

a Equipo

En la industria minera no siempre se realiza un adecuado estudio previo de la relación entre la mineralización existente en el yacimiento y el tratamiento y concentración de la mena, lo que impide la optimización en los procesos y conduce hacia un mal procesamiento del mineral con consecuencias nefastas para el medio ambiente.

Para la optimización de estos procesos la Geometalurgia se apoya en la Mineralogía. La aplicación de la microscopía de reflexión permite la identificación, cuantificación y caracterización de las fases minerales presentes en secciones pulidas para conocer la realidad de la mena tratada y su comportamiento. Y es aquí donde el empleo de Análisis Digital de Imagen (ADI) juega un papel importante como apoyo y complemento a la microscopía de reflexión, por introducir la automatización.

PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO.

Este trabajo se ha realizado para comprobar la funcionalidad y el rendimiento del equipo de análisis digital de imagen basado en tres bandas RGB en su aplicación a la caracterización y cuantificación de menas, mediante la aplicación de una metodología concreta diseñada por Berrezueta (2004).

A través de esta metodología se alcanza la puesta a punto del equipo y se obtienen los rangos de segmentación de las fases minerales a cuantificar. Posteriormente, se realiza el estudio de un caso concreto en el que a través de ADI se caracteriza y cuantifica una

proveniente de minerales metálicos previamente analizada por un mineralogista experto a través del método manual del contador de puntos, de manera que los resultados derivados del estudio con sendos métodos puedan ser comparados.

PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE ADI.

Existen varios factores derivados del conjunto de elementos que conforman el equipo de ADI que requieren ciertas condiciones de estabilidad que garanticen la reproducibilidad del método. En este sentido deben controlarse los siguientes factores:

- Deriva Temporal: Variación de la respuesta de la cámara en función del tiempo que tarda en alcanzar una estabilización en su temperatura. En el equipo de ADI hay dos elementos susceptibles de sufrir deriva temporal: Cámara de vídeo 3CCD (tiempo de precalentamiento 80 minutos) y lámpara del microscopio (tiempo de precalentamiento 40 minutos).
- Ruido: Se trata de la dispersión en la señal de salida de la cámara debida a varias causas: fotones, corriente y digitalización, entre otras. Para la disminución del ruido se realizan operaciones de promediado de imágenes, siendo 32 el número de imágenes a promediar para conseguir mayor reducción del ruido.
- Deriva Espacial. Variación de la respuesta en nivel de gris de un mismo objeto en función de su localización espacial bajo el microscopio. Se corrige aplicando una corrección propuesta por Pirard et al. (1999) en función de imágenes de patrones de alta y baja reflectancia.

Además del control de estos parámetros, deben definirse otras condiciones de trabajo, como intensidad de iluminación (establecida en 6.5 V para evitar saturación en las fases más reflectivas), objetivo de 20 aumentos, intercalación de filtros (Azul, para corregir la tendencia al rojo de la luz blanca y Filtro Difusor para homogeneizar la iluminación), etc.

CARACTERIZACIÓN DE FASES MINERALES MEDIANTE ADI (RGB).

Obtenidas las condiciones de estabilidad del equipo de ADI, el siguiente paso consiste en obtener los niveles de gris característicos (rangos de segmentación) de cada una de las fases minerales en estudio en cada una de las bandas Roja, Verde y Azul.

En primer lugar debe realizarse la identificación de la mineralogía presente en la muestra, que resulta ser: Bornita, Calcopirita, Calcosina, Covellina, Hematites, Magnetita, Molibdenita y Pirita.

Conocida la mineralogía, el proceso de caracterización comienza con un muestreo de los minerales cuyos rangos de nivel de gris (NG) se quieren obtener. Para ello se seleccionan granos de cada uno de los minerales con superficie homogénea (sin rayas de pulido, sin sombras, sin arranques, etc.). De cada uno de estos granos se toman medidas de NG de un número determinado de ventanas de muestreo de 10x10 pixels, siendo 40 el número mínimo de ventanas de muestreo para que las medidas sean representativas de toda la muestra (Berrezueta, 2004).

Tras un análisis estadístico de los datos obtenidos se obtienen los rangos de

palabras clave: Análisis Digital de Imagen, Microscopía de Reflexión, Reflectancia, Nivel de Gris, Cuantificación.

key words: Digital Analysis of Image, Reflection Microscopy, Reflectance, GreyLevel, Quantification.

segmentación de cada mineral. La validez de estos rangos de segmentación queda comprobada por la existencia de una relación lineal entre el porcentaje de reflectancia teórico (Criddle & Stanley, 1993), y los niveles de gris obtenidos para cada mineral por el equipo de análisis digital de imagen.

CUANTIFICACIÓN MINERAL: ADI vs. CONTADOR DE PUNTOS.

Los resultados de la cuantificación obtenida con ambos métodos se muestran en la figura 1. En ella se observa que la tendencia general de los datos obtenidos con ambos métodos es similar, y las diferencias no superan los márgenes de error previsible e inherente a la representatividad estadística de las muestras estudiadas (Castroviejo et al., 1999).

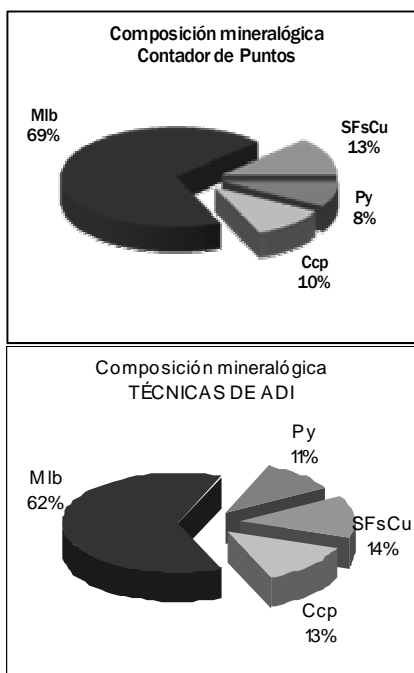


fig. 1: Cuantificación mineral: ADI vs. Contador de puntos. (SFsCu: Bornita + Calcosina).

Además de la comparación de los resultados de cuantificación mineral obtenidos por ambos métodos, resulta igualmente interesante realizar una reflexión económica sobre la aplicación del análisis digital de imagen frente al método manual.

Si bien es cierto que la inversión en un equipo de análisis digital de imagen supera la inversión en un contador de puntos, el tiempo invertido en la formación y dedicación de un mineralogista experto capaz de realizar estudios mineralógicos de caracterización de menas mediante contador de puntos es muy superior al necesario para realizar estos estudios mediante la aplicación de ADI. Además,

la cantidad de probetas que es posible analizar mediante análisis digital de imagen en un periodo concreto de tiempo es superior al número de probetas que puede analizar un operador manual durante el mismo período de tiempo.

INNOVACIONES METODOLÓGICAS EN ADI.

En el Laboratorio de Microscopía Aplicada de la ETSI Minas de Madrid se está llevando a cabo en la actualidad el proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas mediante Visión Artificial), que introduce algunas novedades respecto a la técnica empleada en el presente estudio. La principal novedad de este proyecto es que intercala una rueda de filtros monocromadores entre la fuente luminosa y el microscopio. Se trata de 13 filtros de longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 1000 nm con espaciado de 50 nm, de manera que permite capturar imágenes multispectrales de minerales no sólo en el espectro visible, sino también en el ultravioleta e infrarrojo cercano, dando como resultado la caracterización de los minerales por trece medidas precisas de reflectancia y evitando de esta forma posibles solapes entre los rangos de segmentación de minerales con reflectancia similar. Además el equipo cuenta con platina y enfoque automatizados, confiriendo mayor rapidez y precisión al proceso y obteniendo así resultados más fiables y precisos.

CONCLUSIONES.

A través de este trabajo se ha constatado cómo un usuario sin experiencia previa es capaz de poner a punto el equipo de análisis digital de imagen y obtener resultados de cuantificación mineral comparables a los resultados obtenidos por un mineralogista experto mediante el contador de puntos. Las conclusiones del trabajo realizado son las siguientes:

- Siguiendo de forma rigurosa la metodología establecida (Pirard et al., 1999; Berrezueta, 2004) se ha logrado la puesta a punto del equipo de ADI, garantizando las condiciones de estabilidad necesarias para garantizar la reproducibilidad de las medidas.
- Ha sido posible obtener de forma fiable y estadísticamente contrastada los rangos de nivel de gris en los cuáles se segmenta cada una de las fases minerales estudiadas.
- Los resultados de cuantificación

obtenidos por el estudio mediante ADI revelan la misma tendencia general que los resultados obtenidos por un mineralogista experto aplicando la técnica manual del contador de puntos.

- La automatización es el punto fuerte de la metodología de análisis de imagen y permite no sólo un gran rendimiento de trabajo, sino también una versatilidad de cálculo que no está al alcance de los métodos manuales. No obstante no debe prescindirse totalmente del apoyo del mineralogista, al menos para definir las condiciones iniciales (segmentación). Por otro lado, el empleo de técnicas de análisis de imagen frente a al contador de puntos supone un sensible abaratamiento de los costes de operación para un número de muestras suficiente, fundamentalmente porque no exige la dedicación continuada de un mineralogista experimentado.

AGRADECIMIENTOS.

Se reconocen los apoyos del Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos GR-92-0135, UE95-007, UE98-0027 y CGL2006_13688_C02_01) y de la Comunidad de Madrid (Ayuda Red de Laboratorios, rla207) para la adquisición de la instrumentación, así como del Programa ALFA de la UE para la realización de la Tesis de Máster origen de este trabajo (beca del Programa Máster Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, ALFAII0459FA).

REFERENCIAS.

- Berrezueta, E. (2004): *Caracterización de menas mediante Análisis Digital de Imagen: Investigación y diseño de un sistema experto aplicable a problemas mineros*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Geológica. E.T.S.I. de Madrid.
- Castroviejo, R., Chacón, E., Múzquiz, C., Tarquini, S. (1999): *A preliminary image analysis characterization of massive sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain)*. Geovision. International Symposium of Imaging Applications. In Geology. Liège, Bélgica. 37-40.
- Criddle, A.J. & Standley, C. (1993): *Quantitative data file for ore minerals*. Third Edition. Chapman & Hall British Museum, Londres. 635.
- Pirard, E., Lebrun, V., Nivart, J.F. (1999): *Optimal Acquisition of Video Images in Reflected Light Microscopy*. Microscopy and Analysis, July 1999, pp. 9-11.