

Mineralogía Automatizada de Menas por Microscopía Óptica: el Sistema AMCO

Juan-Carlos Catalina (*), David Alarcón, Úrsula Grunwald-Romera, Paulo Romero, Alfredo López-Benito, Ricardo Castroviejo

Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen. Universidad Politécnica de Madrid, 28003, Madrid (España)
* corresponding author: catalina@iies.es

Palabras Clave: Microscopía de menas, Mineralogía automatizada, Geometalurgia, Reflectancia multispectral | **Key Words:** Ore microscopy, Automated mineralogy, Geometallurgy, Multispectral reflectance

INTRODUCCIÓN

La optimización de procesos para el aprovechamiento industrial de recursos minerales exige hoy una caracterización mineralógica de éstos cuantificada, precisa y rápida, apoyo básico para la Geometalurgia. La herramienta tradicional para el estudio de menas metálicas, el microscopio de luz reflejada, ha sido parcialmente relegada en los últimos años por los sistemas automatizados de microscopía electrónica (**MEB**). Éstos son más caros y no siempre fiables, pero ofrecen un alto rendimiento. No obstante, la microscopía óptica automatizada permite un rendimiento comparable (y más fiable en algunos casos) con un coste sensiblemente inferior. Lo prueba el Sistema que ahora se presenta, **AMCO** (*Automated Microscopic Characterization of Ores*), fruto del reciente proyecto I+D+i financiado por EIT RawMaterials (Proyecto EIT no. 15039 / H2020).

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El diseño de aplicaciones industriales automatizadas para la microscopía de menas ha sido un empeño constante del Lab^o de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen (**LMA**, ETSI Minas y Energía, UPM), que en colaboración con AITEMÍN (2007-2009) puso a punto el Sistema CAMEVA (Castroviejo et al. (2009), Catalina y Castroviejo (2017)). Éste fue precursor del actual Sistema AMCO (2016-2018), desarrollado por un consorcio europeo coordinado por UPM y con participación de: Université de Liège (Bélgica), Mina Cobre Las Cruces (España), KGHM Polska Miedz (Polonia) y ThinSectionLab (Francia).

El desarrollo de AMCO se ha planteado con los siguientes objetivos: (i) lograr la identificación automatizada (**IA**) de las menas más comunes o de mayor interés industrial por medio de la microscopía óptica (de reflexión, sobre secciones pulidas); (ii) hacer compatible este proceso con la cuantificación automatizada (**CA**), que implica el barrido de la muestra

mediante una platina XY motorizada y, en consecuencia, la renuncia a la habitual platina rotatoria; (iii) construir, como instrumento esencial para la identificación, una base de datos multispectral (**BDM**) que cubra al menos el rango VNIR (visible e infrarrojo cercano, entre 400 y 1000 nm) -con posibilidad de ampliarla al rango SWIR (infrarrojo de onda corta, entre 1000 y 1700 nm)- y que recoja medidas fiables de reflectancia especular para cada una de las menas sobre granos de orientación aleatoria, renunciando por tanto a la polarización; (iv) cuantificar píxel a píxel la información de cada imagen, para desarrollar las aplicaciones industriales (reconocimiento de especies minerales, análisis modal, granulométrico y del grado de liberación, caracterización textural, etc.); (v) ofrecer una interfaz de usuario de fácil manejo (*user-friendly*), útil también para docencia universitaria y para LLE (*life-long education*) industrial, que facilite el aprendizaje de la microscopía de menas; (vi) validación del sistema con datos externos, análisis estadísticos y ensayos de problemas reales; (vi) producción de un prototipo apto para comercialización con TRL (*Technology Readiness Level*) 7-8.

MATERIALES Y MÉTODOS

La selección de las menas más adecuadas para la BDM se ha hecho teniendo en cuenta su abundancia (p. ej. pirita) y su interés industrial (por ejemplo, Au y EGP), resultando prioritarias unas 40 especies, que coinciden en gran parte con las descritas en los manuales de microscopía. No obstante, la BDM está abierta a la incorporación de nuevas especies -actualmente son 74-, como la monacita (no incluida habitualmente en manuales) o las variantes que puedan encontrarse en ciertos yacimientos. Esto es importante, porque la respuesta espectral puede variar con la composición, la cristalinidad, la alteración superficial o pátina, etc., así como con la calidad del pulido, que ha de ser asegurada.

El Sistema AMCO consiste en un **equipo** especialmente diseñado para la adquisición automatizada de imágenes

microscópicas multiespectrales de reflectancia especular sobre secciones pulidas, y un **software** específico.

A su vez, el equipo está integrado por un microscopio de luz incidente totalmente motorizado, adaptado para permitir su utilización fuera de la banda visible y dotado de diversos elementos auxiliares (ruedas de filtros con numerosos filtros de paso de banda en los rangos VNIR y SWIR, cámaras B&N para dichos rangos, platina XY motorizada de precisión), todos ellos controlados desde un ordenador.

El software del sistema AMCO ha sido estructurado como dos aplicaciones independientes:

- *amcoCapture*, que controla los elementos del equipo y permite adquirir series de imágenes multiespectrales de reflectancia especular de campos de una sección pulida, garantizando la exactitud y reproducibilidad de los resultados. Las imágenes pueden ser capturadas de una en una por el operador del sistema en modo manual, o mediante el barrido automático de la preparación.
- *amcoAnalysis*, que permite analizar de forma manual o automática las imágenes de una serie, reconociendo los distintos minerales a partir de sus valores de reflectancia especular en las distintas bandas de la imagen multiespectral. Realiza una caracterización microscópica completa de la muestra, incluyendo análisis modal, granulométrico, de grado liberación y textural.

El actual prototipo del sistema AMCO está basado en un microscopio óptico Leica DM6000 M, y permite adquirir imágenes multiespectrales compuestas por 20 bandas de reflectancia en el rango VNIR (de 370 a 1000 nm) y una banda de fluorescencia opcional. Adicionalmente, se pueden adquirir 12 bandas en el rango SWIR, entre 1050 y 1600 nm, aunque con una resolución mucho menor.

PROCESO EXPERIMENTAL

La IA se logra mediante la aplicación de técnicas de clasificación basadas en los valores de reflectancia especular en cada una de las bandas de la imagen multiespectral, que son comparados con los valores recogidos en la BDM. El proceso de identificación se realiza píxel a píxel, obteniéndose altas tasas de acierto en la clasificación de zonas uniformes y bien pulidas como las escogidas para la elaboración de la BDM, aunque los resultados empeoran cerca de los bordes de grano o en zonas con pulido defectuoso.

Para la CA de una muestra es necesario partir de una serie de imágenes representativa, que resulta fácil de obtener mediante el barrido automático del programa *amcoCapture*. Para ello, el operador marca dos puntos de la preparación que delimitan una zona rectangular, que a continuación es barrida de forma automática por el programa con un paso en X e Y que permita capturar imágenes con un % de cobertura dado de la superficie. Los análisis realizados han confirmado que una sección

pulida típica puede ser caracterizada procesando del orden de 100 campos adquiridos con un objetivo 20x.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que el Sistema AMCO logra una IA fiable y una CA con un rendimiento comparable al de los sistemas basados en MEB, superando a éstos en algunos casos como el de la distinción de menas de Fe o la identificación de grafito. La validación se ha hecho, en primer lugar, comparando los espectros BDM con las bases de datos existentes (Criddle and Stanley, 1993) o medidas en sistemas externos. Luego, mediante análisis estadístico, aplicando diversos métodos de clasificación automatizada de las medidas BDM y comparando los resultados, siendo los más fiables la Distancia de Mahalanobis y el Análisis Discriminante Lineal, con tasas de acierto normalmente superiores al 99 %. Las excepciones tienen una explicación mineralógica, como la proximidad de los espectros de casiterita y cromita o los de esfalerita, manganita y wolframita. No obstante, estos casos pueden resolverse por criterios adicionales de discriminación. Entre éstos están los criterios paragenéticos y el recurso a rangos espectrales específicos (SWIR).

CONCLUSIONES

La microscopía de menas automatizada es una herramienta útil y de alto rendimiento, tanto para el aprendizaje como para sus aplicaciones mineralúrgicas. El Sistema AMCO representa una alternativa real (competitiva o complementaria) a los sistemas MEB recientemente desarrollados. En ambos casos, el experto mineralogista, lejos de sentirse amenazado por un planteamiento de *black-box* ilusorio, puede ver su rendimiento enormemente potenciado. Las aplicaciones de sistemas como AMCO podrán, previsiblemente, multiplicarse en el futuro, toda vez que el prototipo es susceptible de diversos desarrollos.

REFERENCIAS

- Castroviejo, R., Brea, C., Pérez-Barnuevo, L., Catalina, J.C., Segundo, F., Bernhardt, H.J., Pirard, E. (2009): Using computer vision for microscopic identification of ores with reflected light: preliminary results. Proc. 10th biennial SGA Meet. Vol. 2. Townsville, Australia, Williams et al., eds. 682-684. ISSN: 9780980558685.
- Catalina, J.C. y Castroviejo, R. (2017): Microscopía de Reflectancia Multiespectral: Aplicación al Reconocimiento Automatizado de Menas Metálicas. Revista de Metalurgia. **53-4**, 1-20. DOI: 10.3989/revmetalm.107.
- Criddle, A.J. and Stanley, C.J., eds. (1993): Quantitative Data File for Ore Minerals, 3rd edition. Chapman & Hall, London, 635 p.



EIT RawMaterials is supported by the EIT,
a body of the European Union