

Estudio del meteorito de Madrid de la colección de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales mediante técnicas no destructivas: ejemplo de aplicación de estrategia correlativa

Study of a meteorite from the Geology collection of the National Museum of Natural Sciences using non-destructive techniques: an example of the application of correlative analysis strategies

Laura Tormo^{1*}, Marta Furio¹, Ana María Bravo¹, Ioanna Theodorou¹, Cristina Paradela¹

¹ Servicio de Técnicas No Destructivas, Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), C/ José Gutiérrez Abascal nº2, 28006 Madrid. <https://orcid.org/0000-0002-0581-2353>, <https://orcid.org/0000-0003-1062-7504>, <https://orcid.org/0000-0002-4616-6933>, <https://orcid.org/0000-0001-8591-0924>, <https://orcid.org/0009-0005-0609-0144>.

* Correspondencia: ltormo@mncn.csic.es

RESUMEN

La Colección de Meteoritos del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid alberga en sus fondos diversos ejemplares de origen histórico. Entre ellos destaca el denominado Meteorito de Madrid (17167/MET-E-28) cuya caída fue documentada ampliamente en 1896. El estudio de este ejemplar comenzó en el mismo año de su caída y se fue ampliando en décadas posteriores empleando distintas técnicas, siendo las no destructivas las más adecuadas para asegurar la preservación de un ejemplar de este tipo. La aplicación de este tipo de técnicas de forma correlativa en una zona concreta del meteorito junto con una microtomografía del ejemplar completo, ha permitido corroborar la presencia de fosfatos de origen extraterrestre, así como los procesos de calentamiento por impacto sufridos por el mismo. De esta forma se muestra la utilidad de combinar de modo correlativo las capacidades de distintas técnicas mediante el empleo de un marcador de referencia al estudio de un ejemplar.

Palabras clave: Meteorito; Colecciones; Microscopía correlativa; Microscopía electrónica de barrido; Espectroscopía Raman; Microscopía confocal láser espectral; Microscopía 3D de alta resolución; Micro-difracción de Rayos X; Microtomografía computarizada de rayos X.

ABSTRACT

The Meteorite Collection of the National Museum of Natural Sciences in Madrid houses several specimens of historical significance. Among these, the *Madrid Meteorite* (17167/MET-E-28) stands out, with its fall thoroughly documented in 1896. Scientific investigation of this specimen began in the same year and was expanded in subsequent decades through the application of various analytical techniques. Non-destructive methods have been particularly advantageous, as they ensure the long-term preservation of such unique material. The correlated application of these techniques to a specific region of the meteorite, combined with a full micro-computed tomography scan,

Recibido el 5 de mayo de 2025; Aceptado el 27 de mayo de 2025; Publicado online el 21 de enero de 2025.

Cómo citar: Tormo, L., Furio, M., Bravo, A. M., Theodorou, I. y Paradela, C. (2025). Estudio del meteorito de Madrid de la colección de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales mediante técnicas no destructivas: ejemplo de aplicación de estrategia correlativa. *Estudios Geológicos*, 81(2), 1146. <https://doi.org/10.3989/egeol.45782.1146>

Copyright: ©2025 CSIC. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

enabled the confirmation of extra-terrestrial phosphates and evidence of impact-induced thermal processes. This case study demonstrates the effectiveness of integrating complementary analytical approaches, supported by the use of a reference marker, to enhance the structural and compositional analysis of rare meteoritic samples.

Keywords: Meteorite; Collections; Correlative microscopy; Scanning electron microscopy; Raman spectroscopy; Laser confocal microscopy; High resolution 3D microscopy; X-Ray micro-diffraction; X-ray computed microtomography.

Introducción

La colección de meteoritos del Museo Nacional de Ciencias Naturales constaba en 1886 de 68 ejemplares que procedían de unas 64 localidades (Fernández Navarro, 1923). El número de ejemplares se ha ido incrementando a lo largo del tiempo mediante intercambios y compras, y en la actualidad se compone de más de 240 especímenes que corresponden a unos 160 meteoritos diferentes. El denominado “meteorito de Madrid” (17167/MET-E-28) es un ejemplar singular de esta colección (Solano y Eulate, 1896) ya que su caída ocurrió en las proximidades de la ciudad de Madrid (Guinea et al., 2006) y su estudio comenzó ese mismo año (Calderón y Arana, 1896a; 1896b; Gredilla y Gauna, 1896). Este meteorito fue identificado en 1985 como una condrita de tipo L6 (Graham et al., 1985), clasificación posteriormente corroborada por otros autores (Casanova et al., 1990). Las condritas se definen típicamente como meteoritos que contienen pequeñas esferas (o cóndrulos) aunque esto no es siempre así. Se pueden definir como meteoritos que tienen composiciones similares a las del Sol y se derivan de asteroides (Weisberg et al., 2006). Estudios posteriores determinaron composición química, morfológica y cristalográfica detallada del ejemplar mediante el empleo de forma combinada de distintas técnicas (Mason, 1963; Casanova, 1990; Guinea et al., 2013).

El objetivo de este trabajo es doble, por un lado, es un trabajo metodológico en el que se describen las técnicas analíticas del servicio de técnicas no destructivas del MNCN-CSIC (<https://www.mncn.csic.es/es/investigaci%C3%B3n/servicios-cientifico-tecnicos/servicio-de-tecnicas-no-destructivas>). Por otro lado, se plantea un nuevo enfoque en el estudio del meteorito de Madrid (17167/MET-E-28). Para ello, se ha analizado una zona determinada (en este caso de un cristal) mediante distintas técnicas, correlacionando toda la información analítica y de imagen a diferencia de estudios anteriores en los que se realizaban análisis en distintas zonas del meteorito obteniéndose un resultado global. Esta aproximación se basa en la metodología de la microscopía correlativa que consiste en emplear distintos tipos de técnicas microscópicas, ya sean de imagen (óptica, confocal, electrónica, etc.), o analíticas (EDX, Raman, DRX) para analizar una única zona con el fin de obtener información complementaria y a veces única (Albu et al., 2020; Huang et al., 2023). Este método se caracteriza por la identificación de un marcador de referencia (fiducial) dentro de un área mayor que será la que se estudie mediante las distintas técnicas (Caplan et al., 2011).

Material y métodos

Se han empleado de forma combinada diversas técnicas de análisis e imagen para estudiar una misma zona del meteorito de Madrid (17167/MET-E-28). Dentro de las múltiples zonas analizables en este meteorito singular, se ha elegido como zona de análisis a estudiar un cristal de fosfato. En los meteoritos, los cristales de fosfato pueden ser elementos muy determinantes debido a que su estudio puede revelar importantes detalles no solo de distinción de roca terrestre o extraterrestre, sino de procesos termoquímicos que haya podido experimentar el meteorito.

En algunos meteoritos pueden aparecer fosfatos en forma apatito o whitlokita, siendo este último un mineral de fosfato poco habitual. La whitlokita puede ser de origen terrestre o extraterrestre, denominándose merrilita en este último caso. La whitlokita puede transformarse en merrilita por calentamiento por impacto en choques muy severos. Por lo que los fosfatos, en la mayoría de los meteoritos primitivos, se emplean para datar los eventos de choque experimentados por los meteoritos en sus cuerpos progenitores.

Como elemento marcador de referencia en microscopia correlativa (fiducial), se ha elegido un cristal de sulfuro de hierro anexo al cristal de apatito estudiado. Este tipo de mineral ferroso es muy evidente en las diferentes técnicas de microscopía, facilitando la colocalización y análisis del cristal de apatito adyacente que no es tan evidente en las mismas.

A continuación, se describen brevemente los tipos de técnicas empleadas. Las condiciones analíticas de cada una de ellas variarán en función de los ejemplares analizados. En este caso, las condiciones utilizadas para el meteorito de Madrid se detallan en el apartado de resultados.

Breve descripción de las técnicas

Microscopia electrónica de barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento que permite la observación y caracterización de materiales inorgánicos y orgánicos mediante el estudio de superficies. Consiste básicamente en un haz fino de electrones que es enfocado y barrido sobre la superficie de una muestra. Este haz genera distintos tipos de señal (electrones secundarios, retrodispersados, rayos X, etc.) que se utilizan para examinar diversas características de la misma (topografía, densidad de los distintos componentes). Estas señales recogidas por distintos detectores dan lugar a imágenes topográficas e imágenes composicionales de alta resolución, asimismo permite la obtención de espectros de composición multielemental de las distintas zonas objeto de estudio.

Microscopio Confocal Espectral

La microscopía óptica convencional se fundamenta en la interacción de un haz de luz (fotones) con una muestra. Esta interacción se produce a distintas profundidades por lo que la imagen obtenida aparece semienfocada debido a la luz procedente de las zonas fuera del plano de enfoque. La microscopía confocal se basa en la eliminación de la luz reflejada o fluorescente procedente de los planos fuera de foco. Para ello se ilumina una pequeña zona de la muestra y se toma el haz luminoso que proviene del plano focal, eliminándose los haces procedentes de los planos inferiores y superiores. Si la fuente de luz del microscopio es un láser, se iluminará una región muy pequeña de la muestra y con una gran intensidad. En este caso la técnica se denomina microscopía confocal láser Espectral.

La microscopía confocal espectral permite el estudio de muestras con fluorescencia haciendo secciones ópticas de las mismas. La fluorescencia puede darse de forma natural en determinadas sustancias, denominándose fluorescencia primaria o autofluorescencia. En otros casos no ocurre así, y es preciso añadir un marcador fluorescente denominado fluorocromo. En este caso hablaríamos de fluorescencia secundaria.

Microscopio Confocal óptico 3D-Perfilómetro

La microscopía confocal óptica LED cuenta con un sistema de iluminación de tecnología L.E.D. (Light Emitting Diode) o diodo emisor de luz, que emite luz de forma monocromática sin producción de calor. Mediante la utilización de esta técnica, la muestra es escaneada verticalmente en una serie de planos, de manera que cada punto de la superficie observada pasa a través del foco. Dispone de un software de análisis y medición de superficies tanto en 2D como en 3D, que permite la evaluación de distancias, ángulos y perímetros y, además, proporciona también la obtención de parámetros de caracterización de superficies como la medición de áreas, volúmenes, rugosidades y alturas topográficas.

Espectrometría Raman acoplada a Microscopía Confocal Óptica

La Espectrometría Raman es una técnica que se basa en un efecto de la interacción de la luz con la materia denominado “efecto Raman”, que tiene lugar cuando una pequeña porción de una luz láser monocromática incide en una muestra y es dispersada inelásticamente. Esta radiación dispersada contiene información sobre las vibraciones de los enlaces en las moléculas de la muestra excitada por la energía

de la luz incidente dando lugar a un espectro característico de la molécula. Por lo tanto, se puede usar como técnica de identificación precisa de fases minerales o especies químicas. Esta técnica está especialmente indicada para el análisis de materiales de los que se dispone poca cantidad debido a su carácter no destructivo, además se pueden hacer análisis “in situ” con elevada resolución espacial (de hasta el orden de un micrómetro). Esta técnica no consume material, y no necesita preparaciones previas de la muestra. Entre sus limitaciones se cuenta la dificultad de cuantificación, pero es una técnica complementaria con el análisis químico elemental por EDS.

Micro-difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica física no destructiva que permite reconocer de forma eficaz las fases cristalinas que componen un material. Un haz de rayos X de una longitud de onda determinada incide sobre la muestra a unos ángulos determinados recogiendo los fotones difractados por un detector situado al mismo ángulo que los rayos X incidentes. Esta técnica se basa en la interferencia de los rayos X dispersados por los átomos ordenados en la estructura de un cristal, la posición e intensidad de los rayos difractados se representa en forma de difractograma. El fenómeno de la difracción queda determinado por el tipo de átomos y la estructura del cristal, de tal forma que esta técnica permite la identificación de las fases cristalinas presentes y de contenido de fases amorfas, defectos y tensiones de las estructuras cristalinas, análisis de texturas y refinamiento estructural.

Tomografía Computerizada de Rayos X- CTScan

La tomografía computerizada de rayos X (micro-CT, microtomografía computerizada de Rayos X o tomografía computarizada de Rayos X de alta resolución), es una técnica de imagen no destructiva que permite la creación rápida de modelos tridimensionales de alta resolución. Está basada en la obtención de imágenes bidimensionales de rayos X (radiografías) a distintos ángulos, y su posterior reconstrucción mediante un algoritmo informático. Como resultado final se obtiene una representación tridimensional virtual completa, que refleja fielmente las características internas y externas del objeto escaneado, es decir, un gemelo virtual del mismo.

Para tomografiar una muestra, ésta se coloca en una plataforma giratoria situada entre una fuente de Rayos X y un detector. El detector va adquiriendo radiografías en 2D del objeto según éste gira sobre su eje, permitiendo la obtención de información de la muestra en todos los ángulos posibles. Las radiografías reflejan la atenuación de los Rayos X según éstos van atravesando la muestra, de manera que cuanto más absorción de Rayos X se produzca mayor atenuación de los mismos y menor intensidad de la radiación que llega al detector. Una vez que el objeto ha girado 360 grados, se llevan las imágenes de Rayos X en 2D a un software que aplica un algoritmo de reconstrucción, y que genera una imagen tridimensional del objeto escaneado.

Resultados

Técnicas de imagen

Mediante la técnica de microtomografía de Rayos X (CT-Scan) se obtuvo una imagen global virtual 3D del ejemplar (figura 1A). El estudio se realizó tomografiando el meteorito en un equipo de microtomografía de Rayos X XTH 160 de Nikon, utilizando 160 kV, 45 μ A y 1415 milisegundos de exposición con el target de wolframio. Se generaron 900 proyecciones durante la tomografía, y se reconstruyó el volumen total utilizando el software de reconstrucción CT Pro 3D. Se observa en ellas no sólo la forma tridimensional del meteorito sino también información del interior del mismo gracias a las proyecciones 2D que se pueden visualizar con un software de imagen. Las zonas claras de las imágenes muestran los minerales más densos del meteorito, las venas de estrés térmico e inclusiones metálicas y los huecos negros, menos densos, son fracturas producidas por diferentes metamorfismos de choque (figura 1B-1D).

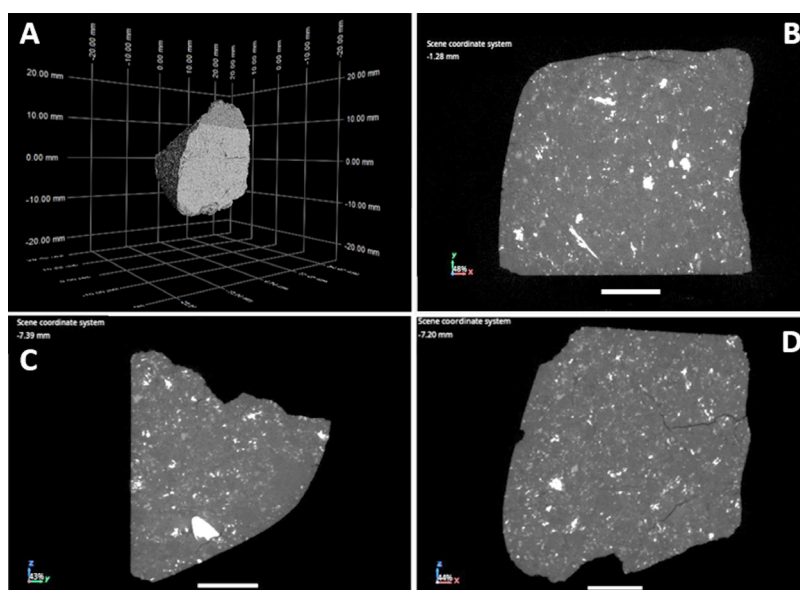


Figura 1.— Microtomografía de rayos X del meteorito de Madrid (17167/MET-E-28). A-Imagen global virtual 3D del ejemplar. B-Imagen 2D de vista axial del meteorito. Escala 4 mm. C- Imagen 2D de vista sagital del meteorito. Escala 5 mm. D-Imagen 2D de vista frontal del meteorito coincidente con la cara analizada con el resto de las técnicas. Escala 4,5 mm

Mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) se buscó en la superficie pulida del meteorito de Madrid la presencia de apatitos, a fin de seleccionar el que iba a ser estudiado mediante el resto de técnicas, se eligió uno que estaba junto a otro cristal de sulfuro de hierro de mayor tamaño que facilitaría su localización en otras técnicas actuando éste como marcador de referencia o fiducial. Este estudio se realizó con un microscopio electrónico de barrido Inspect de FEI con detector de EDS de Oxford, el experimento se llevó a cabo en modo bajo vacío a una presión de 0.46Torr y 20kV de voltaje de aceleración. En estas condiciones el meteorito no necesita ningún tipo de preparación. Se realizaron microfotografías de la zona elegida y se constató su composición química elemental, molecular y cristalográfica (figura 2).

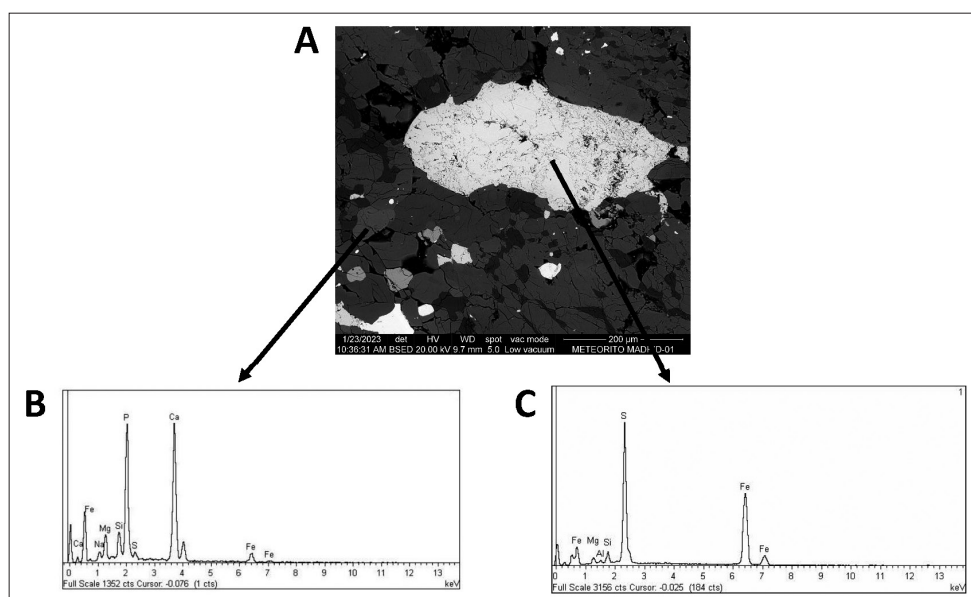


Figura 2.— A: Fotografía adquirida mediante SEM empleando el detector de electrones retrodispersados que muestra la heterogeneidad química de la muestra en distintos tonos de color gris. El fiducial aparece de color más claro por su alto contenido en hierro. B: Análisis químico elemental obtenido mediante espectroscopia EDX. El espectro obtenido en el cristal estudiado confirma la presencia de fósforo y calcio mayoritariamente, confirmando un cristal de apatito. C: Análisis químico elemental del fiducial mostrando el contenido en hierro y azufre.

Mediante el microscopio láser confocal espectral se adquirieron imágenes de fluorescencia de la superficie pulida del meteorito en el cristal previamente seleccionado por SEM-EDX de apatito. Se usó un microscopio confocal Leica SP. La autofluorescencia intrínseca de los minerales presentes se evaluó mediante un láser de excitación de 488 nm (al 100% de potencia), un filtro de detección de emisión DD488/635 y un tubo fotomultiplicador (PMT) configurado para detectar emisiones en el rango de 498–550 nm, y un objetivo de 10x. Esta configuración permitió detectar la fluorescencia natural de moléculas que contienen fosfato. Se examinaron otras características superficiales del meteorito utilizando el modo de reflexión del microscopio confocal, con un láser de 532 nm (al 1% de potencia), un filtro de detección de emisión RT30/70 y un PMT configurado para detectar señales en el rango de 522–542 nm. Esta configuración permitió mapear zonas con composición metálica. La superposición de ambas imágenes permite visualizar y diferenciar con claridad las distintas zonas composicionales de la superficie del meteorito (figura 3), aportando información complementaria y de validación frente a otras técnicas analíticas como la espectroscopía Raman y la difracción de rayos X (DRX).

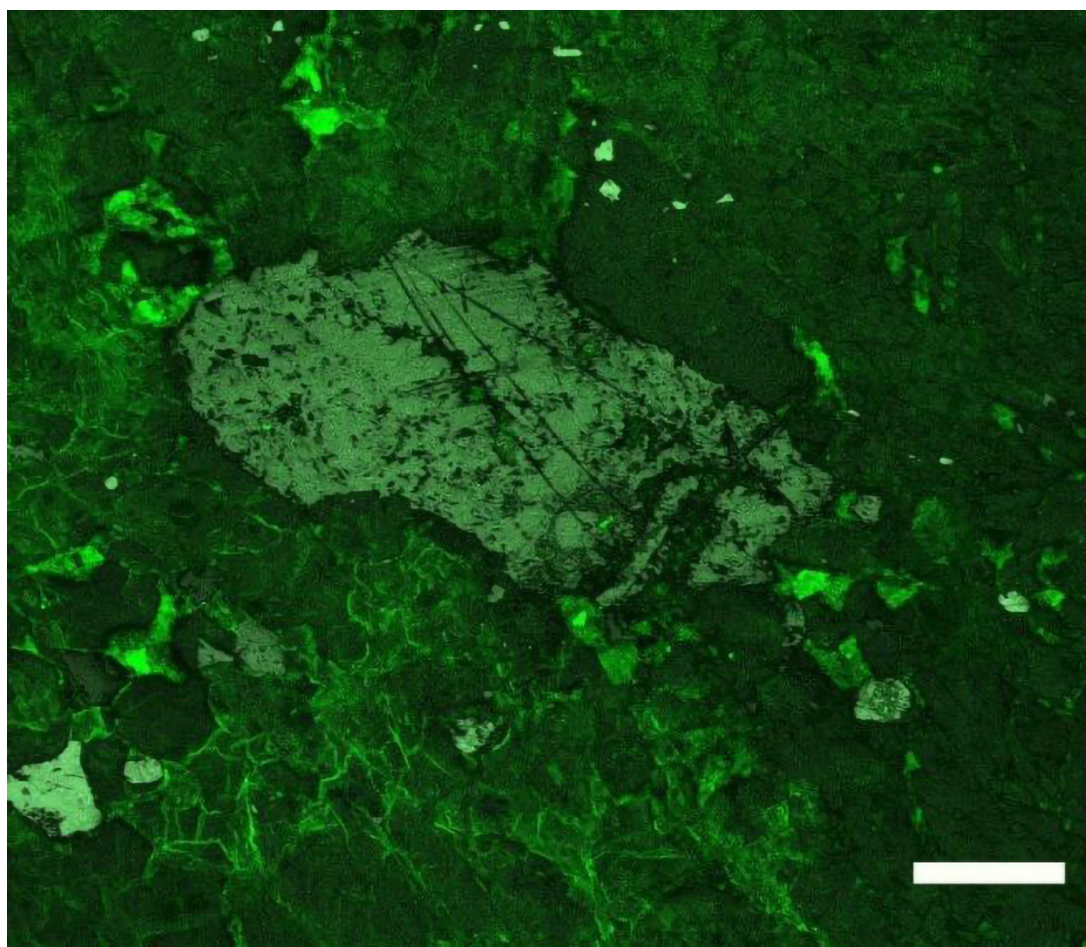


Figura 3.— Combinación de imágenes obtenidas mediante microscopía confocal láser (láser 488nm y luz reflejada). Se puede apreciar el cristal grande de sulfuro de hierro usado como fiducial por su fuerte contraste y tamaño más fácilmente localizable por todas las técnicas. El recuadro señala aproximadamente el cristal analizado. Escala 100 micras.

Finalmente, mediante la técnica de perfilometría 3D, se han generado mapas detallados en 2D y 3D de la superficie, mostrando las variaciones de altura a escalas micrométricas. Se utilizó la modalidad de variación de foco, con un objetivo de 10x y el led verde (figura 4A). Estos mapas resaltan que las zonas que contienen minerales de fosfato presentan mayores imperfecciones durante el proceso de pulido en comparación con las áreas de composición metálica (figura 4B) revelando así información sobre la dureza de los diferentes minerales que componen el meteorito.

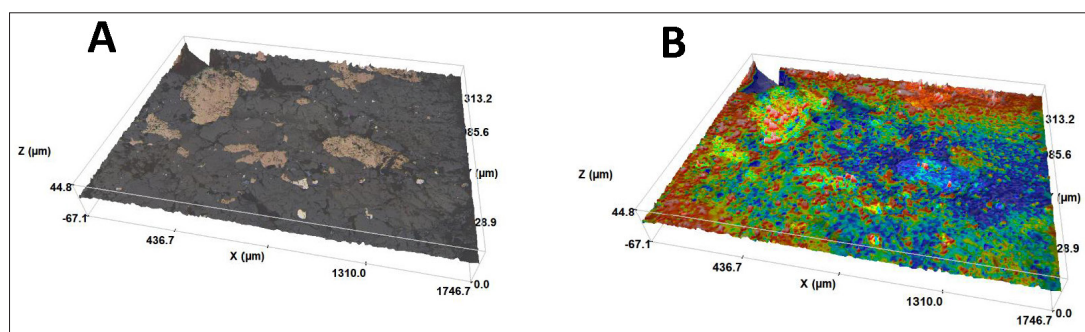


Figura 4.— A: Vista en 3D de la zona de análisis obtenida mediante el microscopio Confocal óptico 3D-Perfilómetro. En este caso se aprecia la topografía irregular de la superficie analizada que pone de manifiesto la distinta dureza de los minerales hallados. B: Imagen perfilométrica donde se ven en rojo las zonas más elevadas, más duras ante el pulido, y en azul los valles, más frágiles ante el corte y pulido.

Técnicas de análisis

Finalmente, para complementar la información morfológica, se aplicaron algunas técnicas de análisis químico elemental, molecular, y cristalográfico para obtener datos sobre la composición de dicho ejemplar. Como se explicó anteriormente, un MEB con un detector de energía dispersiva (EDX) proporciona un espectro de composición elemental de una muestra. En este caso se analizó un cristal de fosfato (figura 2B) y el fiducial de sulfuro de hierro (figura 2C). Para obtener información sobre la composición molecular se utilizó la espectroscopía Raman (figura 5) donde se determinó la presencia de whitlockita dentro del fosfato analizado. Este análisis se realizó con el láser de 780nm, objetivo de 5x y una potencia de 14mw. Finalmente, para determinar la estructura cristalina de las fases analizadas, así como la presencia de merri-lita y whitlockita, fosfatos que coexisten en este meteorito, se usó la micro-difracción de rayos X (figura 6). El estudio se realizó con un equipo de microdifracción de rayos X Discover D8 de Bruker con tubo de Rayox X de $\text{Cu(K}\alpha\text{)}$, 50 kV y 1000 μA , y colimador de 1mm, la identificación de fases se llevó cabo con el software EVA. Se obtuvieron espectros con picos característicos que permitió identificar esta composición cristalográfica mediante comparación con bases de datos de compuestos conocidos.

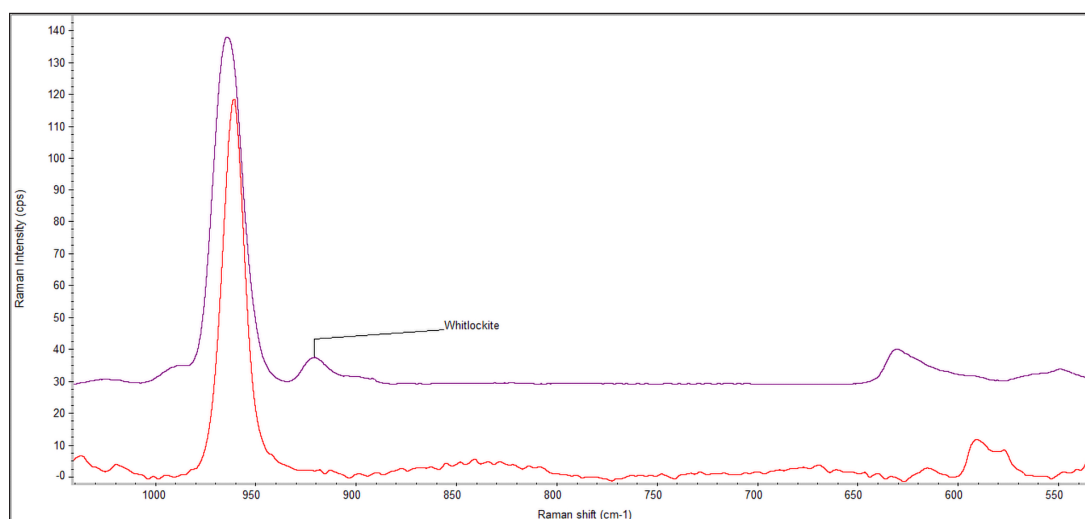


Figura 5.— Análisis químico molecular del cristal de fosfato mediante espectrometría Raman. En este caso se puede ver el espectro obtenido mediante el análisis Raman y un patrón del mineral whitlockita que evidencia la presencia del mismo.

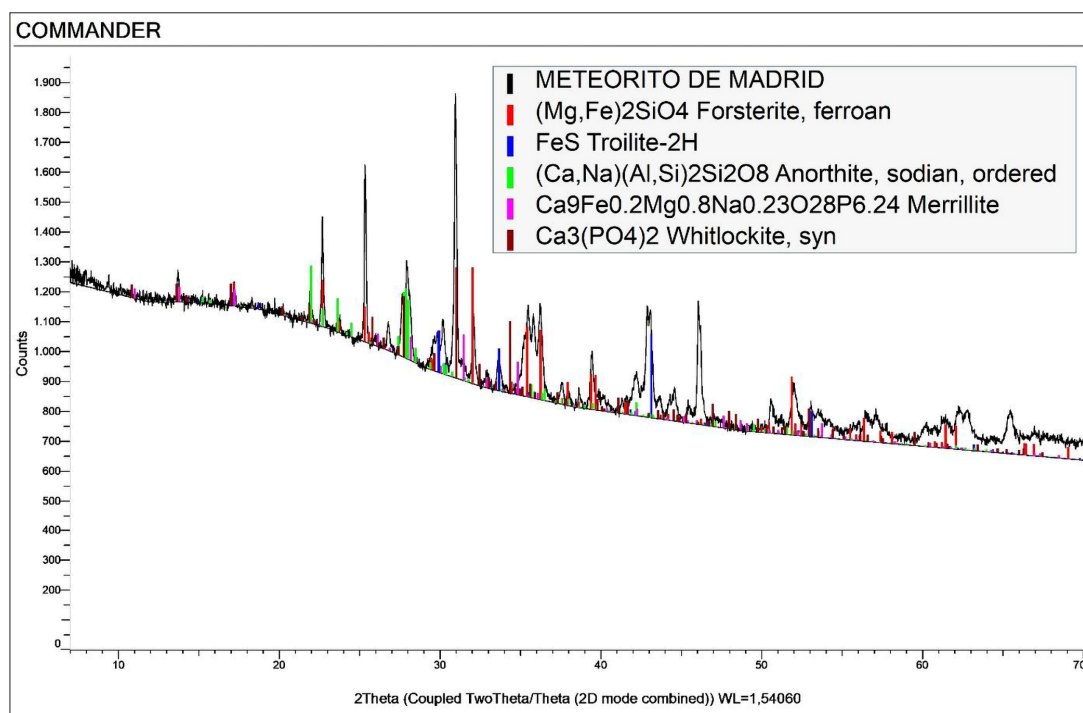


Figura 6.— Difractograma e identificación de fases del cristal de fosfato. Se pone de manifiesto como en un mismo cristal de fosfato pueden coexistir zonas de merrillita y whitlockita así como los demás minerales que componen la matriz circundante.

Conclusiones

El meteorito de Madrid (17167/MET-E-28) es una de las piezas históricas de la colección de meteoritos del MNCN que ha sido ampliamente estudiada desde su caída en 1896. A diferencia de estudios anteriores en los que se analizaban distintas zonas del ejemplar con cada técnica, en el presente trabajo se han utilizado las distintas técnicas de imagen y análisis de forma correlativa en un único cristal de fosfato del meteorito. Se ha puesto de manifiesto la gran importancia de la elección de un buen fiducial que permita encontrar, mediante técnicas de diversa escala analítica, una misma zona de análisis microscópica. La elección del cristal de sulfuro de hierro resultó ser adecuada.

Se ha confirmado la presencia de merrillita en el Meteorito de Madrid que, no solo confirma que se trata de una roca extraterrestre, sino que el meteorito sufrió calentamiento por impacto en choques muy severos. Este fenómeno también queda evidenciado por las numerosas venas de choque térmico, en todo el volumen del meteorito, observadas en la microtomografía.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al conservador de la colección de Geología del MNCN-CSIC, Aurelio Nieto por facilitar el acceso al “meteorito de Madrid” (17167/MET-E-28). Agradecemos también las sugerencias de dos revisores cuyas aportaciones han ayudado a la mejora del presente trabajo.

DECLARATION OF COMPETING INTEREST

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

CRediT AUTHORSHIP

Laura Tormo Cifuentes: Conceptualization, Investigation, Methodology, Supervision, Writing-review & editing; **Marta María Furió Vega:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing- review & editing; **Ana María Bravo Arce:** Visualization, Writing – original draft, Writing- review & editing; **Ioanna Theodorou:** Investigation, Methodology, Visualization, Writing- review & editing; **Cristina Paradela Guerrero:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing -review & editing

Referencias

- Albu, M., Fitzek, H., Moser, D., Kothleitner, G. & Hofer, F. (2020) Multiscale and Correlative Analytical Electron Microscopy of Extraterrestrial Minerals. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 7: 544331. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.544331>
- Calderón y Arana, S. (1896a). Le bolide de Madrid. *Le Naturaliste*, 216: 55-56.
- Calderón y Arana, S. (1896b). Mas datos sobre el meteorito de Madrid. *Anales Sociedad Española de Historia Natural, Actas*, 25: 64.
- Caplan, J., Niethammer, M., Taylor II, R. M. & Czymmek, K. J. (2011). The Power of Correlative Microscopy: Multi-modal, Multi-scale, Multi-dimensional. *Current Opinion in Structural Biology*, 21(5), 686-693. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2011.06.010>
- Casanova, I., Keil, K. Wieler, R., San Miguel, A. & King, E. A. (1990). Origin and history of chondrite regolith, fragmental and impact-melt breccias from Spain. *Meteoritics*, 25, 127-135. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1990.tb00984.x>
- Fernández Navarro, L. (1923). Los meteoritos del Museo de Madrid. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 23, 224-233.
- García Guinea, J., C. Martín Escorza, C., Fernández Hernán, M., Sánchez Muñoz, L., Correcher, V., Sánchez Chillón, B., & Tormo, L. (2006). Meteoritos españoles del Museo Nacional de Ciencias Naturales. *Estudios Geológicos*, 62 (1), 11-30. <https://doi.org/10.3989/egeol.066211>
- García Guinea, J., Tormo, L., Rubio Ordoñez, A. & García-Moreno, O. (2013). Non-destructive analyses on a meteorite fragment that fell in the Madrid city centre in 1896. *Talanta*, 114, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.03.070>
- Graham, A. L., Bevan, A. W. R. & Hutchison, R. (1985). *Catalogue of Meteorites, 4th Edition*, British Museum, Tucson, Arizona.
- Gredilla y Gauna, A. F. (1896). Estudio petrográfico del meteorito de Madrid. *Anales de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Actas*, 25. 223-242.
- Huang, T-J., Niverty, S., Sundar, A. & Chawla, N. (2023). Microstructural characterization and mechanical behavior of Aba Panu meteorite by correlative microscopy and nanoindentation. *Materials Characterization*, 205: 113331. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113331>
- Mason, B. (1963). Olivine composition in chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(10), 1011-1023. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(63\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(63)90062-0)
- Solano y Eulate, J. M. (1896). Ejemplar del meteorito caído en Madrid el 10 de febrero de 1896. *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural. Actas*, 25. 32.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J. & Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. In *Meteorites and the Early Solar System II*. D. S. Lauretta & H. Y. Jr. Sween (Eds.). 19-52. University of Arizona Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1v7zdmm.8>