



La información climática se transmite al interior de la cueva a través de un eficaz medio de transporte, el agua

LOS ESPELEOTEMAS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los depósitos minerales de nuestras cuevas, como las estalagmitas, nos dan claves sobre los cambios climáticos y sus implicaciones ambientales a nivel global y regional. ¿Cómo es posible que esas rocas preserven señales climáticas de altísima resolución a pesar de haberse formado en ambientes muy aislados de la superficie?

Texto: **JAVIER MARTÍN-CHIVELET**

Fotos: **GRUPO ESPELEOLÓGICO EDELWEISS Y PROYECTO RECCE**

El estudio de los cambios climáticos de épocas pasadas constituye una herramienta única para entender y contextualizar el cambio climático actual y su proyección futura. Para analizar esos cambios, incluyendo sus causas, pautas e impactos, es necesario contar con datos muy precisos. Lamentablemente, el registro instrumental del clima es muy limitado ya que cubre solo los últimos decenios, hasta un par de siglos las series más antiguas, y por ello es imperativa la búsqueda de *información paleoclimática*, es decir, la obtención de datos climáticos basados en indicadores indirectos o *proxies*.

Los indicadores que utiliza la *paleoclimatología* se encuentran en sedimentos, rocas sedimentarias, fósiles, anillos de árboles, formas relictas del relieve, documentos históricos y el hielo glaciar, entre otros registros. En conjunto conforman una inmensa base de datos paleoclimática que progresivamente se va descifrando e interpretando. Ese proceso conlleva dos aspectos básicos y complementarios: por un lado los indicadores deben aportar información fiable sobre variables climáticas, tales como la temperatura o la precipitación; por otro, deben ser susceptibles de datarse con precisión, es decir, situarlos de forma inequívoca en el tiempo.

En esa base de datos destacan los espeleotemas (del griego: depósito de cueva) que son los precipitados minerales que crecen en nuestros sistemas kársticos y admiramos en las cuevas turísticas, como las estalagmitas o las coladas. Estos depósitos, gracias a su finísima estratigrafía interna, con capas de crecimiento anual en muchos casos, y a que pueden ser datados radiométricamente mediante

series de uranio, compiten en definición temporal con los anillos de los árboles, los sedimentos varvados de los lagos, y las capas de acumulación anual en el hielo de Groenlandia y la Antártida. En cuanto a la información paleoclimática, estas formaciones minerales pueden registrar las condiciones climáticas y ambientales reinantes en el momento de su formación: la temperatura del exterior de la cueva, la pluviosidad, los patrones de precipitación, el tipo de vegetación y de suelos, o eventos naturales como incendios o inundaciones. Esa información climática queda registrada en la petrografía, la estratigrafía y la geoquímica de los espeleotemas, aunque su obtención dista mucho de ser sencilla. El proceso

conlleva pasos sucesivos que requieren de una aproximación interdisciplinar.

INVESTIGANDO EL SISTEMA KÁRSTICO

El primer aspecto que debe considerarse es el lugar donde se va a realizar el estudio: la cavidad kárstica. Las cuevas son sistemas complejos desarrollados por la disolución de la roca carbonática (caliza, dolomía, mármol), que presentan un intercambio más o menos importante de energía y materia con el exterior. Para los estudios paleoclimáticos, las cavidades con cambios ambientales de carácter estacional son en general las menos adecuadas, ya que su



© M.A. Martín, GEE

En muchas cuevas karsticas se produce la formación de precipitados minerales que genéricamente se denominan espeleotemas, y que adornan la cavidad con morfologías muy diversas, siendo las estalactitas, las banderas, las coladas y las estalagmitas las más frecuentes. Estos precipitados se forman y crecen a partir del agua de percolación que entra en la cueva. El agua se filtra a través del suelo y el epikarst y termina saliendo a la cavidad, momento en el que se produce una desgasificación y la consiguiente sobresaturación en carbonato, que conduce finalmente a la formación del mineral. El flujo de agua a lo largo del tiempo produce el depósito de sucesivas capas de carbonato cálcico, que pueden registrar los cambios climáticos y ambientales que se producen en el exterior. Su estudio, por tanto, permite la reconstrucción de los climas del pasado y su variabilidad. Cueva de Kaité, Burgos.

dinámica puede ser muy compleja y hacer que, en la práctica, sea imposible la obtención de información paleoclimática precisa. Se buscan cuevas poco o nada ventiladas, con condiciones ambientales muy estables a lo largo del año en parámetros como la humedad relativa, la concentración de CO₂ o la temperatura. También es importante que no sufran inundaciones episódicas ni otras perturbaciones que modifiquen su ambiente físico-químico de forma significativa.

El lector se preguntará cómo, en una cueva muy aislada, pueden los espeleotemas registrar los cambios climáticos que ocurren en su exterior. La respuesta resulta sorprendente: la información climática se transmite al interior de la cueva a través de un eficaz medio de transporte, el agua. Los espeleotemas se forman en gran medida a partir del agua que percola en forma de goteo desde la superficie. Esa agua de goteo tiene unas características físico-químicas que dependen en primer lugar de la lluvia o la nieve y después su viaje desde superficie hasta la cueva, a través del suelo primero y del epikarst después.

El ejemplo más sencillo de esta transmisión de información climática lo encontramos en la cantidad de goteo que se produce en la cueva. Es fácil entender que en épocas húmedas, con más precipitación y recarga del epikarst, la cantidad de goteo será mayor, y lo contrario ocurrirá en épocas secas, donde el goteo puede llegar incluso a cesar. En este sentido, una estalagmita que crece bajo un punto de goteo reducirá su crecimiento hasta pararse si se dan condiciones climáticas de sequía prolongada. Si somos capaces de leer en la estalagmita esas reducciones y parones en el crecimiento, podremos reconstruir los periodos de sequía que ocurrieron durante su desarrollo.

Más complejo de entender es la transmisión de la información a través de la hidrogeoquímica: los isótopos del agua, los iones disueltos e incluso las partículas en suspensión reflejan las características del agua de precipitación (lluvia o nieve) más las pérdidas o ganancias que se producen en el viaje desde la atmósfera hasta la cueva. Entender estos procesos es clave para saber interpretar la química

del agua de goteo y, claro está, la química de los espeleotemas que se forman a partir de ella.

Para entender estos procesos es fundamental monitorizar las condiciones ambientales y la hidroquímica de la cueva en su conjunto, y modelizar su funcionamiento. El Grupo de Hidrogeoquímica del Departamento de Medioambiente del Ciemat lleva monitorizando cuevas desde hace más de una década. Según el químico Antonio Garralón y la geóloga María Jesús Turrero, investigadores de dicho Grupo, “se trata de desarrollar laboratorios de medida *in situ* que permitan entender las condiciones bajo las cuales se forman los espeleotemas y la información climática y ambiental que registran durante su crecimiento”, lo que entienden como “una parte fundamental del trabajo paleoclimático, pues conforma la base para la generación de funciones de transferencia que permiten convertir los datos geoquímicos de los espeleotemas en datos climáticos”. La monitorización debe durar al menos cuatro años, pero los investigadores indican que “periodos más largos son necesarios para entender la influencia de la variabilidad interanual en la cueva, por ejemplo, cómo se refleja un periodo de sequía, o un periodo especialmente cálido, en la cavidad”.

Una parte fundamental del trabajo de monitorización es estudiar los espeleotemas que crecen hoy en día. Mediante *trampas* de carbonato podemos recoger estacionalmente el mineral formado en puntos seleccionados y estudiar después en el laboratorio su composición, hábito, etc., además de conocer las tasas de formación mineral y su variación estacional. Con ello podemos certificar que el



Los trabajos de monitorización hidroquímica y ambiental en cuevas son claves para modelizar el sistema kárstico y para entender y calibrar los registros paleoclimáticos que se obtengan en él.

espeleotema que está creciendo registra realmente los cambios que ocurren en el exterior en sus propiedades y que, por tanto, los espeleotemas antiguos de esa cueva pueden tener el potencial para la reconstrucción paleoclimática.

Las cuevas que se estudian pueden ser turísticas o no. Si lo son, tienen la ventaja de contar con acometida eléctrica y vigilancia, lo que facilita las instalaciones necesarias, aunque la desventaja de estudiar un sistema muy antropizado, es que las visitas masivas y la infraestructura que precisan modifican la temperatura, la humedad relativa y la composición del aire, y la luz artificial favorece el crecimiento de microorganismos. Lo ideal es estudiar cuevas “vírgenes”, aunque ello conlleva notables esfuerzos adicionales. En esta labor es fundamental la colaboración de especialistas en la exploración espeleológica, ya que su conocimiento e infraestructura hacen posible una tarea que de otra forma sería demasiado costosa y arriesgada. Un excelente ejemplo es el Grupo Espeleológico Edelweiss, uno de los más veteranos y experimentados de España, que viene colaborando en proyectos paleoclimáticos desde hace quince años. Miguel A. Martín Merino, su presidente, aclara que “las asociaciones científicas de espeleología deben tener, más allá de su cometido de exploración y conservación, el compromiso de colaborar activamente con las líneas de investigación que puedan desarrollarse en el entorno kárstico. Nuestro grupo ha defendido desde los años 70 la protección de cavidades, muchas de las cuales son hoy parte del Patrimonio Cultural y Medioambiental, y ha colaborado en la selección de cavidades idóneas para la investigación”.

SELECCIONANDO LOS REGISTROS

El siguiente paso es también crítico. Se trata de recoger las muestras de espeleotema que van a ser estudiadas. ¿Cuál es la muestra ideal? ¿Cómo se sabe su edad aproximada? ¿Es probable que no haya sufrido procesos de transformación posterior (diagénesis) que enmascaren la señal paleoclimática? Desgraciadamente no tenemos respuestas inequívocas, aunque sí criterios que, al menos, nos permiten desechar *a priori* algunos espeleotemas. Los paleoclimatólogos utilizan normalmente coladas o estalagmitas, y rara vez estalactitas, banderas u otros espeleotemas, que crecen en el techo o las paredes. La razón es que el segundo grupo presenta una estratigrafía interna mucho más compleja y discontinua, lo que plantea serias dificultades para construir series temporales. Pero incluso dentro de las estalagmitas y las coladas tenemos una enorme variabilidad, que se traduce en que, antes de cortar la muestra en el laboratorio, resulte difícil reconocer su complejidad estratigráfica interna.

Esta dificultad se ve amplificada por el hecho de que el material espeleotémico a muestrear es limitado, y normalmente considerado como parte del patrimonio natural. Extraer muestras sin los oportunos permisos puede constituir un delito, y por ello se debe trabajar siempre con la autorización correspondiente, aún para extraer pequeñas cantidades de muestra. Consuelo Temiño, Directora-Conservadora del Monumento Natural de Ojo Guareña, espacio protegido que incluye el complejo kárstico más extenso de la Península Ibérica, en la provincia de Burgos, nos



Sección longitudinal de una estalagmita en la que se aprecia su estratigrafía interna. Este tipo de muestra se usa para la reconstrucción de series de parámetros climáticos a partir de la identificación, a lo largo del eje de crecimiento, de cambios composicionales o texturales relacionados con los cambios climáticos. Esta estalagmita está expuesta en el Centro de Visitantes del Monumento Natural de Ojo Guareña (Burgos)

confirma que “la obligación de las administraciones es facilitar y colaborar con las investigaciones científicas, si bien el compromiso del científico debe ser generar la mínima perturbación ambiental y contribuir a la protección y difusión del patrimonio”. En el caso de los espeleotemas aclara que “lo adecuado es trabajar con fragmentos rotos y caídos cuya reubicación en la cueva resulte imposible o poco conveniente”.

RECONSTRUYENDO EL CLIMA

El análisis de los espeleotemas recolectados pasa por distintas fases. La primera es el estudio, a partir de

secciones longitudinales y láminas delgadas, de su microestratigrafía. La metodología podría compararse con la de un geólogo en el campo, pero a pequeña escala: reconocer y caracterizar las posibles discontinuidades estratigráficas, las zonas con alteración diagenética, los paquetes de estratos definidos por tendencias estratigráficas, las capas individuales, y las diferentes fábricas petrográficas, definidas por el crecimiento de los cristales que conforman el carbonato. Este estu-

dio ya aporta información genética y ambiental, ya que nos habla de las fases de crecimiento y de los hiatos, de las alteraciones que el espeleotema sufrió en la cueva, y de las condiciones físico-químicas bajo las que precipita el carbonato y sus variaciones. Este trabajo microestratigráfico es la base fundamental sobre la cual plantear los análisis geoquímicos orientados ya sea a la datación de las capas del espeleotema, o a la obtención de indicadores paleoclimáticos.

La datación radiométrica suele basarse en series de uranio. En concreto la relación torio-230/uranio-234 resulta extraordinariamente resolutive, y permite datar espeleotemas de hace unos pocos siglos hasta unos 600.000 años. El principio es sencillo, pues en condiciones ideales, el torio, que no es soluble y no está presente en el agua de goteo, no llega al espeleotema, mientras que el uranio sí que es soluble y llega a incorporarse en el precipitado mineral. La desintegración radiactiva del uranio-234 atrapado en el carbonato conduce a la formación progresiva de torio-230, conformando la relación entre estos isótopos un potente reloj radiométrico. Como la cantidad de estos isótopos en el espeleotema es minúscula (en partes por billón) el método analítico es complejo y delicado: se trata de extraer, mediante digestión química, el uranio y el torio de micromuestras de unos 50-100miligramos, que luego se mide en espectrómetros de masas en laboratorios especializados.

Entre los indicadores de tipo geoquímico destacan las relaciones de isótopos estables que encontramos en el carbonato cálcico, fundamentalmente las del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y las del carbono ($\delta^{13}\text{C}$). En cuevas bien aisladas y con condiciones ambientales relativamente estables, el $\delta^{18}\text{O}$ de cada capita del espeleotema depende del $\delta^{18}\text{O}$ de agua de precipitación (lluvia o nieve) que ha recargado el epikarst, y esta depende de factores ambientales como la temperatura exterior o la cantidad de precipitación, si bien los procesos que ocurren en el suelo y en el epikarst pueden modificar esa señal meteorológica. El $\delta^{13}\text{C}$ es aún más complejo de interpretar y sus variaciones en

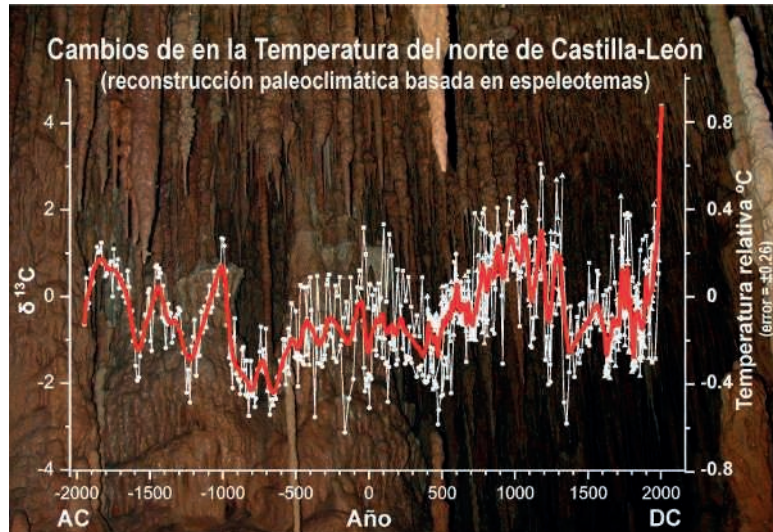


Diagrama de flujo de una investigación paleoclimática basada en espeleotemas, en la que se recogen en forma de "cajas" las principales tareas que conlleva, desde el estudio del clima actual hasta la obtención de series de variabilidad climática del pasado.

los espeleotemas suelen reflejar los cambios que se producen en el suelo y el epikarst, donde el intercambio isotópico puede ser muy intenso. Los cambios en la vegetación de superficie o en la interacción agua-roca determinan fuertes cambios en el $\delta^{13}\text{C}$, y estos pueden estar controlados por la temperatura de superficie, la pluviosidad y sus patrones, la evapotranspiración, o la ocurrencia de grandes incendios y la alteración humana.

En esta tarea de buscar indicadores paleoclimáticos también se utiliza la distribución de los elementos traza (que están en proporción inferior al 0,1%) a lo largo del espeleotema, porque puede reflejar cambios en variables climáticas. Un buen ejemplo nos lo aporta Juncal Cruz, geóloga de la Universidad Complutense que estudia los elementos traza en los espeleotemas de la cueva Kaite en el norte de Burgos: “En Kaite, las variaciones en el contenido en magnesio a lo largo del espeleotema son indicadores de una mayor o menor pluviosidad. En periodos de tiempo más secos la recarga del epikarst es menor y el agua, que permanece más tiempo en contacto con la roca antes de llegar a la cueva, se enriquece en este elemento”.

Una vuelta de tuerca más que evidencia el potencial de estos depósitos subterráneos es el estudio del agua atrapada dentro o entre los cristales de los espeleotemas en forma de poros micrométricos, que técnicamente reciben el nombre de *inclusiones fluidas*. Maialen López-Elorza, también geóloga, colabora con la Universidad de Innsbruck en esta línea frontera de la paleoclimatología y nos comenta que “se trata de bus-



Reconstrucción de las variaciones en las temperaturas del Norte de Castilla y León para los últimos 4000 años basada en espeleotemas procedentes de la Cueva Kaite (Burgos), Cueva del Cobre (Palencia) y Cueva Mayor (Burgos). Los resultados demuestran una considerable variación en las temperaturas, con una diferencia que alcanza 1,5 °C entre las etapas más frías y las más cálidas. En estos estudios, las temperaturas de la segunda mitad del siglo XX aparecen como las más altas en los cuatro milenios, aunque una prolongada y prominente etapa cálida medieval queda muy bien perfilada entre el siglo VII y el siglo XIII, con máximos en los siglos X y XII. Así mismo, destacan los episodios fríos de los siglos IV y V, y de los siglos XV al XIX. Estos estudios permiten una mejor caracterización de los patrones climáticos peninsulares y su variabilidad en escalas temporales de décadas a milenios. La integración de las series en un marco geográficamente más amplio permite analizar, además, el impacto local de los cambios climáticos a gran escala. [Modificado de Martín Chivelet et al., 2011. *Global and Planetary Change*].

car el *agua fósil* original a partir de la cual precipitó el carbonato, extraerla sin contaminación alguna, y luego analizar su composición química e isotópica con el fin de inferir parámetros climáticos como paleotemperaturas, o también ayudar a calibrar otros indicadores más tradicionales. El proceso es complejo y costoso, pero los resultados están siendo muy prometedores”.

MIRANDO AL FUTURO

Las series temporales de variación paleoclimática como las construidas a partir de los espeleotemas constituyen la base para entender los cambios globales del pasado y también los impactos de esos cambios a nivel regional. En este sentido resulta de singular importancia entender cómo fueron los

cambios climáticos en nuestro entorno. Los informes recientes del IPCC (www.ipcc.ch) y de otros paneles como la Red CLIVAR-España (www.clivar.es) identifican a la Península Ibérica como una zona de especial vulnerabilidad frente al cambio climático, con pronósticos de incremento de temperatura, cambios en los patrones de precipitaciones y aumento de los fenómenos extremos como sequías e inundaciones. Los elevados costes sociales y económicos asociados a estos pronósticos dictan la necesidad de implementar estrategias de adaptación adecuadas, siendo necesario entender los patrones de cambio en el clima en nuestro país y anticipar sus efectos. En esta tarea es fundamental adoptar una perspectiva amplia que proporcione un conocimiento detallado de la dinámica y variabilidad del clima y de sus impactos regionales. ■