ello el descenso de la temperatura y el descenso en la concentración de CO<sub>2</sub>. El cierre de las entradas provoca el efecto contrario, esto es, disminuye la ventilación frenando el intercambio de masas de aire y aumentando así la concentración de CO<sub>2</sub> y alterando los regímenes de evaporación y de condensación, se favorece la permanencia de agua en las paredes y la formación de cristales al ser mayor el tiempo que tienen las sales para precipitar. Se frenan también los intercambios de materia orgánica con el exterior pudiendo ser alterado el equilibrio biológico.

Las obras en el interior de las cavidades han actuado alterando la morfología de la cueva y con ello las vías de circulación del aire y las zonas de condensación y de secado. Se ve afectada así la temperatura del recinto y se crean zonas nuevas de desecación y de cristalización. Las modificaciones en las cavidades suelen ser alteraciones irreversibles que precisan medidas de control muy importantes.

##### Obras en el exterior

Las obras de ingeniería realizadas en el entorno transforman profundamente los sistemas cársticos. Las explosiones en canteras próximas y el tráfico rodado provocan grandes vibraciones que llevan a la ampliación de los sistemas de diaclasas al generar fracturas artificiales de la roca. La transcendencia de estas alteraciones está relacionada con las discontinuidades que presente este sistema ya que actúan disminuyendo el efecto de las vibraciones.

Existe otra importante fuente de vibraciones que ha sido estudiada en Lascaux y que es resultado del tránsito de personas por el interior de la cueva a través de las estructuras de cemento que se construyeron durante las obras de acondicionamiento del recinto y las vibraciones que produce la apertura y cierre de las puertas metálicas. Los resultados de estos estudios demuestran que la magnitud de estas vibraciones puede superar a las que llegan del exterior.

La aparición de estas grietas implica la aparición de nuevas vías de filtración de aguas que afectan al régimen interno al generar nuevas superficies de desecación en las discontinuidades que pueden dar lugar a fenómenos de cristalización y desprendimiento de bloques. Sobre la superficie de las paredes se traduce en nuevas zonas de desecación y de humectación con lo que se reproducen las alteraciones.

##### Las aguas y la contaminación

El agua que llega al interior de la cueva puede ser una causa de alteración en función de su grado de contaminación. Existen

dos vías de contaminación de las aguas, la contaminación del suelo por efecto de las actividades agrícolas, ganaderas, industriales y de los núcleos urbanos cercanos y la contaminación atmosférica que es arrastrada por el agua de lluvia. El manto vegetal ejerce una acción depuradora de la contaminación a través de la absorción, el intercambio iónico, la digestión aerobia etc. Sin embargo, existen algunas aguas que llegan a las cavidades rápidamente por percolación a través de grietas y fisuras con lo que el mecanismo de depuración no actúa de la misma manera. De cualquier modo, se puede señalar que también aquí la conservación del paisaje del área de influencia en la cueva resulta importante para la conservación de la misma. La contaminación de las aguas va a actuar alterando su composición química y con ello su capacidad de disolución y cristalización.

#### Los trabajos de investigación

Las excavaciones arqueológicas poco meticulosas han transformado, en muchos casos, la morfología de las cuevas y con ello, su régimen natural. Es habitual la excavación en zonas próximas a la entrada que alteran sus dimensiones ya que es normal la presencia de más de un yacimiento en una cueva. Es necesario por esto, el estudio profundo de la cueva antes de iniciar los trabajos de excavación para garantizar que no existen manifestaciones artísticas en otras zonas que puedan verse afectadas por estos trabajos.

El estudio estilístico del arte rupestre ha llevado a la realización de calcos que puede erosionar la superficie de la roca. Los calcos hoy en día están siendo sustituidos por otros medios de reproducción fotográfica. Es práctica frecuente la humectación de las paredes para resaltar los colores a la hora de realizar fotografías. Esta humectación se realiza, en el mejor de los casos, con agua aunque también se han empleado otras sustancias como el queroseno que provoca la contaminación de la roca al favorecer la adhesión de otras sustancias.

Las expediciones espeleológicas poco respetuosas también han sido causa de alteración de las cavidades. Por un lado ejercen una presión sobre las condiciones internas de la cueva pero, sobre todo, la falta de atención a la hora de retirar los residuos generados puede ser muy peligroso para la conservación de las cuevas. Es muy frecuente el abandono de las purgas de carburo y las pilas empleadas en la iluminación que dejan residuos contaminantes que pasan a las aguas.

Los carburos tradicionales están fabricados con  $\text{CaC}_2$  que es un compuesto que se obtiene al partir de carbono y cal sometido a altas temperaturas. En contacto con el agua

desprende acetileno por la siguiente reacción:



El  $\text{C}_2\text{H}_2$  es lo que se emplea en la iluminación ya que es un compuesto muy inflamable y que desprende una llama muy brillante. Tras la reacción de combustión lo que queda es el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como impureza que puede carbonatarse al entrar en contacto con el aire  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , en circunstancias de poca humedad por lo que esta reacción es poco habitual en las cuevas. Aunque no se produzca esta carbonatación el Hidróxido Cálcico es un producto con cierta solubilidad en el agua y va a actuar aumentando su pH.

Las pilas de los modernos sistemas de iluminación provocan también una importante contaminación de las aguas al liberar el Dióxido de Manganeso que se emplea como electrolito de las pilas cilíndricas.

#### Las visitas

Un aspecto de la conservación de las cavidades muy importante es la presión que ejerce la presencia de personas en el interior de la cueva. Las visitas indiscriminadas han sido la principal causa de deterioro en las cuevas tanto en las que aparecen manifestaciones artísticas como en las que se acondicionaron por su interés ecológico y ha llevado al cierre sistemático de casi todas ellas hasta poder determinar las medidas a tomar para ser visitadas.

La presencia de personas influye en el régimen interno de la cueva en varios aspectos. Por un lado en la temperatura. Una persona emite una cantidad de calor que ha sido estimada entre 71 y 100 Kcal a la hora. La principal forma de emisión de este calor es la radiación (70%) seguida por la convección que es también importante, y de una forma despreciable la transmisión.

El calor que se emite por radiación va a ser absorbido en parte por el aire que es capaz de emitir en el IR debido a su contenido en vapor de agua y en  $\text{CO}_2$  y otra parte, llega directamente a las paredes. La roca, debido a su alta capacidad calorífica, no va a modificar fácilmente su temperatura aunque una excesiva radiación puede tener este efecto. La energía absorbida por el aire puede ser disipada así mismo, por convección y radiación hacia la pared. El balance final entre la producción de energía y la pérdida por difusión del calor nos dará el valor del incremento de la temperatura.

La repercusión del incremento de la temperatura en el interior de la cueva producido por la presencia de visitas será evidente si, como se ha explicado, supera los límites de tolerancia energética y desencadenará pro-

cesos de evaporación en la superficie y disminución de la HR.

El cuerpo humano también desprende en la respiración una cierta cantidad de CO<sub>2</sub> que se ha calculado que está en torno a los 17 litros a la hora. Este gas se va a incorporar a la mezcla del aire aumentando la presión parcial del gas en la atmósfera y con ello alterando el equilibrio natural y forzando la disolución de carbonatos.

Como tercer factor de alteración del cuerpo humano emana vapor de agua a través de la respiración principalmente y de la transpiración de forma secundaria. La cantidad de vapor de agua que se emite se ha calculado en torno a los 50 gr. a la hora. El aporte de este vapor a la atmósfera provoca un aumento de la humedad absoluta que puede desencadenar procesos de condensación en superficie con las consecuencias que esto trae en el equilibrio.

Como último factor de alteración por parte de los visitantes está su actuación como mecanismo de transporte de materia orgánica y microorganismos al interior de las cuevas.

#### La iluminación

Muy relacionado con lo anterior está la introducción de fuentes de iluminación para el acondicionamiento de las cuevas para su visita. Estas fuentes son focos de calor que aumentan localmente las temperaturas y provocan desecaciones en las zonas próximas. Este problema puede ser disminuido con la utilización de fibra óptica.

Un segundo efecto que tiene la iluminación es que, aún con muy poca intensidad favorece la proliferación de microorganismos fotofílicos, no necesariamente muy exigentes, ajenos a las cuevas.

#### Procesos de alteración en el interior de la cueva

El tipo de procesos de alteración que se pueden desarrollar en el interior de una cueva se pueden clasificar en alteraciones físicas, químicas y biológicas, aunque existen, en muchos casos, una clara imbricación entre ellas.

#### Alteración física

Los principales mecanismos de alteración físicos vienen provocados por el cambio en la temperatura y su repercusión directa en la HR. Como se ha mencionado, la temperatura en el interior de una cueva se mantiene constante durante todo el año con márgenes de variación de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. Las fluctuaciones en la temperatura sólo afectarían a su régimen natural cuando superen la entalpía energética del recinto.

La primera consecuencia de las variaciones en la temperatura de la cueva es la contracción y dilatación de los materiales de la pared rocosa. Los diferentes componentes de la pared van a presentar unos coeficientes específicos de dilatación con lo que la variación de la temperatura provocará la pérdida de cohesión entre estos materiales. Así mismo, como ya hemos visto, la pared está formada por una roca madre de tipo calizo sobre la que se ha desarrollado una cubierta cristalina por precipitación. Las manifestaciones artísticas se encuentran sobre esta cubierta cristalina que podemos denominar roca soporte. La diferencia entre los coeficientes de dilatación de una y otra roca va a provocar su progresivo desprendimiento ante los cambios en la temperatura.

Los cambios en la humedad relativa van a afectar a los materiales higroscópicos que aparecen formando parte de las superficies rocosas, arcillas mayoritariamente. La respuesta de estos materiales a las fluctuaciones de la HR es muy rápida y violenta con lo que se están generando procesos de pérdida de cohesión en los soportes y desprendimiento por los procesos de humectación y desecación si están en contacto con zonas más rígidas carbonatadas.

La desecación de los materiales arcillosos puede provocar también la aparición de vermiculaciones que son acumulaciones arcillosas en zonas de evaporación. Las vermiculaciones se originan por procesos de floculación de arcillas en suspensión en las aguas una vez que éstas se desecan. La aparición de estas vermiculaciones en las superficies de contacto entre las placas puede originar el desprendimiento ante un cambio en las condiciones de humedad relativa.

La temperatura no tiene una influencia directa sobre en contenido de vapor de agua en el recinto pero estamos viendo que sí lo tiene sobre la HR y ésta, a su vez, va a repercutir en el estado en el que se encuentra esta humedad al estar alterando los mecanismos de evaporación y condensación.

El aumento de las temperatura va a originar la desecación de las superficies de la roca. Esta evaporación forzada trae como consecuencia la precipitación de las sales disueltas con lo que aumentan las formaciones cristalinas sobre las pinturas y en las grietas y fisuras que son zonas de evaporación. En estos puntos es especialmente problemática la formación de cristales ya que van a ir aumentando la separación entre ellas y acaban por desprenderse en forma de lascas. La desecación de las paredes provoca también la creación de un gradiente de humedad entre

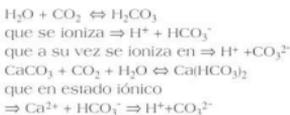
las interfases de la roca madre-roca soporte y la de la roca soporte-aire con lo que se fuerza la salida de agua hacia el exterior para restablecer el equilibrio y se acelera la dinámica natural de las aguas haciendo el proceso de cristalización continuo. La condensación de agua sobre la superficie por los cambios de temperatura provoca erosión también por lavado y arrastre de materiales en superficie y altera nuevamente el equilibrio de la reacción.

La temperatura actúa como catalizador de las reacciones físico-químicas que se dan en la cueva pero también de las reacciones biológicas pudiendo desencadenar procesos de competencia en las poblaciones cavernícolas y desarrollo exponencial de algas de ellas.

Otro tipo de alteración física es la que provoca el agua en la superficie de la roca. El agua es capaz de arrastrar componentes de la pared, incluidos los pigmentos. Puede existir también una lenta erosión de estos pigmentos. Los pigmentos son óxidos insolubles y además suelen estar muy consolidados por los carbonatos. Sin embargo, con el tiempo puede producirse esta erosión. Por otro lado, el agua arrastra diferentes productos que pueden ir depositándose en la superficie de la roca.

#### Alteración química

Los mecanismos de alteración físicos y químicos están íntimamente relacionados ya que, como se deduce de lo anterior, la temperatura va a afectar directamente a la reacción química del equilibrio de la cueva. Los elementos que intervienen en esta reacción se encuentran en estado iónico disueltos en el agua, por lo tanto, la expresión completa de la reacción sería la siguiente:



El equilibrio de esta reacción se mantiene constante siempre que así lo sea la presión de vapor del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y cantidad de agua líquida en la superficie de la pared y la alteración de alguno de estos componentes va a provocar la ruptura del equilibrio.

La disminución de la cantidad de  $\text{CO}_2$  en el aire, es decir, la disminución de la presión parcial del gas, exige que para conservar el equilibrio disminuya la concentración también del  $\text{CO}_2$  en disolución. Si no existe un aumento en el aporte de agua la reacción se equilibra a través de la precipitación de la calcita ya que la desgasificación del agua provoca el aumento de su pH y

con ello disminución de su capacidad de disolución de los carbonatos.

El aumento en el contenido de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera provoca la disolución del gas por el aumento de la presión de vapor y, con ello disminuye el pH de la disolución y así aumenta la capacidad para disolver la calcita. Este mismo fenómeno es el que ocurre ante un aumento de la cantidad de agua líquida en la superficie por condensación. En este caso lo que ocurre es que disminuye la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  al diluirse. La concentración de  $\text{CO}_2$  se equilibra ya que se disuelve gas de la atmósfera con lo que el equilibrio aquí pasa por aumentar la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  a través de la disolución de calcita.

En estos mecanismos fundamentales del equilibrio van a intervenir otros factores que deben ser contemplados. Por un lado, la precipitación de la calcita sobre la roca soporte de las manifestaciones artísticas, en circunstancias normales, se encuentra condicionada por el tiempo de permanencia del agua en la superficie de la roca. La velocidad de la precipitación de carbonatos es muy lenta y se produce en torno a residuos sólidos en el agua. Las aguas que afloran en la superficie de la cueva se encuentran muy filtradas por lo que los residuos sólidos suelen ser muy escasos y el fenómeno de precipitación aún más lento. Por este motivo, el tiempo de permanencia del agua en la superficie de la roca antes de gotear y sin que se produzca una evaporación forzada va a ser determinante de la cantidad de calcita que puede precipitar.

Otro factor que interviene en la reacción es el contenido iónico de las aguas. El las aguas que afloran en las paredes de la cueva no sólo se encuentran disueltos los iones de la reacción de la calcita sino que también pueden aparecer otros que se solubilizan a lo largo de su recorrido o que se aportan por la contaminación.

Algunos de estos iones van a intervenir en la reacción acelerando o disminuyendo la disolución de la calcita. Iones como  $\text{Mg}^{2+}$ , que aparece como consecuencia de la disolución de la Dolomita, o  $\text{Na}^+$  actúan como complejantes atrapando los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  para formar compuestos. Estos iones complejados ya no entran en el equilibrio con lo que se fuerza la disolución de carbonato para mantenerlo al aumentar la acidez de la reacción. La oxidación de algunos elementos presentes en el suelo pueden aumentar la acidez del agua al liberar  $\text{H}^+$  con lo que se aumenta su capacidad de disolución. Otros iones actúan inhibiendo la reacción al disminuir la solubilidad de la calcita.

#### Alteración biológica

Los cambios en el equilibrio de la cueva a afectar directamente al equilibrio de las

poblaciones que la habitan y afectar directamente a las manifestaciones artísticas.

Las principales especies que se desarrollan el interior de las cavernas son las bacterias, las algas, los hongos, los líquenes y los musgos una vez que se ha producido la colonización por otras formas menos exigentes.

### Propuesta metodológica para el estudio de una cueva

La experiencia ha demostrado que, de momento, resulta imposible alterar las condiciones de las cuevas para facilitar el acceso de visitantes ya que la cueva es un ecosistema vivo que sólo es posible conservar si conservamos su entorno y su frágil equilibrio interno.

Ante esta situación la estrategia de trabajo que se debe seguir en la conservación del arte rupestre debe pasar por la determinación de todos los factores que están interviniendo en el equilibrio para, a partir de este conocimiento, determinar si es posible su apertura y los límites que se deben establecer a la visita. Una posible metodología de trabajo para el estudio de una cueva podría pasar por los siguientes puntos:

#### 1. Estudio geográfico y climatológico del territorio

Para conocer el espacio en el que se ubica la cueva se debe partir del estudio de la geografía de la zona. Deben localizarse los sistemas cársticos presentes y estudiar la geografía de los macizos que los albergan. Se debe estudiar la topografía del terreno, la climatología, la vegetación y los sistemas hidrológicos tanto epigeos como subterráneos.

#### 2. Estudio del contexto geológico en el que se inscribe la cueva

- Determinar la edad geológica de los macizos para conocer su comportamiento.

- Estudio de la orientación de las estructuras, disposición de los estratos, grietas y fallas que están afectando a la cavidad. La orientación de los estratos y los planos de fractura de un sistema es importante a la hora de conocer las tensiones gravitacionales presentes en la cavidad que, en el caso de sistemas seniles sobre todo, pueden provocar desprendimientos. La documentación geológica de una cueva pasa por la realización de una cartografía geológica de la zona. La cartografía se realiza a partir de mapas topográficos zonales cuyo análisis previo informa de muchos de los aspectos de la geología regional al permitir el estudio y caracterizan de las redes hidrográficas etc. La cartografía geológica se puede realizar:

- Sobre el terreno con mapa, brújula y martillo.

- Con ayuda de la fotogeología que emplea la fotografía aérea observada por medio de estereoscopios para poder reproducir las irregularidades del terreno.

Los sondeos que son aplicables al estudio del terreno en muchas ocasiones a partir del análisis de testigos para comprobar los cambios de la litología en profundidad, permeabilidad, dureza, etc. Permite trazar mapas de isopacas, esto es, de espesores de las formaciones geológicas. Los principales tipos de sondeos que se utilizan son los sondeos de percusión y los sondeos de rotación.

A través de la prospección geofísica que se basa en la medición de una serie de magnitudes que varían con el tiempo y características de las rocas y con la presencia de diferentes estructuras en profundidad. Los más importantes son:

La gravimetría es un sistema que permite medir las diferencias en la intensidad de la gravedad que va a variar en función a la existencia de masas más o menos densas en la corteza terrestre.

Los métodos magnéticos permiten registrar las variaciones del valor medio del campo magnético terrestre en una determinada región.

Los métodos sísmicos se basan en la variación de la velocidad de las ondas sísmicas al propagarse a través de rocas de diferentes tipo y espacios libres.

Los métodos eléctricos se basan en el estudio de la resistencia que ofrecen los diferentes materiales del terreno al paso de la corriente eléctrica.

Los métodos radiométricos miden la radiactividad procedente de elementos inestables presentes en las rocas.

- Estudio del los sistemas hidrológicos subterráneos para poder localizar el nivel de circulación freática y en función a ello poder determinar la procedencia de las aguas que penetran en la cueva. Para ello se recurre al empleo de marcadores de color.

- Estudio del régimen de circulación vertical de las aguas para conocer los procesos de filtración. Para este tipo de estudios se emplean diferentes métodos de análisis químico a partir de la recogida de muestras en el interior de la cueva:

Mediciones del pH de las aguas del interior y comparación con muestras de agua de lluvia recogidas en el exterior.

Contenido en materia orgánica para determinar la posibilidad de contaminación por parte de microorganismos.

Medición de la concentración de Nitritos y Nitratos que puede delatar la presencia de determinados contaminantes y microorganismos.

Medición de la concentración de Cloruros que estaría indicando unos ritmos de filtración muy rápidos.

Medición del contenido de Amoniaco

Otros tipos de análisis permiten determinar los ritmos de filtración.

La comparación de los caudales de agua recogidos al exterior y en el interior de la cueva para determinar así si existe un reflejo de las fluctuaciones del exterior que estaría indicando unos ritmos de filtración muy rápidos.

Las mediciones de los valores de Tritio. La comparación de las medidas de Tritio obtenidas en el interior de la cueva con los registros conocidos permite determinar la fecha en la que el agua llegó a la superficie del suelo y a partir de ello, el tiempo transcurrido hasta su llegada a la cueva.

Medición del contenido iónico del agua del interior y comparación con la del exterior para conocer la velocidad a la que se está produciendo la filtración. Para estos estudios se evalúa la presencia de los cationes  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  cuyos diferentes productos de solubilidad permiten establecer unos parámetros de velocidad de filtración.

### 3. Estudio topográfico de la cavidad

Estudio de la morfología de la cueva para determinar las dimensiones y topografía interna. Este estudio se puede realizar, en parte, desde el exterior aunque el levantamiento planimétrico exacto sólo será posible a través de mediciones en el interior.

- El estudio desde el exterior se realiza a través de los métodos geofísicos ya descritos.
- El estudio sobre el terreno se realiza a través de la prospección directa del terreno.

### 4. Caracterización del sustrato rocoso de la cavidad

En este punto se deben determinar las características de los diferentes soportes sobre los que se asientan las manifestaciones artísticas que pueden ser, según las zonas, la roca encajante del carst o las cortezas estalagmíticas formadas sobre ella.

Los métodos de estudio que se emplean para la caracterización de la roca son:

- La petrografía que estudia las características ópticas de la roca a partir de la Cristalografía.

- La microscopía electrónica permite conocer aspectos microscópicos de la piedra y la identificación de algunos minerales.

- La fluorescencia de Rayos X que permite realizar análisis elementales.

- La difracción de rayos X que ofrece información sobre la mineralogía de la roca.
- Los análisis térmicos permiten caracterizar algunos componentes de la roca a partir de los cambios que se producen en sus características físico-químicas cuando son sometidos a elevadas temperaturas.

- Los ensayos físicos, los ensayos mecánicos y los ensayos térmicos permiten determinar algunas propiedades físicas de las rocas.

### 5. Estudio de las manifestaciones artísticas en el interior de la cueva

Las técnicas que se pueden emplear para el análisis de los diferentes componentes de las manifestaciones pictóricas en el interior de una cueva son los siguientes:

- Observación macrofotográfica para poder estudiar las técnicas de aplicación de la pintura, la distribución de sus macrocomponentes de cara a realizar comparaciones, aparición de posibles superposiciones no visibles al ojo humano, etc.

- La energía dispersiva de fluorescencia de rayos X permite identificar los diferentes elementos que aparecen las muestras de pigmentos recogidas de la superficie.

- La difracción de rayos X se emplea para determinar los compuestos en los que están presentes estos elementos.

- La espectrometría de masas unida a un sistema de separación cromatográfico se ha empleado para la determinación de la presencia de restos de materia orgánica y así, poder identificar posibles aglutinantes de la pintura.

- La espectrometría de absorción atómica estudia la composición elemental de una determinada muestra.

- Las estratigrafías se ha realizado para determinar la forma de superposición de los diferentes componentes de la pintura y para delatar la existencia de dibujos preparatorios realizados con carbón.

- La termoluminiscencia se emplea para determinar si hubo calcinación durante el proceso de elaboración de los pigmentos.

### 6. Determinación del régimen climático interno de la cueva

La evaluación del microclima se realiza por medio de la medición de diferentes factores a lo largo de un determinado espacio de tiempo, generalmente un año, para evaluar las variaciones que se están produciendo en la cavidad con un régimen

estable. Si no se ha conseguido recuperar la estabilidad de la cueva por la adopción en el pasado de medidas ineficaces de conservación habrá que recurrir a su cierre y seguimiento durante periodos más largos de tiempo hasta conseguir recuperar el equilibrio si esto resulta posible.

Los parámetros que se deben medir son los siguientes:

- La temperatura. Se debe medir la temperatura del aire y de la roca en diferentes puntos de la cueva para determinar sus variaciones a lo largo del año. Las diferencias de temperatura entre el aire y la roca que estarán en relación con los regímenes de circulación de aire, esto es, con la ventilación de la cueva. La medición de las temperaturas se realiza con termómetros convencionales, con termómetros de radiación y con sondas de temperatura.

- La concentración de CO<sub>2</sub> tanto en el aire como en el agua para conocer los ciclos de disolución y cristalización de la calcita y las variaciones en la ventilación (que queda reflejada en las diferencias en la concentración del gas en el aire). La medición de la concentración en el aire se realiza con analizadores industriales a base de agua de barita. En el agua, la cantidad de CO<sub>2</sub> se calcula a partir de la ecuación del equilibrio. Se parte de la consideración de que en este equilibrio las cargas iónicas se encuentran compensadas con lo que a partir de las mediciones del pH del agua y de la concentración de los iones presentes se puede calcular, a partir de fórmulas matemáticas, cual es la concentración del CO<sub>2</sub> en la disolución.

- La humedad en el interior de la cueva se evalúa a partir de medidas periódicas de la cantidad de vapor de agua en el aire con un barómetro y los valores de humedad relativa con psicrómetros portátiles y sondas colocadas a lo largo de la cavidad. También se recogen muestras de agua en probetas en diferentes puntos de goteo de la cavidad. A través de estas muestras se evalúa el caudal de agua que llega a la cue-

va y sus fluctuaciones mensuales y anuales.

La comparación de las fluctuaciones internas y al exterior permiten determinar el grado de influencia que tienen las variaciones climáticas sobre el comportamiento de las aguas en el interior de la cueva.

La mayor o menor constancia en el caudal de aguas recogidas va a permitir saber el grado de humectación que presenta el techo de la cueva en cada momento y, conociendo la textura de la superficie del techo evaluar el régimen de circulación de las aguas por las paredes.

La comparación entre estas fluctuaciones y la HR ambiental en cada momento permite obtener datos sobre los fenómenos de evaporación y ventilación que se están dando.

Si contrastamos los datos obtenidos de la HR con los de las mediciones de temperatura podremos calcular los valores de la presión de vapor en el aire, la presión saturante a nivel de la roca y la capacidad de aceptar aportes de vapor de agua sin alterar el equilibrio.

- La ventilación en el interior de la cueva es un aspecto muy importante en su equilibrio ya que a partir de los intercambios de aire entre el interior y el exterior es como se regulan los demás factores del equilibrio (temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y humedad). Para evaluar los regímenes de ventilación se han empleado diferentes métodos:

Estudio de las diferencias de temperatura entre la roca y el aire en los diferentes puntos de la cueva.

Estudio de las variaciones en la HR y en las concentraciones de CO<sub>2</sub> que se producen por los intercambios de masas de aire.

Análisis cuantitativos de la ventilación a través de las variaciones en la radiactividad a partir de la concentración de gas Radón en el aire.

Octubre, 1998

#### Bibliografía

Brunet, J. y Vouvé, J. (1996) *La conservation des grottes ornées*. Editions CNRS, Ministère de la Culture. París.

Brunet, J. et al. (1997) *La conservation de fait des cavernes et des abris*. Section Française de l'Institut International de Conservation. París.

García Nieves, R. (1987) *La conservación de las cavidades*. Federación Madrileña de Espeleología. Madrid.

*La protección y conservación del arte rupestre*

*paleolítico*. Mesa redonda Hispano-Francesa. Fundación Archivo de Indias. Colombres, Asturias. 1991

*Cueva de Altamira. Estudios físico-químicos de la sala de los policromos. Influencia de la presencia humana y criterios de conservación*. Centro de Investigación y Museo de Altamira. Monografías nº11 Ministerio de Cultura. Dirección general de Bellas Artes y Archivos. 1984