

El conteo de puntos como método de estimación de la cantidad de agua de las inclusiones fluidas en espeleotemas

Point counting as a method for estimating water amount in fluid inclusions of speleothems

M. Lopez-Elorza¹, M. B. Muñoz-García¹ y J. Martín-Chivelet^{1,2}

1 Dpto. Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. maialelo@ucm.es, mbmunoz@ucm.es y j.m.chivelet@geo.ucm.es

2 Instituto de Geociencias IGEO (CISC-UCM), C/ Severo Ochoa 7, 28040 Madrid.

Resumen: Las inclusiones fluidas albergan el agua que originó el crecimiento del mineral huésped, y su estudio proporciona información relevante sobre las condiciones de crecimiento del propio mineral. En el caso de los espeleotemas, las inclusiones fluidas primarias atrapan el agua de goteo que originó el crecimiento del espeleotema. Esta agua proviene del agua meteórica que se infiltró desde el epikarst hasta la cueva, lo que supone que las inclusiones fluidas albergan el agua fósil derivada de la que precipitó en los alrededores de la cueva durante el periodo de crecimiento del espeleotema. Estas inclusiones de agua presentan una estrecha relación genética con la fábrica calcítica, y su distribución o la cantidad de agua que contienen dependen de las condiciones de crecimiento del cristal colindante. Para poder analizar todo ello, en este trabajo presentamos un nuevo método de estimación de la cantidad de agua de las inclusiones fluidas de los espeleotemas basada en el conteo de puntos petrográfico. Esta técnica permite 1) caracterizar la fábrica de calcita; 2) determinar la relación espacial entre inclusión-calcita; y por último, 3) cuantificar la cantidad de agua y aire que contienen las inclusiones. La técnica pretende ser una herramienta de gran utilidad previa a los diferentes estudios geoquímicos que se llevan a cabo en las inclusiones fluidas de los espeleotemas.

Palabras clave: estalagmita, cueva, petrografía, fábrica calcítica, lámina petrográfica

Abstract: Fluid inclusions host the formation water of the surrounding mineral, and their study provides relevant information about the growth conditions. In the case of speleothems, the primary fluid inclusions host the drip-water that fed the speleothems, which corresponds to the same meteoric water that went through from the epikarst to the cave. This means that primary fluid inclusions of the speleothems host the fossil water derived from the water that precipitated outside the cave during the growth periods of the speleothems. These water inclusions have a close relationship with the surrounding calcite fabric, and commonly their distribution or their water amount depend on the growth conditions of the surrounding calcite crystals. To analyse all these aspects, we present a new method based on the point counting. This technique allows us to 1) characterize the calcite fabric; 2) analyse the spatial relationship between fluid inclusions and calcite; and 3) calculate the water amount of fluid inclusions. The technique aims to be a helpful tool if used previously to the geochemical measurements based on the study of water fluid inclusions of speleothems.

Keywords: stalagmite, cave, petrography, calcite fabric, petrographic section

INTRODUCCIÓN

Las inclusiones fluidas son pequeñas cavidades que albergan los fluidos que originaron el crecimiento de los cristales (Roedder, 1984). Estos huecos son muy comunes en la mayoría de los minerales y presentan tamaños muy diversos: desde 1-2 μm hasta dimensiones que superan los 0.5 mm. Las condiciones físico-químicas de atrapamiento de las inclusiones fluidas son tan variables como lo son las condiciones de formación y alteración de los distintos minerales. Si el atrapamiento de las inclusiones fluidas tiene lugar durante el crecimiento del mineral, se denominan inclusiones primarias (Goldstein, 2003) y, normalmente su análisis permite identificar las condiciones físico-químicas del crecimiento mineral. En cambio, si la formación de la

inclusión fluida está relacionada con procesos post-deposicionales que afectan a los minerales ya formados (procesos de cementación o recristalización...), se conocen como inclusiones secundarias (Goldstein, 2003) y permiten obtener información sobre esos procesos específicos.

En el caso de los espeleotemas, las inclusiones primarias recogen el agua de goteo que originó el crecimiento del espeleotema (Fig. 1). Esta agua proviene del agua meteórica que recargaba el acuífero durante el periodo de crecimiento del espeleotema, y en ocasiones se utiliza como indicador de paleoprecipitaciones. (McDermott *et al.*, 2006). Por lo tanto, el estudio petrográfico de todas estas inclusiones, y el estudio geoquímico del agua que contienen, aportan información valiosa sobre las condiciones de

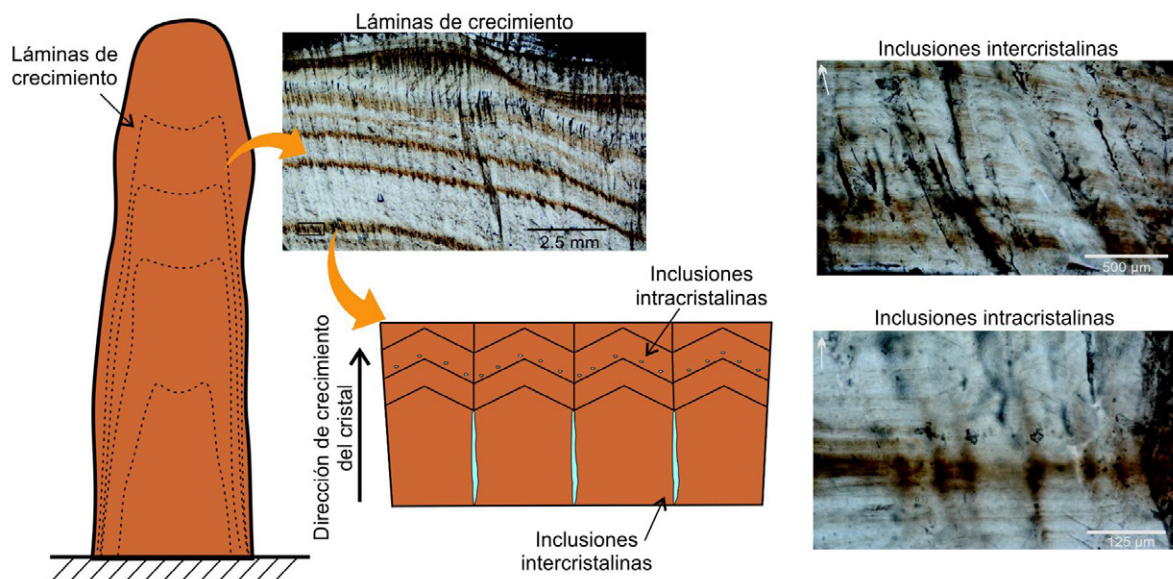


FIGURA 1: Inclusiones primarias, intercristalinas e intracristalinas, a lo largo de las láminas de crecimiento. Las fotografías corresponden a una estalagmita de la Cueva del Tortero, Valencia y las flechas de color blanco indican la dirección de crecimiento de los cristales.

crecimiento de los espeleotemas y sobre las características de las paleoprecipitaciones.

En la mayoría de los casos, las inclusiones que quedan atrapadas entre los cristales y cristalitos de calcita (inclusiones intercristalinas) suelen localizarse a lo largo de las láminas de crecimiento (Fig. 1). Estas láminas representan las fases de crecimiento del espeleotema y abarcan toda su superficie. Las inclusiones que se localizan en estas láminas presentan una morfología alargada, y normalmente su eje principal se posiciona en paralelo al eje de crecimiento de los cristales colindantes (Fig. 1). En otros casos, las inclusiones primarias pueden formarse dentro de los cristales y cristalitos de calcita (inclusiones intracristalinas) (Fig. 1). Estas inclusiones también pueden aparecer cerca de las láminas de crecimiento, pero son de menor tamaño y presentan morfologías algo más equidimensionales (Fig. 1). Como los anteriores, su eje principal se alinea en paralelo con el eje de crecimiento de los cristales de calcita (Fig. 1). En la mayoría de los casos, la tipología, la distribución y la cuantía de las inclusiones fluidas viene determinada por el tipo de fábrica calcítica que compone el espeleotema. Las fábricas abiertas (foto superior derecha en la fig. 1) acogen inclusiones tanto intercristalinas como intracristalinas, y normalmente albergan cantidades de agua más grandes. Por el contrario, las fábricas cerradas (foto inferior derecha en la fig. 1) solo albergan inclusiones intracristalinas, y generalmente aportan menos cantidad de agua.

Dado que siempre existe una estrecha relación entre el tipo de fábrica calcítica, el tipo de inclusión fluida y la cantidad de agua que albergan las inclusiones fluidas, todos estos parámetros deben analizarse de una manera conjunta y sistemática. Con ese propósito presentamos un nuevo método de estimación de la cantidad de agua de las inclusiones fluidas basada en el conteo de puntos petrográfico. Esta metodología también permite 1) caracterizar la fábrica de calcita; 2) diferen-

ciar las inclusiones intracristalinas de las intercristalinas e 3) identificar las diferentes tipologías en cada una de ellas.

LA ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA MEDIANTE EL CONTAJE DE PUNTOS

El conteo de puntos es un método cuantitativo para determinar los constituyentes (mineral, inclusión fluida...) de una roca en un plano petrográfico 2D (Arribas, 2010). El número de puntos representa el volumen de este constituyente respecto al volumen total de la roca. Para la aplicación de la técnica se utiliza una platina graduada que permite el movimiento de la lámina petrográfico en un intervalo específico. El salto entre puntos se establece en función del tamaño del constituyente en estudio. En este caso se ha utilizado un salto de 0.5mm.

En nuestro caso, el conteo de puntos se utiliza para contabilizar todas las inclusiones de agua presentes en 0.25cm² de un mismo plano petrográfico 2D de un espeleotema. Antes de ello, es necesario realizar un estudio petrográfico de la muestra para definir las clases a las que se asignará cada inclusión fluida. Seguiremos la clasificación propuesta por Lopez-Elorza *et al.*, (2016), que distingue: 1) la relación temporal entre inclusión y calcita (primaria o secundaria), 2) la relación espacial entre inclusión y calcita (intercristalina o intracristalina) y 3) la morfología de la inclusión fluida. Con todo ello, identifican seis tipos de inclusiones fluidas en los espeleotemas, de los cuales cuatro son comunes en las estalagmitas (elongada, *thorn-shaped*, piriforme y *boudin-type*).

Una vez que las clases de las inclusiones fluidas que se utilizarán para el conteo están definidas, la morfología externa de cada una de ellas se compara con un polígono 2D (Fig. 2). Esta comparación nos permite calcular el área que abarca una inclusión fluida de una manera rápida y cuantitativa.

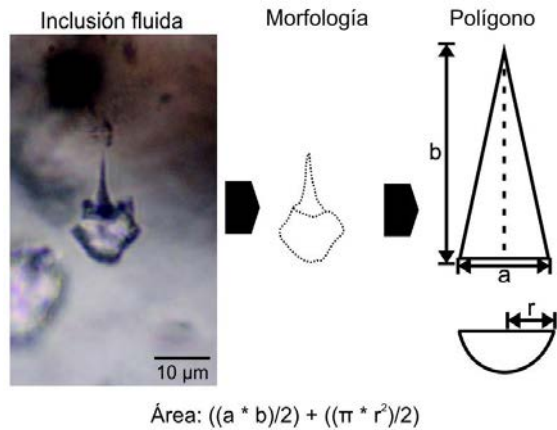


FIGURA 2: Para calcular el área que abarca una inclusión, su morfología se compara con un polígono. En este caso, la inclusión de tipo piriforme (Lopez-Elorza *et al.*, 2016), se compara con un semicírculo y con un triángulo isósceles.



FIGURA 3: Tamaños de referencia (grande y pequeño) para la tipología piriforme (Lopez-Elorza *et al.*, 2016). Si se encuentran tres inclusiones piriformes con tamaños como 3x1 μm, 4x1 μm o 5x2μm, todas ellas se agruparán en el tamaño “pequeño” y se asimilarán a las mismas dimensiones (4x2 μm) para el cálculo final de área. Las dos inclusiones corresponden a una estalagmita de la Cueva del Tortero, Valencia.

Dado que el tamaño de cada tipo de inclusión fluida puede variar dentro de la misma muestra, es preferible establecer varios tamaños de referencia (ejemplo de la figura 3). Estos tamaños representan los ejes de mayor y menor tamaño en cada tipología. Siguiendo el ejemplo de la figura 3, las inclusiones que presenten tamaños parecidos se agruparán en la misma categoría (pequeño o grande) y, para el cálculo final de área, todas ellas se asimilarán a las mismas dimensiones. Por lo tanto, el área que abarca cada tipo de inclusión se calcula sumando el área que abarcan todos los tamaños de referencia.

Después de cuantificar el área que abarca cada tipo de inclusión fluida, sumaremos el área de todos los tipos de inclusiones para calcular el área total que abarcan las inclusiones fluidas presentes en un mismo plano (Fig. 4).

Para el cálculo final del volumen de agua (μl/g) se asume que el área calculada es representativa del volumen de inclusiones fluidas y se tiene en cuenta la densidad del mineral (calcita = 2.7 g/cm³).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 5 muestra los resultados obtenidos en tres muestras con fábricas de calcita diferentes. La muestra que presenta fábrica abierta alberga un gran número de inclusiones, principalmente intercrystalinas, y proporciona la mayor cantidad de agua (13 μl/g; Fig. 5), mientras que la muestra con fábrica cerrada atrapa pocas inclusiones, únicamente intracrystalinas y, por lo tanto, proporciona menor cantidad de agua (0,2 μl/g; Fig. 5). La fábrica micrítica alberga más cantidad de inclusiones intracrystalinas y más grandes que la fábrica cerrada, y en general presenta valores de agua intermedios (3 μl/g; Fig. 5). Todas las cantidades de agua calculadas por el conteo de puntos se asemejan a las obtenidas por otros métodos (Kluge *et al.*, 2008; Verheyden *et al.*, 2008), aunque en el caso de la fábrica abierta y micrítica pueden ser más elevadas que las publicadas por otros autores (Schwarcz *et al.*, 1976). En cualquier caso, este

estudio previo es especialmente valioso para cualquier tipo de análisis microtermométrico o geoquímico posterior.

Estos estudios se basan en los análisis de isótopos estables (Verheyden *et al.*, 2008; Johnston *et al.*, 2018) y gases nobles (Kluge *et al.*, 2008) del agua de las inclusiones. En todos estos estudios, las muestras de calcita (~1 cm³) se trituran en una celda de machaqueo para poder liberar el agua que contienen. Posteriormente, el agua se transfiere a un espectrómetro de masas con la ayuda de un gas inerte. En la mayoría de los casos, la precisión de los resultados conseguidos y la fiabilidad de cada línea de extracción dependen de la cantidad de agua que se obtiene durante todo el procedimiento. Para

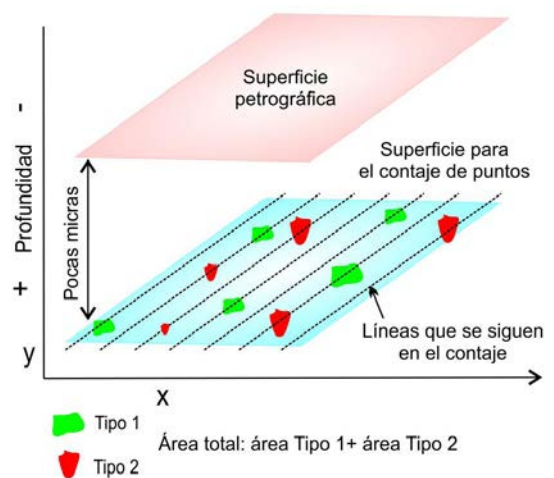


FIGURA 4: Representación esquemática del plano o superficie de conteo. Esta superficie se encuentra un poco alejada (unas pocas micras) de la superficie petrográfica de la lámina, para asegurar que las inclusiones fluidas de agua se mantienen intactas. El área total de las inclusiones fluidas de agua, es el cómputo total de las inclusiones de “Tipo 1” y las inclusiones de “Tipo 2”.

evitar ambas incertidumbres es aconsejable estimar la cantidad de agua de las inclusiones fluidas mediante la metodología que proponemos en este trabajo, que es rápida y muy barata. Las cantidades de agua obtenidas mediante machaqueo suelen ser algo menores que las obtenidas mediante el conteo de puntos, especialmente en las fábricas abierta y micrítica (Lopez-Elorza, 2019). Esto puede deberse a la efectividad del proceso de machaqueo, pero también a la diferencia que hay entre una lámina petrográfica (que puede considerarse una muestra 2D) y la muestra 3D, el cubo de calcita, que se introduce en la celda de machaqueo.

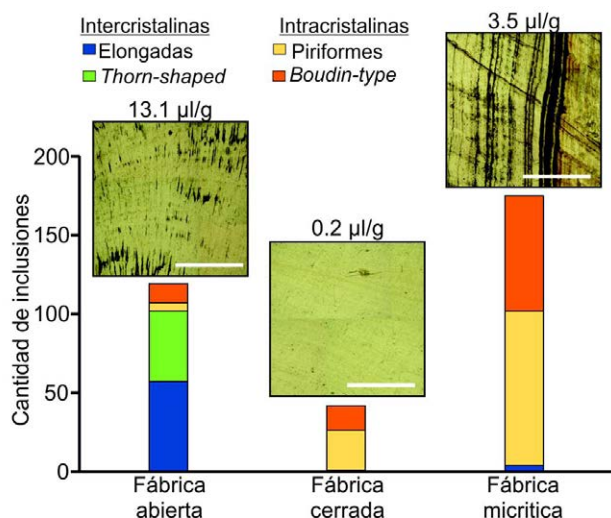


FIGURA 5: Cantidad de inclusiones fluidas, clasificadas por tipología (siguiendo la clasificación de Lopez-Elorza *et al.*, 2016), y cantidad de agua estimada para cada fábrica de calcita. La fábrica abierta contiene muchas inclusiones intercristalinas (10-100 µm) a lo largo de las láminas de crecimiento, mientras que la fábrica cerrada alberga inclusiones intracristalinas (< 10 µm). La fábrica de micrítica atrapa muchas inclusiones intracristalinas (< 20 µm) entre las láminas (color negro en foto). La escala de color blanco representa 1.2 mm. Muestras de la Cueva del Tortero, Valencia.

CONCLUSIONES

El agua de las inclusiones fluidas aporta información muy valiosa sobre las condiciones físico-químicas de crecimiento del mineral huésped. En el caso específico de los espeleotemas, la cantidad de agua que albergan las inclusiones fluidas es un factor determinante para la obtención de resultados paleohidrológicos y paleotermométricos precisos. Para solucionar este problema, en este trabajo hemos presentado un método de estimación de agua (µl/g) de las inclusiones fluidas basada en el conteo de puntos. Los resultados muestran que la cantidad de agua de las inclusiones está totalmente condicionada por las características del propio mineral huésped, por lo que la técnica también es útil para 1) determinar las diferentes fábricas calcíticas que componen el espeleotema, 2) analizar la distribución de las inclusiones fluidas o 3) identificar los diferentes tipos de inclusiones fluidas presentes en una roca.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo es una contribución a los proyectos CGL2013-43257-R y CGL2017-83287-R (MINECO) y al Grupo de Investigación de 910198 de la UCM. Agradecemos a Policarp Garay y Ana Isabel Ortega su ayuda en los trabajos en la Cueva del Tortero, y a la Generalitat Valenciana las facilidades y permisos concedidos para poderlo realizar.

REFERENCIAS

- Arribas, J. (2010): Análisis de la procedencia de depósitos arenosos. En: *Sedimentología. Del Proceso físico a la cuenca sedimentaria* (Arche, A., eds.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 397-440.
- Goldstein, R. H. (2003): Chapter 2: Petrographic analysis of fluid inclusions. En: *Fluid Inclusions-analysis and Interpretation* (Samson, I., Anderson A., Marshall, D., eds.). Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 9-53.
- Johnston, V. E., Borsato, A., Frisia, S., Spötl, C., Dublyansky, Y., Töchterle, P., Hellstrom, J. C., Bajo, R., Edwards, R. L. y Cheng, H. (2018): Evidence of thermophilisation and elevation-dependent warming during the Last Interglacial in the Italian Alps. *Scientific Reports*, 8: 2680.
- Kluge, T., Marx, T., Scholz, D., Niggemann, S., Mangini, A. y Aeschbach-Hertig, W. (2008): A new tool for palaeoclimate reconstruction: Noble gas temperatures from fluid inclusions in speleothems. *Earth and Planetary Science Letters*, 269: 408-415.
- Lopez-Elorza, M. (2019): *Microestratigrafía de inclusiones fluidas en espeleotemas pleistocenos de la Cueva del Tortero y su uso en paleoclimatología*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, Madrid. 225 p.
- Lopez-Elorza, M., Muñoz-García, M. B., González-Acebrón, L. y Martín-Chivelet J. (2016): Petrografía de inclusiones fluidas en espeleotemas: comparación con calcitas no espeleotémicas. *Geo-Temas*, 16: 625-628.
- McDermott, F., Schwarcz, H. y Rowe, P. J. (2006): Isotope in speleothems. En: *Isotopes in in Palaeoenvironmental Research. Developments in Palaeoenvironmental Research* (Leng M.J., eds.). Springer, Dordrecht, 185-225.
- Roedder, E. (1984): Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy Vol. 12. *Mineralogy Society of America*, 664 pp.
- Schwarcz H. P., Harmon R. S., Thompson P. y Ford D. C. (1976): Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 657-665.
- Verheyden, S., Genty, D., Cattani, O. y van Breukelen, M. R. (2008): Water release patterns of heated speleothem calcite and hydrogen isotope composition of fluid inclusions. *Chemical Geology*, 247: 266-281.