

## ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE MENAS Y CONCENTRADOS DE PLANTA

**Autor: Juan Carlos Catalina**  
**Director Técnico**  
**MULTISPECTRAL MICROSCOPIC TECHNOLOGIES S.L.**  
**email: jc.catalina@mmt-systems.com**

### 1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento industrial de los recursos minerales requiere hoy en día, tal como se ha mostrado reiteradamente a lo largo del texto, una información mineralógica, precisa y cuantificada, sobre los distintos aspectos que pueden condicionar el comportamiento de una mena en planta: esto es lo que suele entenderse por caracterización mineralógica de la mena. Desde sus mismos inicios, la microscopía (óptica) de reflexión ha sido una técnica esencial para obtener dicha información y pronto desarrolló instrumentos auxiliares adecuados, entre los que destaca la platina integradora o contador de puntos.

La aplicación del contador de puntos, cuyo uso no cesó de incrementarse durante el siglo XX, significó un paso temprano e importante, aunque elemental, hacia la automatización. Y permitió por primera vez cuantificar sustancialmente la información mineralógica y obtener datos objetivos de composición (análisis modal), tamaños de grano y grado de liberación, entre otros. No obstante, la irrupción, en el campo de la microscopía, de las técnicas automatizadas de análisis digital de imagen, hacia el último cuarto del siglo XX, supuso un punto de inflexión en dicha tendencia. Inflexión impuesta en gran parte por la evolución de la industria, marcada particularmente por el aprovechamiento de menas de baja ley / gran tonelaje y con altas exigencias para la eficacia del proceso en planta, tanto por lo que respecta a la recuperación de la mena, como al control del impacto ambiental.

Esta exigencia sitúa hoy al ingeniero de planta ante la urgencia de una información mineralógica masiva y continuada, a ser posible en *tiempo real*, documentando con *datos cuantitativos* cada una de sus etapas, para su control y optimización. Las técnicas tradicionales de apoyo, basadas en el contador de puntos acoplado al microscopio de menas y manejado por un operador manual, han demostrado su eficacia histórica pero la demanda de análisis de millones de puntos, con tratamiento matemático de datos y con un rendimiento que se aproxime en lo posible al *tiempo real* desborda la capacidad humana de observación y medida directas por un operador y requieren *automatización*. Esto se intentó en un primer momento por medio de sistemas basados en *microscopía óptica*, recurriendo a imágenes en color RGB y/o control de la longitud de onda del rayo incidente (o reflejado) por medio de filtros, midiendo el nivel de gris como *proxy* de la reflectancia. Sin embargo, el rápido desarrollo de aplicaciones automatizadas basadas en microscopía electrónica de barrido combinada con espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (SEM-EDS)<sup>1</sup> hizo posible su comercialización como alternativa a los sistemas ópticos, con una notable implantación de las mismas, aunque sólo en grandes instituciones o corporaciones<sup>2</sup> con fuerte capacidad financiera, para afrontar la alta inversión.

---

<sup>1</sup> Hay, además, una gran variedad de técnicas aplicables. El lector interesado puede encontrar documentación actualizada por expertos e ilustrada con numerosos estudios de caso en: Becker *et al*, (eds., 2016).

<sup>2</sup> En realidad, la demanda de estos sistemas SEM-EDS está limitada por su alto precio y sus exigentes requisitos operacionales, por lo que su cifra total de ventas no supera unos pocos cientos en todo el mundo.

El resultado de esta evolución dista de ser óptimo para el conjunto del sector de los recursos minerales: sólo las organizaciones más fuertes han podido acceder a sistemas de caracterización mineralógica modernos (automatizados), pues los únicos disponibles en el mercado hasta hoy son los basados en sistemas SEM-EDS y éstos, por su precio, no son accesibles a la mayor parte de las compañías (pequeñas y medianas empresas). En consecuencia, éstas se ven obligadas a recurrir a técnicas obsoletas, o en todo caso más lentas y limitadas, como la platina integradora operada manualmente, a enviar las muestras para su análisis en laboratorios externos, con el consiguiente retraso (típicamente 5 semanas) en la recepción de los resultados, que los hace poco útiles, o a trabajar sin la necesaria información mineralógica.

Sin embargo, se dibuja también una perspectiva alentadora. Las numerosas investigaciones realizadas en los últimos años, sobre técnicas y métodos automatizados de microscopía óptica y sus aplicaciones a la mineralogía, indican que esta alternativa es realista y puede concretarse en el diseño de un sistema comercialmente viable. En efecto, los desarrollos debidos a las investigaciones citadas, junto con los progresos recientes en campos como la óptica, la electrónica y la informática, han permitido resolver muchos de los problemas que limitaban la utilidad de los primeros *analizadores de imagen* (*vbgr.* los *Quantimet* o los sucesivos equipos de la serie *QTM* de *Cambridge Instruments* de los años '80 del pasado siglo). No sólo se logra la caracterización de menas a partir de sus espectros visibles (hoy bien documentados en QDF3: Criddle and Stanley, 1993), aplicando métodos informáticos basados en la digitalización de parámetros ópticos para una identificación automatizada (*vbgr.* Bernhardt, 1979 y 1987; Atkin y Harvey, 1979; Kühnel et al, 1980; Gerlitz *et al*, 1989; Shoji y Kaneda, 1994, entre otros; *cf* discusión: Bernhardt, 1990). El reconocimiento mineralógico por visión artificial (Pirard, 2004, -2016; Berrezueta y Castroviejo, 2007; Castroviejo et al. 2009, -2010; Catalina, 2018, - y Castroviejo, 2017, entre muchos otros), es ya una alternativa realista, así como la clasificación textural automatizada (Pérez-Barnuevo, 2014). Una síntesis actualizada y ponderada sobre estos desarrollos es presentada por Pirard (2016).

Llama la atención, no obstante, que este notable desarrollo no haya tenido todavía un reflejo en el mercado, como lo han tenido los sistemas SEM-EDS. Y no es que no existan condiciones objetivas para ello: ya en 1998 advertía Criddle de la urgente necesidad de responder a las demandas de la industria (recursos minerales) aplicando la automatización basada en imágenes digitales de microscopía de menas, que consideraba viable hace más de 20 años, con las innovaciones entonces conocidas en electrónica e informática. Pero los avances en microscopía óptica automatizada no se tradujeron en la producción de equipos acabados que puedan responder (como oferta comercial, *ready-to-use*) a la demanda del mercado. La superación de esta anomalía interesa, a nuestro entender, a todo el sector de los recursos minerales: puesto que existen los conocimientos y las técnicas necesarias para su producción, debería haber salido al mercado un sistema automatizado de alto rendimiento, fiable, competitivo y asequible por su precio a la pequeña / mediana empresa e incluso a las universidades y servicios geológico.

A este objetivo trata de responder el Sistema AMCO<sup>3</sup>, desarrollado por un consorcio europeo con apoyo de *EIT-RawMaterials*, utilizado para la caracterización espectral en el rango VNIR (visible e infrarrojo cercano) de las menas descritas en este texto y aplicado además para obtener una información completa que permite la caracterización automatizada de la mena.

## 2. EL SISTEMA AMCO

La reflectancia de los minerales se ha medido utilizando el prototipo del Sistema AMCO del Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen de la Universidad Politécnica de

---

<sup>3</sup> Comercializado por MULTISPECTRAL MICROSCOPIC TECHNOLOGIES, S.L. ([www.mmt-systems.com](http://www.mmt-systems.com))

Madrid (LMA-UPM), que constituye una herramienta muy adecuada para la determinación cuantitativa de espectros de reflectancia especular.

El Sistema AMCO es un sistema de microscopía multispectral de reflectancia especular que permite adquirir y procesar imágenes compuestas por un cierto número de bandas espectrales que abarcan al menos el visible y el infrarrojo cercano (Visible and Near Infrared, VNIR). Está integrado por un equipo especializado y dos aplicaciones de software específicas.

El equipo consiste en un microscopio de luz incidente totalmente motorizado, que ha sido adaptado para permitir su utilización fuera del espectro visible, y en el que se han montado diversos elementos auxiliares (una rueda de filtros con numerosos filtros de paso de banda, una cámara monocroma con interfaz digital, y una platina XY motorizada de alta precisión), todos ellos conectados al ordenador en el que se ejecuta el software. La Figura 1 muestra una vista esquemática del hardware del sistema, en la que se representan en gris los elementos auxiliares.

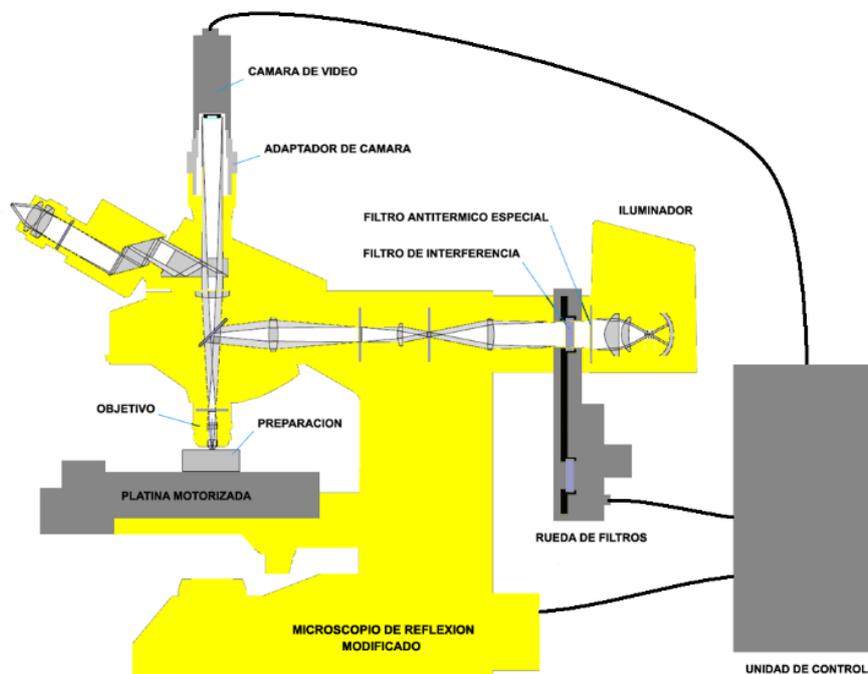


Figura 1 – Esquema del equipo especializado utilizado por el Sistema AMCO

El software del sistema AMCO está constituido por dos aplicaciones independientes:

- *amcoCapture* es el programa que controla todos los elementos del equipo y permite adquirir series de imágenes multispectrales de reflectancia especular de campos de una sección pulida, garantizando la exactitud y reproducibilidad de las medidas de reflectancia y la obtención de un perfecto registro entre todas las bandas. Las imágenes pueden ser capturadas una a una en modo manual, o de forma automática mediante el barrido de la zona indicada por el operador sobre la preparación.
- *amcoAnalysis* es el programa que permite visualizar las imágenes de una serie y realizar sobre ellas los distintos tipos de análisis. El operador puede elegir la imagen que se muestra en pantalla, viendo las distintas bandas o combinaciones lineales de ellas en color verdadero o falso color, ampliarla para examinar detalles, aplicar correcciones de gamma, así como realizar mediciones multispectrales de la reflectancia especular de la muestra sobre zonas delimitadas interactivamente en las imágenes. El mineral correspondiente a cada zona es identificado mediante comparación con una base de

datos de valores multispectrales de reflectancia especular de minerales de interés industrial. El programa permite clasificar automáticamente todos los píxeles de una imagen, obteniendo el análisis modal y el mapa de la distribución de las fases minerales del campo. Igualmente puede procesar automáticamente la totalidad de las imágenes de una serie, obteniendo el análisis modal de toda la muestra. Finalmente, para preparaciones de muestras molidas elaboradas con resina fluorescente, puede realizar análisis granulométricos, así como análisis modales, análisis de liberación (por superficie expuesta y por composición) y análisis de composición de las partículas, todos ellos por fracciones granulométricas.

El prototipo básico del Sistema AMCO está basado en un microscopio óptico Leica DM6000 M, y permite adquirir imágenes multispectrales compuestas por hasta 20 bandas de reflectancia en el rango VNIR (de 370 nm a 1000 nm) más una banda de fluorescencia opcional. La versión avanzada del prototipo (Figura 2) incorpora una cámara adicional sensible al infrarrojo de onda corta (Short-Wave Infrared, SWIR) y una segunda rueda de filtros que permiten adquirir hasta 12 bandas adicionales de reflectancia en el rango SWIR, entre 1050 nm y 1700 nm, aunque con una resolución inferior.

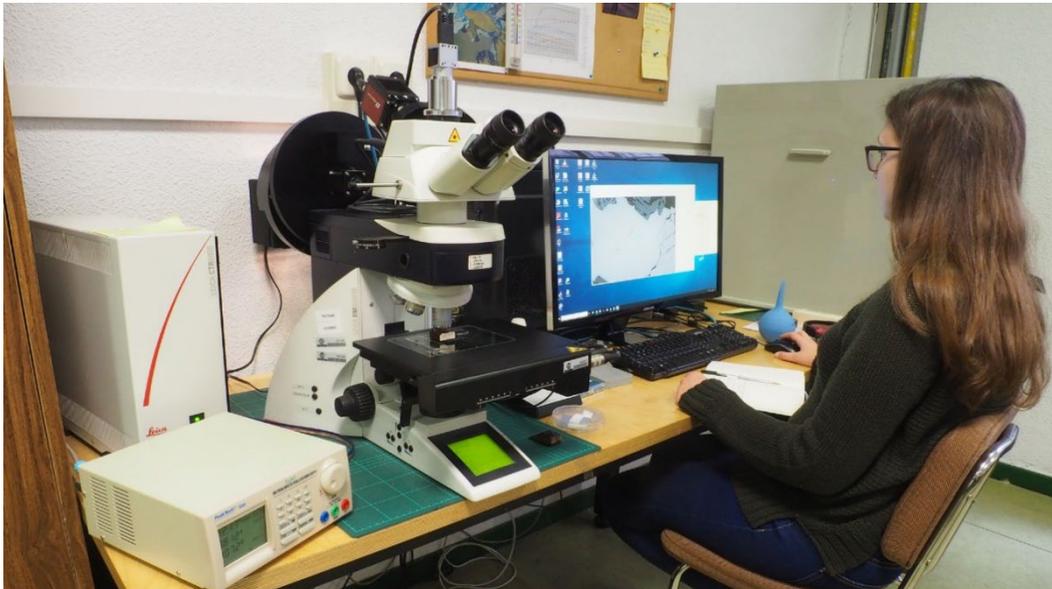


Figura 2 – Aspecto del prototipo de Sistema AMCO del Laboratorio de Microscopía Aplicada de la UPM

El Sistema AMCO se concibió específicamente para realizar la caracterización microscópica automatizada de secciones pulidas de menas metálicas. Fue desarrollado en el proyecto AMCO (*Automated Microscopic Characterization of Ores*) (2016-2018), un proyecto de I+D de tipo *upscaling* financiado por EIT RawMaterials (Proyecto EIT no. 15039) en el marco del programa Horizonte 2020 de la UE. Dicho proyecto fue ejecutado por un consorcio liderado por la UPM, con la participación de Université de Liège (Bélgica), Cobre Las Cruces (España), KGHM Polska Miedz (Polonia) y ThinSectionLab (Francia). Su precursor inmediato fue el sistema CAMEVA, desarrollado por la UPM en colaboración con AITEMIN en el proyecto CGL2006-13688-C02-01/02 (2007-2009) del Plan Nacional de I+D+i (Castroviejo et al., 2009).

El desarrollo del Sistema AMCO se planteó con los siguientes objetivos:

- i. Lograr la identificación automatizada 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, 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 recurso esencial para la identificación, una base de datos multiespectral que cubra al menos el rango VNIR (visible e infrarrojo cercano, entre 400 nm y 1000 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 permitir el desarrollo de 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, útil también para docencia universitaria y para LLE (life-long education) industrial, que facilite el aprendizaje de la microscopía de menas.
- vi. Realizar una validación del sistema mediante datos externos procedentes de otros sistemas de análisis, análisis estadísticos y ensayos de problemas reales.
- vii. Desarrollar un prototipo apto para su comercialización con TRL (Technology Readiness Level) 7-8.

Dichos objetivos fueron alcanzados en su mayor parte durante la ejecución del proyecto, y se completaron en los años posteriores.

En la actualidad se dispone de un sistema para la caracterización microscópica automatizada de muestras de menas metálicas que puede ser utilizado en un laboratorio industrial sin necesidad de contar con un experto en microscopía de menas. Para el análisis de partículas de muestras molidas es necesario usar láminas delgadas pulidas elaboradas con resina fluorescente según un procedimiento específico (Grunwald-Romera et al., 2019) desarrollado por el LMA-UPM.

### 3. METODOLOGÍA

El Sistema AMCO constituye una avanzada herramienta que resulta especialmente indicada para la determinación cuantitativa de espectros de reflectancia especular de minerales en el rango VNIR (o VNIR+SWIR).

El procedimiento de medida consta de dos fases:

- en la primera, se usa el programa *amcoCapture* para adquirir y grabar en disco una serie de imágenes de una sección pulida (normalmente, un bloque o una lámina delgada).
- en la segunda, se usa el programa *amcoAnalysis* para procesar la serie de imágenes y extraer la información deseada.

El motivo de separar ambas fases es que la adquisición de imágenes requiere el uso exclusivo del microscopio y dura mucho más tiempo que el análisis, aunque sólo debe realizarse una vez, mientras que el análisis de una serie de imágenes suele ser un proceso iterativo, en el que se van definiendo los minerales considerados y se van usando parámetros cada vez más afinados.

Otra ventaja derivada de esta separación es que permite que múltiples instancias del programa de análisis puedan ejecutarse simultáneamente, al no hacer uso del microscopio. De esta forma es posible procesar varias muestras en paralelo, incluso en otros ordenadores.

### 4. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

El programa *amcoCapture* es la aplicación desarrollada específicamente para controlar el microscopio y sus elementos auxiliares y adquirir imágenes multiespectrales de reflectancia especular de campos de una sección pulida, garantizando la exactitud y reproducibilidad de las medidas de reflectancia y la obtención de un perfecto registro entre las diferentes bandas. Para ello se vale de unos procedimientos de calibración mediante dos patrones de reflectancia especular y un patrón geométrico que fueron objeto de una patente.

El programa puede operar tanto en modo manual, como en modo automático. En el primer caso, el operador recorre la preparación a voluntad accionando manualmente los controles de la platina motorizada, buscando áreas de interés y capturando, una a una, imágenes del campo microscópico en los lugares deseados (Figura 3).

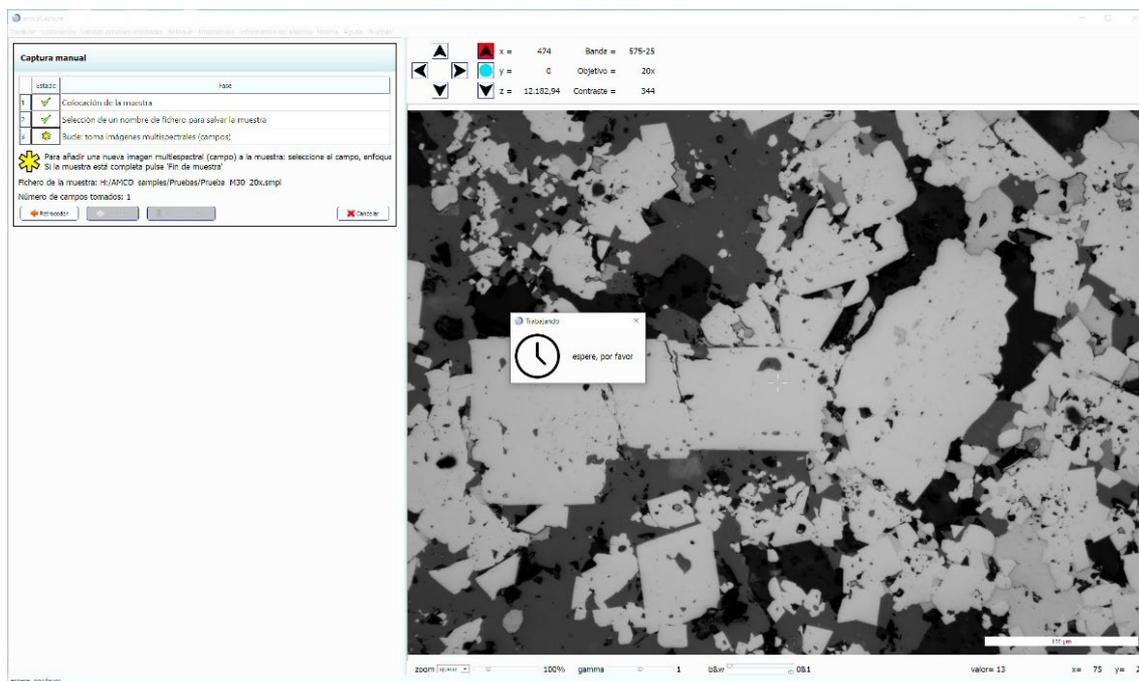


Figura 3 - Programa *amcoCapture* durante la adquisición manual de imágenes de un bloque pulido.

En el segundo caso, el operador fija los parámetros del barrido, que incluyen el porcentaje de cobertura o el paso en X y en Y, los puntos inicial y final del área que se desea barrer, y realiza el enfoque de varios campos repartidos por dicha área, y a continuación el programa realiza automáticamente el barrido indicado (Figura 4).

En ambos casos, el operador debe seleccionar una ruta de disco e introducir un nombre para la serie de imágenes, que se guardará en el lugar indicado en una carpeta con dicho nombre.

El programa *amcoCapture* permite así obtener imágenes multiespectrales en las que el nivel de gris de un píxel en una de las bandas equivale –multiplicado por un factor de conversión prefijado– al valor de la reflectancia especular del punto correspondiente de la sección pulida, promediado en el rango espectral de dicha banda.

Una adecuada calibración del sistema de adquisición (que tiene en cuenta conjuntamente iluminación, filtros, lentes y cámara) con dos patrones de reflectancia especular, uno de alta reflectancia ( $\approx 90\%$ ) y otro de baja ( $\approx 4,5\%$ ), permite garantizar la exactitud y repetibilidad de la medida y, por tanto, su reproducibilidad en distintos laboratorios (Catalina y Castroviejo, 2017).

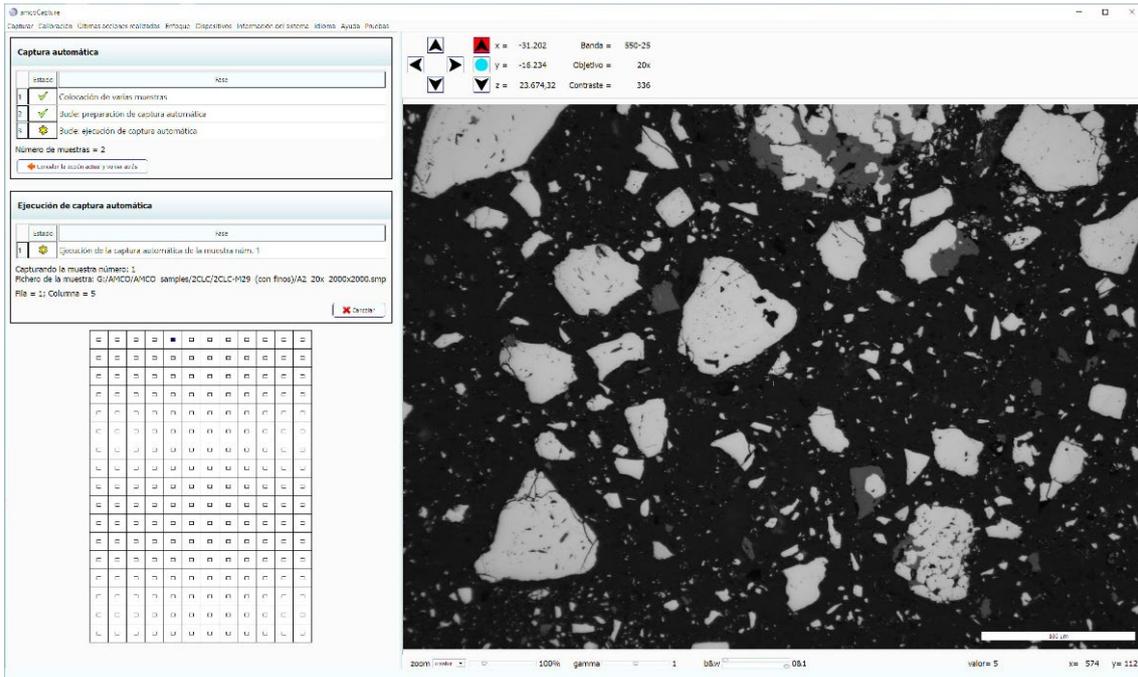


Figura 4 – Programa *amcoCapture* durante un barrido automático de 12x17 campos sobre una lámina delgada. El uso de un objetivo 20x y un paso de 2000 x 2000  $\mu\text{m}$  proporcionan una cobertura efectiva del 4,7% del área.

El programa incorpora un procedimiento específico para comprobar si el sistema se encuentra correctamente calibrado (Figura 5), mediante la adquisición de una imagen multispectral del patrón de alta reflectancia y la comparación del valor de reflectancia promedio de cada banda con el correspondiente valor de reflectancia nominal del patrón. Si el valor absoluto de la diferencia en alguna banda supera un umbral (típicamente el 1%), el programa destaca la discrepancia con colores (en azul, para diferencias positivas y en rojo, para diferencias negativas), lo que indica al operador que debe recalibrar el sistema.

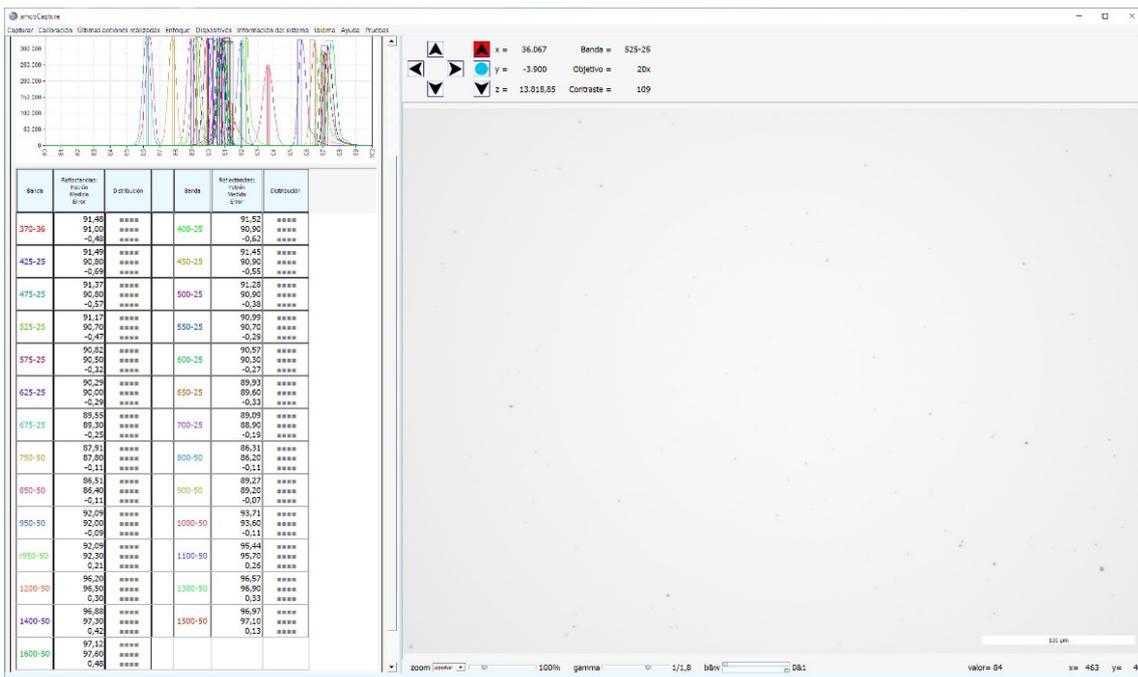


Figura 5 – Programa *amcoCapture* durante la comprobación de la calibración del sistema de adquisición.

Otra característica esencial del programa *amcoCapture* es su capacidad para compensar la aberración cromática que presentan las lentes del microscopio al trabajar fuera del espectro visible, aplicando un ajuste de enfoque y una corrección geométrica específicos a cada una de las bandas, lo que permite obtener un perfecto registro entre ellas. Para ello se efectúa una calibración geométrica del sistema de adquisición con un patrón geométrico adecuado.

De esta forma, para conseguir un correcto enfoque de todas las bandas de una imagen no es necesario enfocar -manual o automáticamente- cada banda por separado, sino que basta con enfocar una banda cualquiera y, para las demás, sumar a la posición en Z obtenida el ajuste correspondiente a la disparidad de enfoque entre las bandas, que se muestra en la Figura 6.

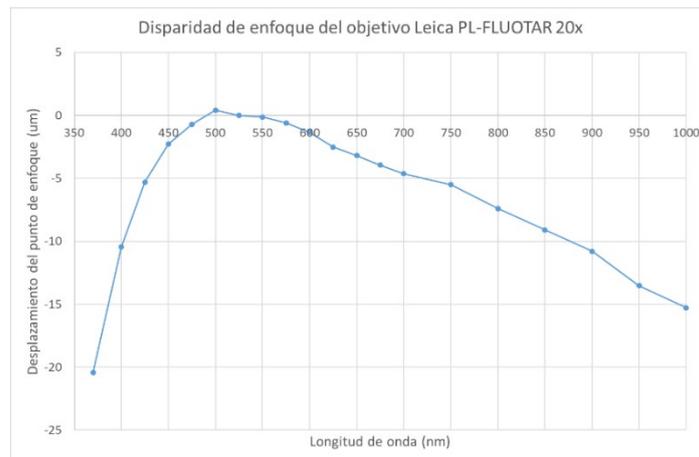


Figura 6 – Curva que muestra la disparidad de enfoque entre las distintas bandas para un objetivo dado.

La Figura 7 muestra el proceso de enfoque automático en la banda de referencia, que habitualmente es la de 525 nm, por ser la que presenta la máxima definición.

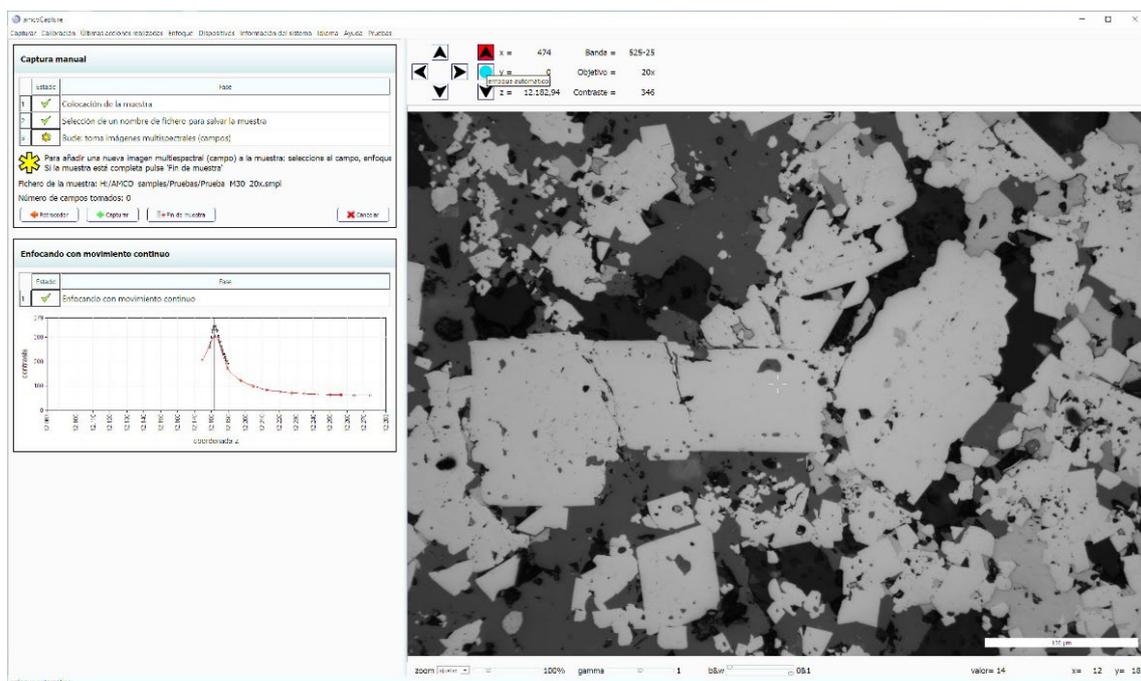


Figura 7 – El autoenfoco se realiza en dos etapas: primero se realiza un recorrido rápido en un entorno amplio de la Z de la posición inicial, y luego un recorrido lento en el entorno próximo de la Z de máximo contraste.

La calibración del sistema es específica de cada objetivo, por lo que debe realizarse con cada uno de los objetivos con los que se vaya a adquirir imágenes (no es necesaria si el objetivo sólo se usa para inspección visual de la preparación). La secuencia normal del proceso de calibración completo para un nuevo objetivo consta de las siguientes operaciones:

- i. Medida de disparidades de enfoque entre las distintas bandas. El enfoque de cada banda puede hacerse de forma automática o manual. Es conveniente usar una sección muy bien pulida y que presente mucho contraste en todas las bandas.
- ii. Cálculo de tiempos de exposición óptimos. Cada banda precisa un tiempo de exposición diferente, debido a que la intensidad de la iluminación, la transmisividad de los filtros de paso de banda, la sensibilidad de la cámara y la reflectancia de los patrones dependen de la longitud de onda.
- iii. Captura del patrón claro. Se realiza un barrido sobre el patrón de alta reflectancia, y se calcula la imagen promedio después de descartar los defectos superficiales del patrón.
- iv. Captura del patrón oscuro. Se realiza un barrido sobre el patrón de baja reflectancia, y se calcula la imagen promedio después de descartar los defectos superficiales.
- v. Calibración geométrica. Se usa como patrón geométrico una lámina de vidrio con una disposición bidimensional de círculos reflectantes, cuyo diámetro y separación están calibrados.
- vi. Medición del ángulo de rotación de las cámaras. Se usa también el patrón geométrico, tomando como referencia angular el eje X de la platina.

No obstante, cuando el sistema pierda la calibración por envejecimiento de la lámpara halógena durante su uso normal, basta con realizar la operación iii para recalibrarlo. Únicamente en el caso de que la deriva sea importante, habrá que realizar las operaciones ii, iii y iv, en ese orden.

Gracias a estos procedimientos de calibración, el Sistema AMCO permite adquirir imágenes multiespectrales de 16 bits por banda que proporcionan una aproximación muy precisa al espectro de reflectancia especular en el rango VNIR (o VNIR+SWIR) del punto de la sección pulida correspondiente a cada uno de los píxeles de una imagen, lo que hace posible la identificación de los minerales presentes en ella con un grado de confianza muy superior al obtenido por los procedimientos de análisis de imagen clásicos, basados en el uso de imágenes en color RGB de ocho bits por banda.

## 5. ANÁLISIS DE IMÁGENES

El programa *amcoAnalysis* ha sido desarrollado específicamente para visualizar y procesar una serie de imágenes multiespectrales de reflectancia especular adquirida con el programa *amcoCapture*, y efectuar distintos tipos de análisis y medidas sobre ella.

Una vez abierta la serie de imágenes elegida, en la parte superior izquierda de la ventana se muestra una representación gráfica de la serie como una matriz de celdas, que permite al operador seleccionar directamente con el ratón la imagen que desea ver (Figura 8). En barridos automáticos con cobertura inferior al 100%, dentro de cada celda se muestra un rectángulo, que representa a escala real el campo microscópico cubierto por cada imagen (Figura 11). En el caso de tomas manuales, no procedentes de un barrido automatizado, la serie de imágenes se representa simplemente como una tira horizontal de celdas.

El operador puede cambiar a voluntad el modo de visualización de la imagen, eligiendo entre cualquier banda de la imagen multiespectral, vistas especiales en color verdadero o falso color, o incluso el resultado de la clasificación. También puede ampliar la imagen para observar detalles, ajustar la gamma y modificar los niveles de negro y de blanco.

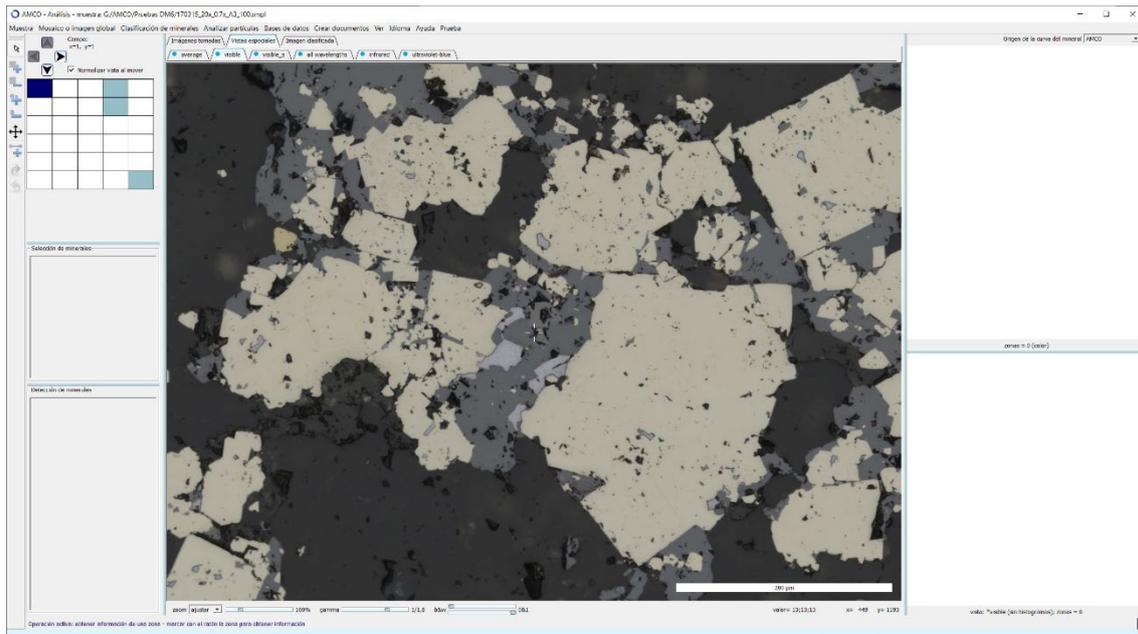


Figura 8 – Programa *amcoAnalysis* tras abrir la serie de imágenes de un barrido de 5x6 campos de un bloque. Vista especial en color verdadero del campo (1,1)

Si la serie de imágenes corresponde a una muestra de mineral molido preparada con resina fluorescente según el procedimiento específico desarrollado por el LMA-UPM, la primera vez que se abre la serie hay que fijar el umbral general de binarización de la banda de fluorescencia, para que la resina sea discriminada correctamente. Para ello resulta conveniente calcular antes el histograma acumulado de la banda de fluorescencia de toda la serie, tras lo cual resulta fácil determinar un umbral idóneo, normalmente en un valor próximo a la antimoda que separa el agudo pico correspondiente a los granos de mineral (no fluorescentes) del pico más extendido correspondiente a la resina (fluorescente). En la Figura 9 puede observarse que el umbral de binarización se ha fijado en el valor correspondiente al 12% del fondo de escala de la banda de fluorescencia.

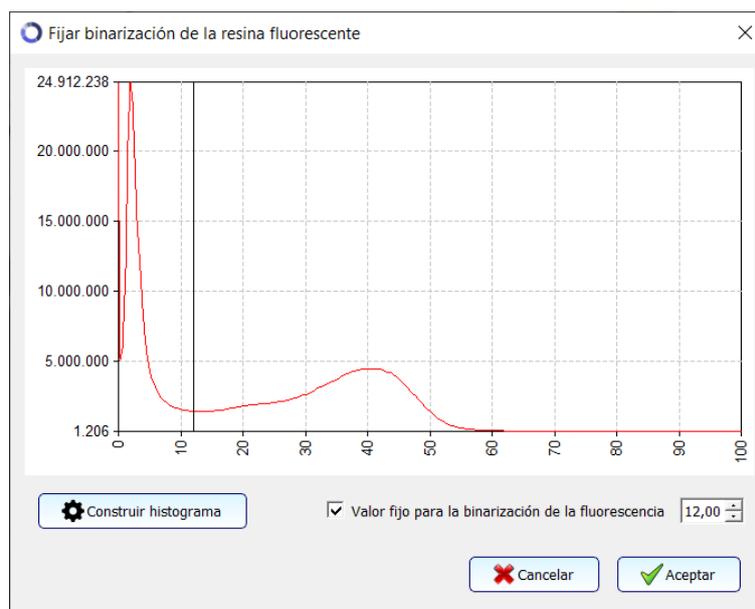


Figura 8 – Histograma acumulado de la banda de fluorescencia de una serie de imágenes

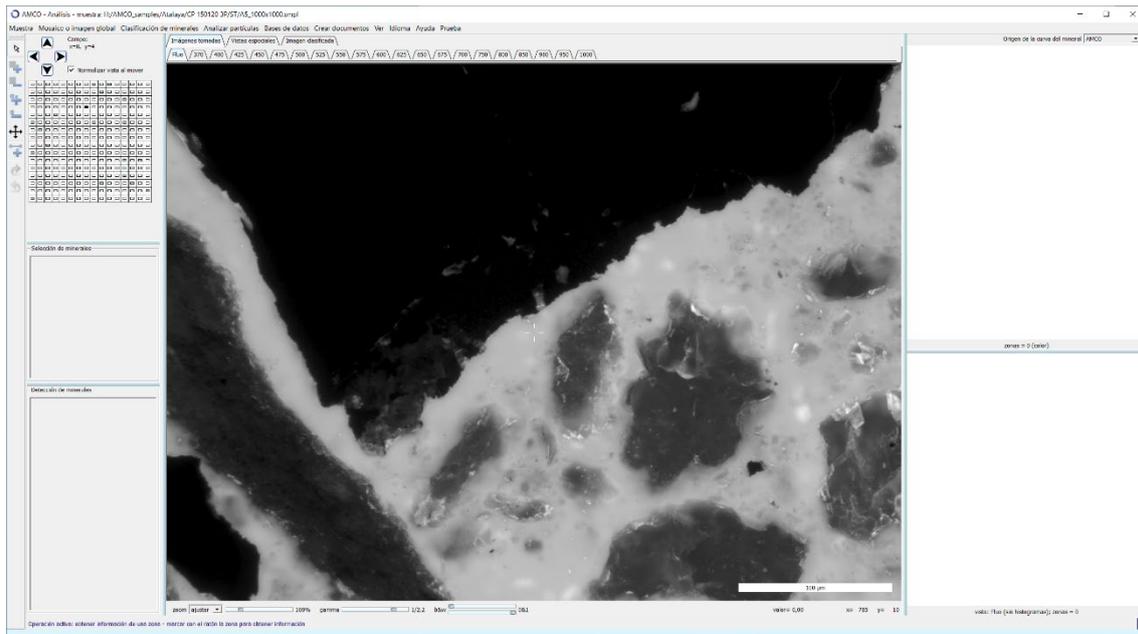


Figura 9 – Banda de fluorescencia de un campo de una lámina delgada pulida elaborada con resina fluorescente

La binarización de la banda de fluorescencia (Figura 10) al valor de umbral fijado por el operador genera automáticamente una máscara para las zonas ocupadas por la resina, que a su vez delimita eficazmente el contorno de las partículas, tanto si están constituidas por minerales opacos como si son de ganga o mixtas. La Figura 11 muestra una vista en color verdadero del mismo campo que la Figura 10. En ella se representa en color azul intenso la máscara para resina obtenida tras fijar el valor de umbral para la banda de fluorescencia. Esta máscara define nítidamente el contorno de las distintas partículas minerales que aparecen en la imagen, incluso cuando están constituidas por minerales de ganga, que presentan espectros de reflectancia muy similares al de la resina, como ocurre con las partículas situadas en la parte inferior de la imagen.

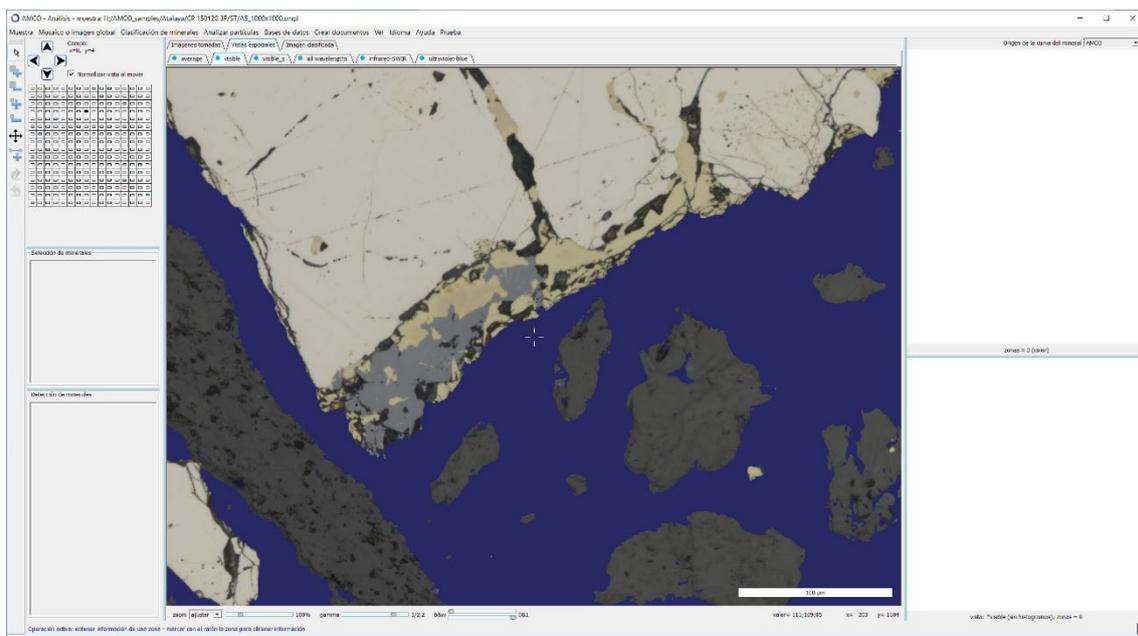


Figura 10 – Vista en color verdadero del campo mostrado en la Figura 9 tras fijar el valor de umbral para la máscara de resina

La máscara de la resina permite descartar automáticamente los píxeles de las zonas de resina al realizar el análisis modal de una muestra, y facilita la segmentación de las partículas de mineral de cara a los distintos análisis de caracterización basados en la medición del tamaño de las partículas.

El programa *amcoAnalysis* incorpora una base de datos de reflectancia especular multiespectral en el rango VNIR de las principales menas metálicas de interés industrial, así como de los minerales accesorios más frecuentes asociados a ellas ( $\approx 100$  minerales, en total). Esta base de datos es utilizada por el programa para identificar la especie mineral a la que corresponde el espectro de un píxel o de una zona. No obstante, la lista de minerales contemplados puede ser ampliada por los propios usuarios, mediante la definición de nuevas especies minerales en una base de datos auxiliar personalizada que se gestiona desde el propio programa *amcoAnalysis*.

Al abrir una serie de imágenes nueva, el operador debe seleccionar los minerales que se van a tener en cuenta en la clasificación, ya que por razones de precisión y eficacia es mejor restringir las opciones consideradas por el programa a los minerales que pueden realmente existir en la muestra. El fondo de la Figura 12 muestra un ejemplo de la ventana de selección de minerales, en la que se enumeran alfabéticamente los minerales incluidos en la base de datos principal junto con los incluidos en la base de datos auxiliar.

La ventana incorpora una ayuda para la selección de minerales cuando de una muestra sólo se conoce su origen. Si el operador elige en un menú desplegable el tipo de yacimiento del que procede (Figura 12), el programa puede marcar automáticamente los minerales susceptibles de aparecer en la muestra, lo cual suele constituir un muy buen punto de partida para el análisis. La lista de minerales seleccionados en cada serie se almacena en disco, por lo que se conserva de una vez a otra cuando se abre la serie.

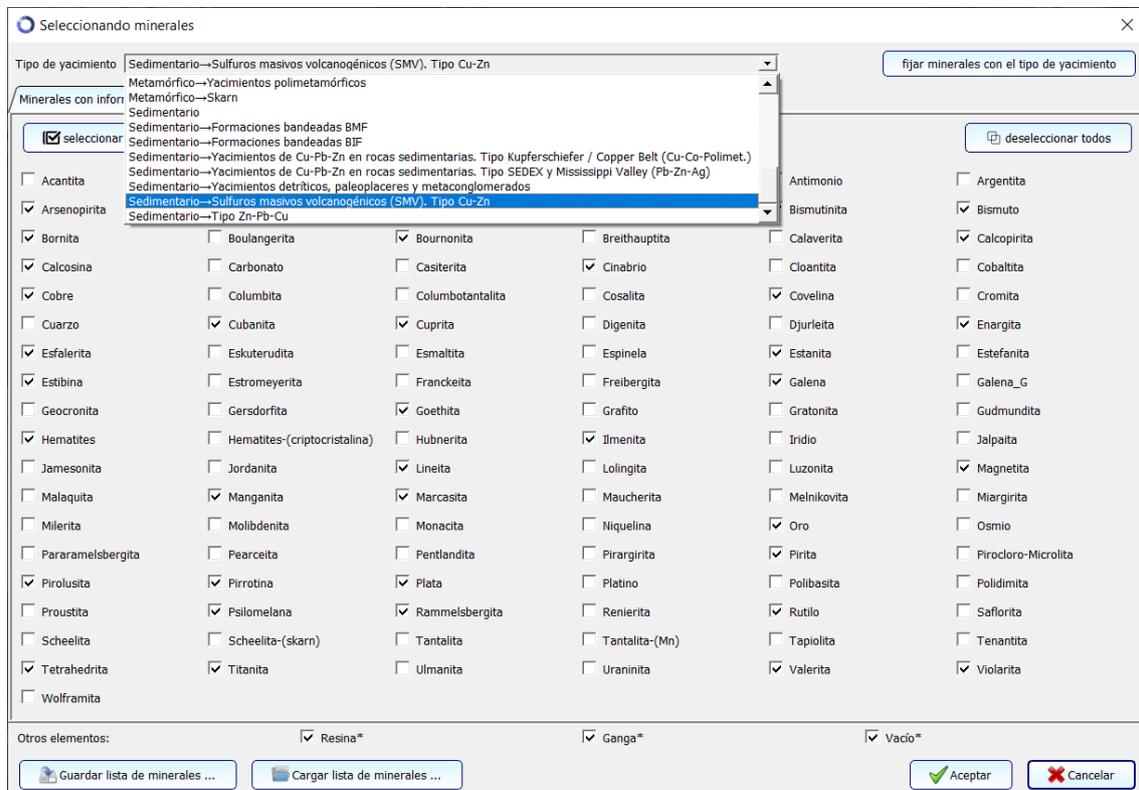


Figura 11 – Ventana de selección de minerales del programa *amcoAnalysis*.  
En el menú desplegable se está eligiendo el tipo de yacimiento del que procede la muestra.

El programa *amcoAnalysis* brinda numerosas posibilidades a la hora de abordar el estudio de una muestra, desde las puramente manuales hasta las totalmente automatizadas.

En **modo manual**, el programa permite que el operador delimite interactivamente diversas zonas poligonales (Figura 13) sobre una imagen. Los contornos de las zonas se dibujan en colores vivos, para facilitar su localización sobre la imagen. El programa presenta los siguientes tipos de información acerca de estas zonas:

- i. Espectro de reflectancia especular de cada zona (en realidad se traza una curva que pasa por los puntos correspondientes a la media o la moda de los valores de reflectancia especular de todos los píxeles de la zona). En la esquina superior derecha se muestra un gráfico con los espectros de las zonas marcadas. Cada uno se dibuja en el mismo color que el contorno de su zona. El programa permite exportar el gráfico con los espectros como un archivo de imagen (Figura 14), para facilitar su inclusión en informes.

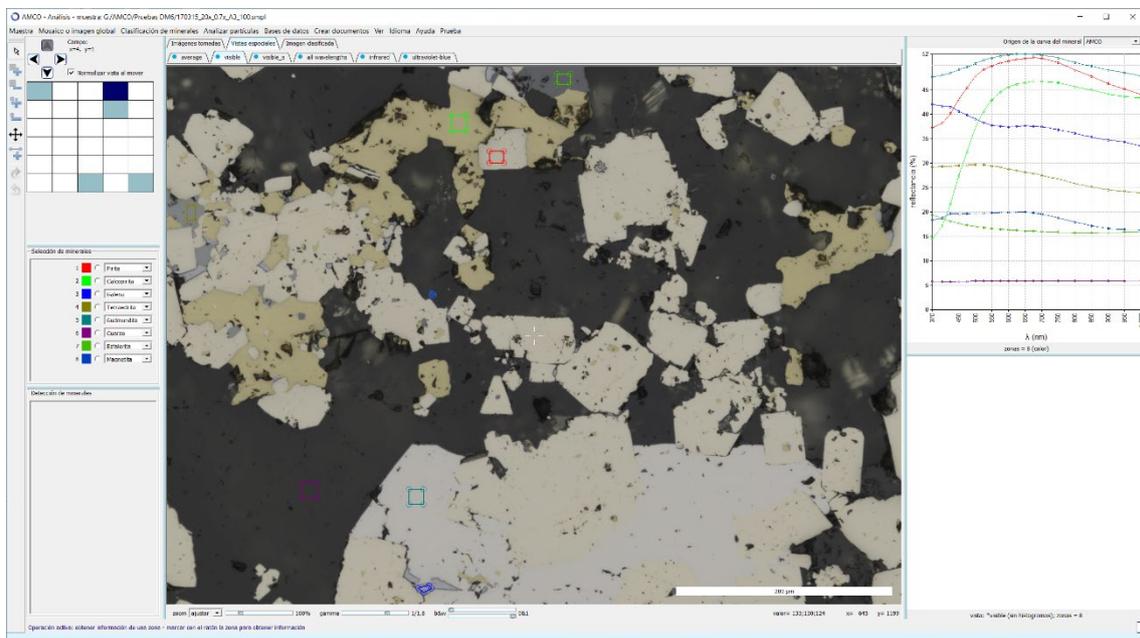


Figura 12 – Programa *amcoAnalysis* mostrando (esq. sup. dcha.) los espectros de reflectancia especular de las zonas marcadas sobre la imagen del campo (4,1) del barrido del bloque pulido de la Figura 8.

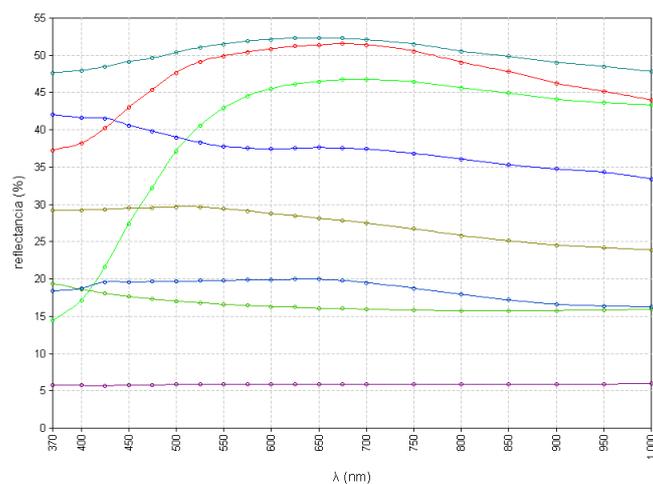
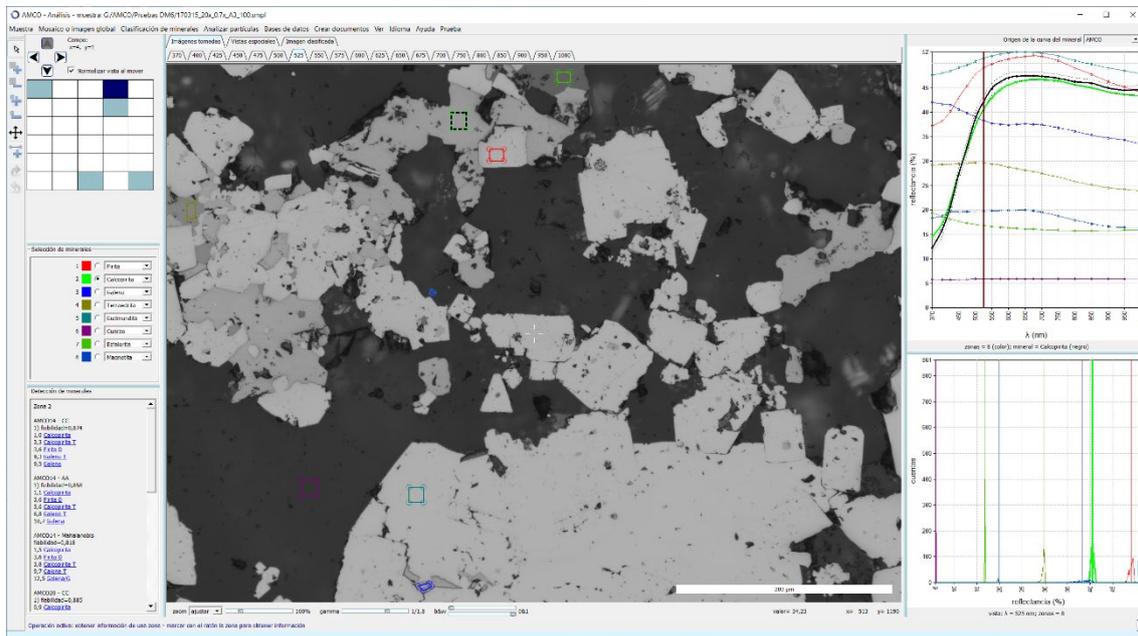
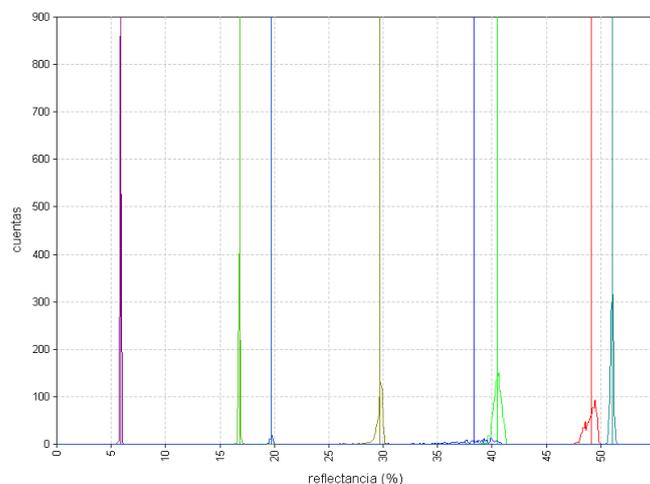


Figura 13 – Espectros de reflectancia especular las zonas marcadas en la imagen de la Figura 13. El color de cada curva coincide con el color del contorno de la zona correspondiente.

- ii. Listas de los minerales de la base de datos cuyo espectro se asemeja más (según distintos criterios) al espectro de la zona marcada activa, ordenados de menor a mayor distancia (de mayor a menor probabilidad). Estas listas se muestran en la esquina inferior izquierda de la ventana (Figura 15).
- iii. Espectro del mineral de la base de datos asignado por el operador a la zona activa. Se dibuja en color negro en el gráfico de espectros (esquina superior derecha, Figura 15), para poder compararlo con el espectro de la zona.
- iv. Histograma de reflectancia especular de cada zona. Cuando se visualiza una banda de la imagen multispectral, en la esquina inferior derecha (Figura 15) se muestra un gráfico con los histogramas de las zonas marcadas para esa banda. Cada uno se dibuja en el mismo color que el contorno de su zona. El programa permite exportar el gráfico con los histogramas como un archivo de imagen (Figura 16).



**Figura 14 – Al seleccionar una zona marcada, se listan (esq. inf. izq.) los minerales más probables para dicha zona. Si el operador la asigna a un mineral, se muestra en color negro (esq. sup. dcha.) el espectro del mineral. Si se visualiza una banda, se muestran (esq. inf. dcha.) los histogramas de cada zona para dicha banda.**



**Figura 15 – Histogramas de reflectancia especular de las zonas marcadas en la imagen de la Figura 14. El color de cada histograma coincide con el color del contorno de la zona correspondiente.**

- v. Se generan automáticamente archivos de texto con los valores de reflectancia especular de los píxeles de las zonas marcadas sobre una imagen (Figura 17). Estos archivos son usados por la base de datos de zonas.

#zone	mineral	row	column	370	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	750	800	850	900	950	1000
1	Pyrite	189	715	36.92	37.70	39.45	42.04	44.09	46.29	47.79	48.67	49.21	49.61	50.08	50.18	50.32	50.15	49.40	47.99	46.85	45.56	44.37	43.48
1	Pyrite	189	716	36.95	37.89	39.53	42.21	44.20	46.41	47.88	48.72	49.39	49.78	50.05	50.29	50.40	50.34	49.45	48.15	46.97	45.42	44.44	43.46
1	Pyrite	189	717	36.90	37.92	39.54	42.21	44.49	46.64	47.84	48.66	49.36	49.81	50.24	50.30	50.46	50.28	49.45	48.10	47.03	45.41	44.54	43.52
1	Pyrite	189	718	36.92	37.92	39.72	42.27	44.53	46.60	48.17	48.94	49.52	49.85	50.24	50.35	50.57	50.43	49.62	48.26	47.00	45.58	44.55	43.62
1	Pyrite	189	719	37.36	38.03	39.77	42.32	44.49	46.69	48.24	49.03	49.58	49.93	50.40	50.45	50.69	50.62	49.77	48.30	46.98	45.60	44.50	43.51
1	Pyrite	189	720	37.03	37.94	39.70	42.44	44.71	46.96	48.46	49.10	49.84	50.31	50.44	50.65	50.99	50.75	49.86	48.34	46.98	45.58	44.35	43.43
1	Pyrite	189	721	36.99	37.95	39.67	42.30	44.78	46.95	48.39	49.05	49.74	50.38	50.64	50.86	50.94	50.76	50.12	48.41	47.20	45.74	44.21	43.42
1	Pyrite	189	722	37.10	37.95	39.67	42.32	44.54	46.87	48.28	49.29	49.87	50.29	50.55	50.85	50.94	50.81	50.14	48.46	47.37	45.84	44.39	43.47
1	Pyrite	189	723	37.01	37.89	39.64	42.33	44.50	46.92	48.31	49.28	49.81	50.19	50.57	50.83	50.88	50.77	50.12	48.53	47.45	45.77	44.53	43.53
1	Pyrite	189	724	36.87	37.81	39.57	42.46	44.60	46.81	48.46	49.35	49.85	50.30	50.58	50.91	51.06	50.89	50.16	48.62	47.47	46.03	44.81	43.67
1	Pyrite	189	725	36.89	37.92	39.72	42.32	44.69	46.89	48.29	49.32	49.84	50.30	50.76	50.90	51.08	50.97	50.19	48.58	47.41	45.91	44.88	43.76
1	Pyrite	189	726	36.85	37.94	39.65	42.40	44.56	47.09	48.52	49.34	49.94	50.42	50.77	50.91	51.07	51.02	50.10	48.82	47.52	45.94	44.88	43.84
1	Pyrite	189	727	37.02	37.92	39.99	42.44	44.88	47.05	48.72	49.33	50.23	50.47	50.84	51.03	51.18	51.01	50.23	48.95	47.53	46.07	44.91	43.94
1	Pyrite	189	728	36.94	37.94	39.85	42.66	45.07	47.22	48.85	49.77	50.28	50.57	51.11	51.09	51.39	51.16	50.54	48.98	47.60	46.30	45.09	44.08
1	Pyrite	189	729	37.14	38.04	39.96	42.60	45.09	47.40	48.98	49.65	50.23	50.60	51.08	51.18	51.45	51.39	50.62	49.14	47.86	46.35	45.23	44.05
1	Pyrite	189	730	37.27	38.19	40.03	42.55	44.95	47.24	48.82	49.67	50.14	50.73	51.07	51.18	51.53	51.30	50.60	49.08	47.81	46.36	45.09	44.06
1	Pyrite	189	731	37.21	38.19	40.02	42.71	44.89	47.23	48.73	49.68	50.24	50.71	51.10	51.23	51.51	51.25	50.47	49.01	47.72	46.34	45.14	44.12
1	Pyrite	189	732	37.27	38.16	40.17	42.85	44.99	47.40	48.61	49.57	50.11	50.75	50.99	51.17	51.30	51.23	50.55	48.96	47.76	46.25	45.25	44.10
1	Pyrite	189	733	37.28	38.24	40.15	42.83	44.94	47.43	48.81	49.68	50.32	50.56	50.93	51.13	51.37	51.22	50.42	48.76	47.79	46.45	45.15	44.16

Figura 16 – Archivo de texto con los valores de reflectancia especular de los píxeles de las zonas marcadas sobre una imagen.

Las zonas delimitadas por el operador pueden ser etiquetadas por éste según su naturaleza y características, y pasan automáticamente a formar parte de la base de datos de zonas, que permite localizar fácilmente y gestionar zonas de cualquier mineral (Figura 18).

Para ampliar la lista de minerales considerados en la clasificación, el operador sólo tiene que definir los nuevos minerales, marcar las zonas para aprender e incluirlos en la base de datos personalizada.

muestra	x	y	zona	mineral	para aprender	filtrar puntos	suavizar	anomalia	calidad	comentario	archivo
CR283_M1	8	1	10	Pirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	8	1	11	Pirita	sí	no	no	no			D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	8	1	12	Pirita	sí	no	no	no			D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	9	1	1	Calcopirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	9	1	2	Calcopirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	9	1	3	Calcopirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	9	1	4	Calcopirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1
CR283_M1	9	1	5	Calcopirita	sí	no	no	no	buena		D:/Compartido/AMCO_menas/CR283/M1.smp1

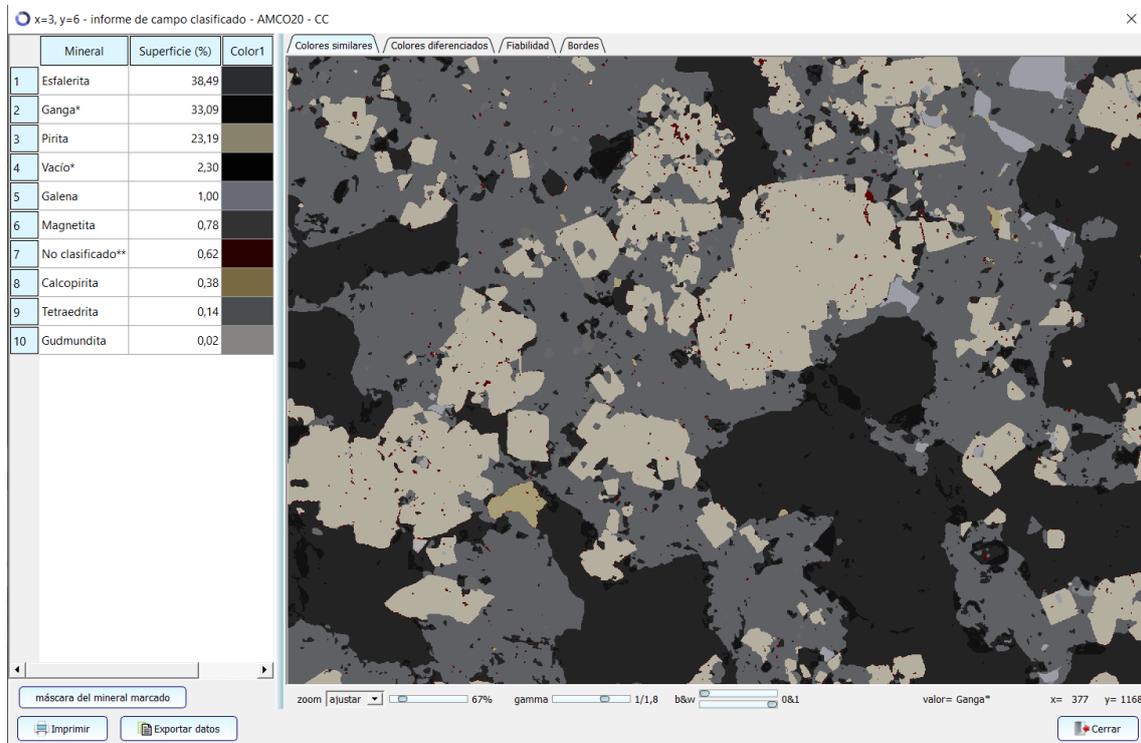
Figura 17 – Ventana de la base de datos que gestiona las zonas delimitadas por el operador en sus muestras

Los valores de reflectancia especular de los píxeles de una selección de zonas y minerales de la base de datos pueden ser volcados en archivos de texto para su tratamiento estadístico. Así se obtuvieron los datos de partida para el estudio de técnicas de clasificación recogido en López-Benito et al. (2017).

El procesamiento de dichos archivos ha permitido también determinar para cada mineral los espectros correspondientes a la media, la desviación, el mínimo, el máximo y los diversos percentiles representados en la hoja de cálculo que recoge los valores de reflectancia especular VNIR de los minerales de la base de datos del sistema AMCO, y que ha permitido generar los gráficos de espectros VNIR incluidos en este libro.

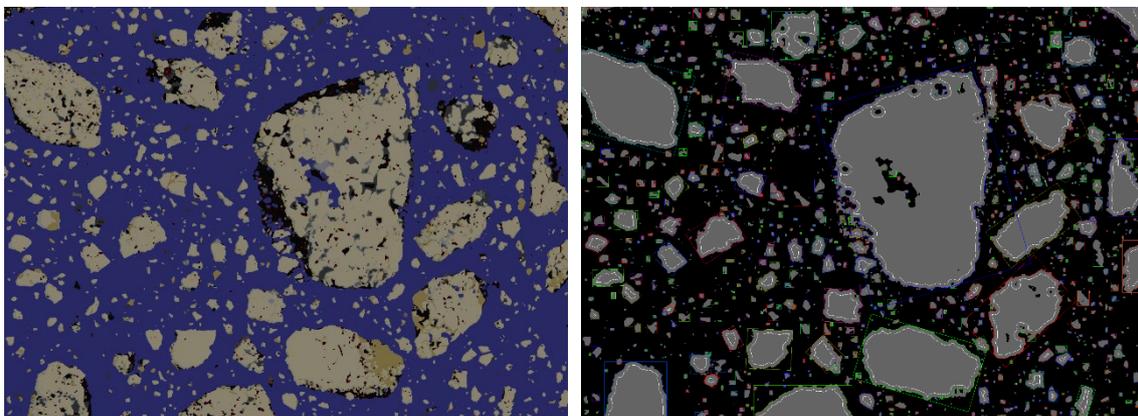
En **modo automático**, el programa *amcoAnalysis* permite procesar la totalidad de los píxeles de la imagen del campo actualmente seleccionado, realizando los siguientes tipos de análisis:

- i. **Clasificación de minerales en el campo actual.** Se obtiene el análisis modal (en % en volumen) del campo y una imagen con la distribución de las distintas fases minerales en el campo (Figura 19).



**Figura 18 – Resultado de la clasificación del campo (3, 6) del barrido del bloque pulido de la Figura 8: Análisis modal en % en volumen (izda.) e imagen clasificada (dcha.)**

- ii. **Analizar partículas en el campo actual.** Si la imagen proviene de una preparación de mineral molido elaborada con resina fluorescente según el procedimiento específico desarrollado en el LMA-UPM, y se adquirió la banda de fluorescencia, se realizan (Figura 20 los análisis seleccionados en la ventana de configuración de análisis de partículas. No obstante, al procesar una sola imagen sólo tienen algo de sentido el análisis granulométrico y el análisis modal por intervalos de tamaño.



**Figura 19 – Análisis de partículas sobre una imagen de una lámina delgada preparada con resina fluorescente**

Igualmente, el programa *amcoAnalysis* permite procesar conjuntamente todas las imágenes de la serie, realizando los siguientes tipos de análisis:

- i. **Clasificación de minerales en toda la muestra.** Se clasifican todos los píxeles de todas las imágenes de una serie, obteniendo una imagen de cada campo con la distribución de las distintas fases minerales, así como el análisis modal general de la muestra, que cuantifica la proporción relativa (tanto en % en volumen, como en % en peso) de cada una de las especies minerales consideradas en la clasificación (Figura 21). Los píxeles asignados a resina no se contabilizan al agregar los resultados de la serie. Los píxeles clasificados como “Vacío” o “No clasificado” aparecen en el análisis modal expresado en % en volumen, pero se descuentan al calcular el análisis modal expresado en % en peso.

Mineral	Volumen (%)
1 Ganga*	46,59
2 Pirita	28,59
3 Esfalerita	15,61
4 Vacío*	3,51
5 Calcopirita	2,45
6 No clasificado**	1,03
7 Gudmundita	0,80
8 Galena	0,58
9 Magnetita	0,56
10 Tetrahedrita	0,29

Mineral	Peso (%)
1 Pirita	40,18
2 Ganga*	35,29
3 Esfalerita	17,74
4 Calcopirita	2,89
5 Gudmundita	1,50
6 Galena	1,20
7 Magnetita	0,81
8 Tetrahedrita	0,40

Figura 20 – Resultados del análisis modal del barrido del bloque pulido de la Figura 8

- ii. **Analizar partículas en toda la muestra.** Si la serie proviene de una lámina delgada pulida elaborada a partir de una muestra de mineral molido según el procedimiento específico desarrollado por el LMA-UPM y ha sido adquirida incluyendo la banda de fluorescencia, se realizan los análisis indicados en la ventana de configuración de análisis de partículas. Los análisis actualmente disponibles son:
  - a. Análisis granulométrico de la muestra, expresado como % en peso para cada intervalo de tamaño. Se muestran los valores acumulados y el  $D_{80}$ .
  - b. Análisis modal por intervalos de tamaño de partícula.
  - c. Análisis de liberación por % de superficie expuesta (es decir, grado de exposición superficial, calculado como % del perímetro ocupado por el mineral) en las partículas que contienen un determinado mineral -o grupo de minerales- de interés, distribuido por intervalos de tamaño de partícula.
  - d. Análisis de liberación por % de composición en peso (es decir, grado de liberación y análisis composicional de los mixtos) en las partículas que contienen un determinado mineral -o grupo de minerales- de interés, distribuido por intervalos de tamaño de partícula.
  - e. Análisis de la composición (expresada en % en peso) de cada uno de los minerales o grupos minerales definidos según el tipo de partícula (monofase, binaria con otro grupo mineral y multifase).

Los resultados de estos análisis se presentan en forma de tablas y gráficos, organizados en un informe en formato HTML creado automáticamente por el programa, que se puede imprimir o guardar en formato PDF. Se adjunta un ejemplo de informe de un concentrado de planta en el Caso 2 del Suplemento.

## 6. BASES DE DATOS. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN

Un elemento fundamental del sistema AMCO es la base de datos de reflectancia espectral multiespectral, que recoge medidas de los minerales en cada una de las bandas de reflectancia capturadas por el sistema. Dichas bandas cubren el rango de la luz visible y el infrarrojo cercano (VNIR) entre 370 nm y 1000 nm. La muestra se coloca en una platina no rotatoria, por lo que la orientación de cada grano mineral es aleatoria, lo cual obliga a trabajar con luz no polarizada, reduciendo en gran medida el efecto de la birreflectancia.

La base de datos se construyó a partir de muestras de las colecciones de investigación del Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid (LMA-UPM) y otras aportaciones. La selección de las menas más adecuadas se ha hecho teniendo en cuenta su abundancia (p. ej. pirita) y su interés industrial (por ejemplo, Au y EGP), resultando un total de unas 80 especies, de las que son prioritarias unas 40, que coinciden en gran parte con las descritas en los manuales de microscopía. No obstante, la base de datos está abierta a la incorporación de nuevas especies o de distintas 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.

En primer lugar, se realizó un estudio microscópico de control para identificar las menas metálicas, garantizar la idoneidad de las secciones pulidas (limpieza, calidad de pulido y textura) y seleccionar los campos adecuados para la medida. De un total de 589 muestras potencialmente interesantes estudiadas, finalmente se eligieron 133 para construir la base de datos de AMCO. Sobre ellas se midieron del orden de 100 minerales, en su mayoría menas metálicas, entre los que se encuentran especies de gran abundancia, como la pirita o la galena (Figura 22) y otras poco representadas en los manuales clásicos de mineralogía, como la monacita.

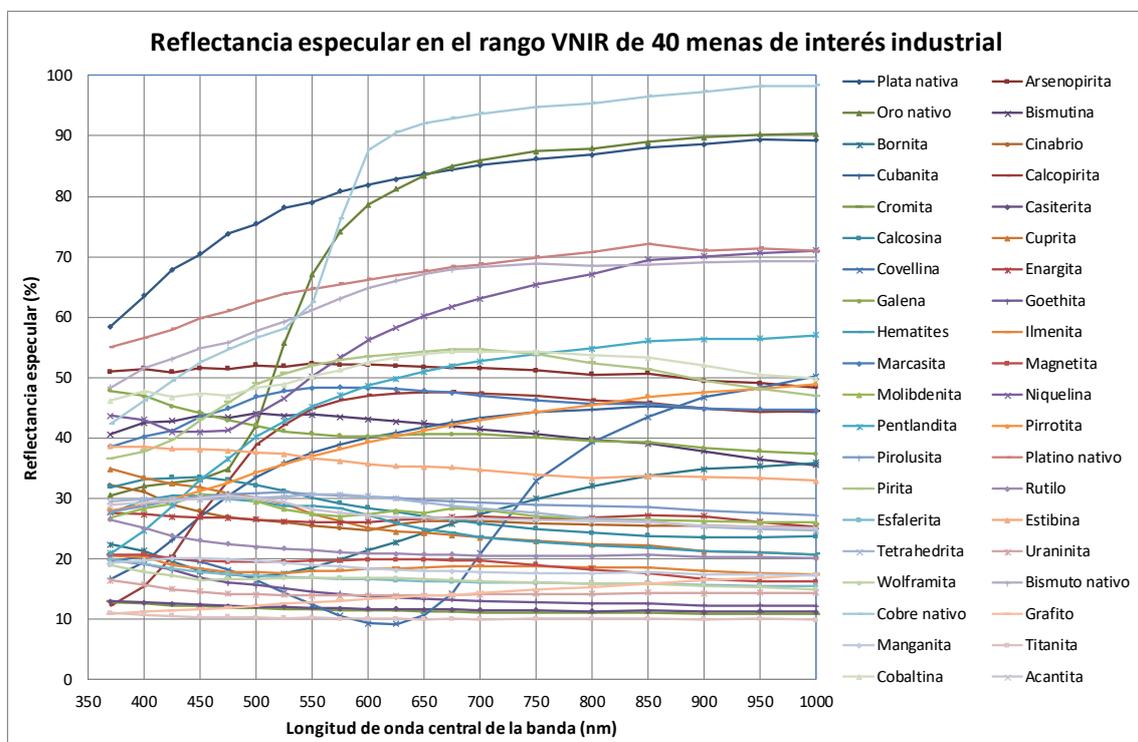


Figura 21 - Valores de reflectancia espectral en el rango VNIR de una selección de 40 menas de interés industrial.

La validación de la base de datos de reflectancia espectral multiespectral se hizo, primeramente, comparando los espectros con las bases de datos existentes (Figura 23), como Picot and Johan (1982), Criddle and Stanley (1993), y el proyecto precursor CAMEVA: Castroviejo et al. (2009) o medidas en sistemas externos (microespectrómetro de H.-J. Bernhardt).

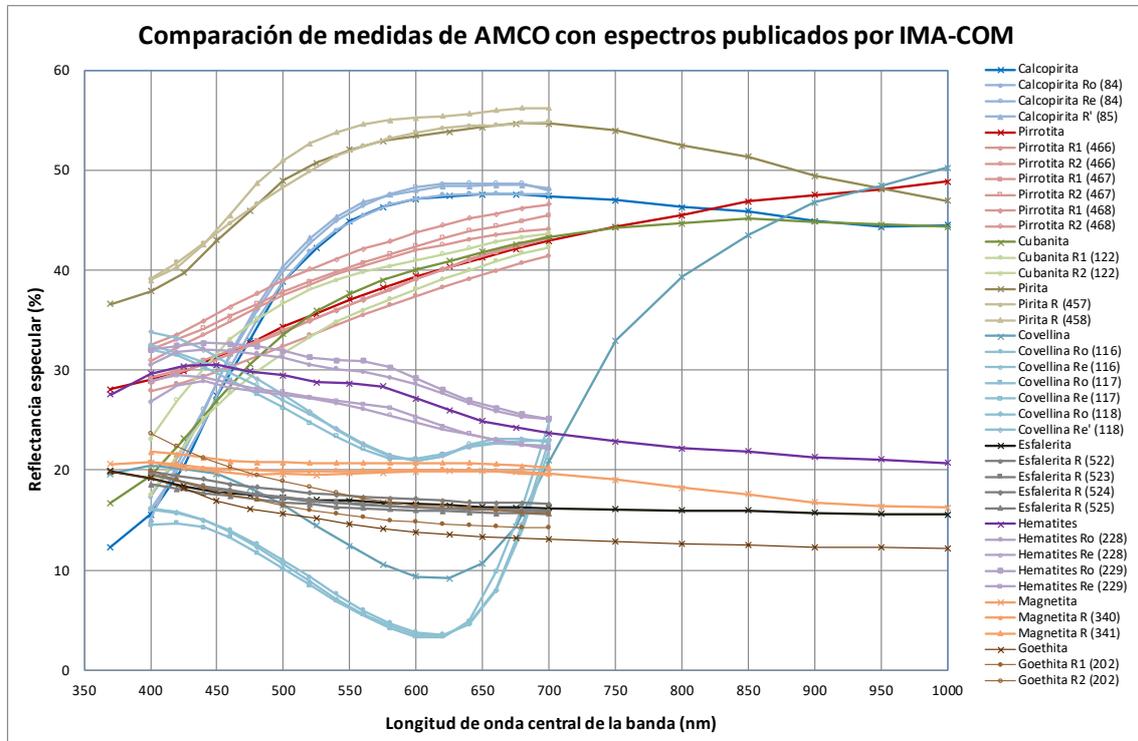


Figura 22 - Comparación de medidas de AMCO con medidas de QDF3.

Luego, mediante análisis estadístico, aplicando diversos métodos de clasificación automatizada de las medidas 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 % (López-Benito et al., 2019). 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).

La validación definitiva se hizo mediante la comparación de los análisis modales realizados por el sistema AMCO con los análisis modales obtenidos de un sistema de Mineralogía Automatizada basado en SEM-EDS, procesando las mismas muestras. Para ello, en el LMA se adquirieron series de imágenes multiespectrales de 18 láminas delgadas pulidas, haciendo barridos automáticos con un paso de 1500  $\mu\text{m}$ , que proporcionan una cobertura efectiva del 8,1% del área de la sección pulida (de 22 x 32 mm, aproximadamente). Cada serie fue procesada con *amcoAnalysis* para obtener su análisis modal. A continuación, las láminas fueron enviadas a la Universidad de Lieja, donde, tras aplicarles un recubrimiento de carbono, fueron analizadas con el sistema Zeiss Mineralogic Mining (consistente en un microscopio electrónico de barrido (SEM) ZEISS Sigma 300 equipado con dos detectores de rayos X Bruker xFlash 6|30 para análisis espectroscópico de rayos X por dispersión de energía (EDS), controlado todo por el software ZEISS Mineralogic Mining V1.5). Para el análisis EDS de las láminas se empleó el modo Mapping, con un paso de 100  $\mu\text{m}$  y un tiempo de residencia de 50 ms. Los análisis modales obtenidos por ambos sistemas son razonablemente parecidos, teniendo en cuenta la variación estadística esperable para los minerales minoritarios y el diferente método de muestreo empleado por cada sistema.

Algunas de las diferencias entre los resultados de ambos sistemas se derivan de sus radicalmente distintos principios de funcionamiento y características:

- AMCO no puede distinguir con seguridad los minerales de ganga, y proporciona un valor global para el grupo de la ganga.
- AMCO es capaz de identificar con fiabilidad polimorfos y fases minerales de composición muy similar que no pueden ser distinguidos por SEM-EDS (p. ej. pirita/marcasita, enargita/tenantita/luzonita, digenita/calcosina/djurleíta, magnetita/hematites, etc.).
- AMCO es menos fiable con composiciones intermedias en series isomorfas.
- AMCO puede analizar muchos más píxeles que SEM-EDS en un tiempo dado.
- El porcentaje de píxeles sin clasificar es mucho menor con AMCO que con SEM-EDS.

## 7. RESULTADOS. IDENTIFICACIÓN AUTOMATIZADA Y APLICACIÓN GEOMETALÚRGICA

La identificación automatizada de los minerales a partir de sus valores multispectrales de reflectancia especular resulta particularmente efectiva cuando los minerales que componen la muestra presentan espectros de reflectancia especular netamente diferentes. Un ejemplo claro de este tipo lo tenemos con la muestra 170315 del LMA-UPM, que es un bloque pulido de una mena de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica, que contiene pirita, esfalerita y ganga como componentes principales, y calcopirita, galena, tetraedrita, magnetita y gudmundita como componentes accesorios.

La Figura 24 muestra los espectros de dichos minerales en la base de datos del Sistema AMCO, que recoge valores de reflectancia especular en los rangos VNIR y SWIR (de 370 nm a 1600 nm). Puede observarse que los espectros son lo suficientemente diferentes en el rango VNIR (de 370 nm a 1000 nm) como para tener la seguridad de que los minerales se distinguirán bien a partir de imágenes VNIR, sin necesidad de adquirir bandas SWIR.

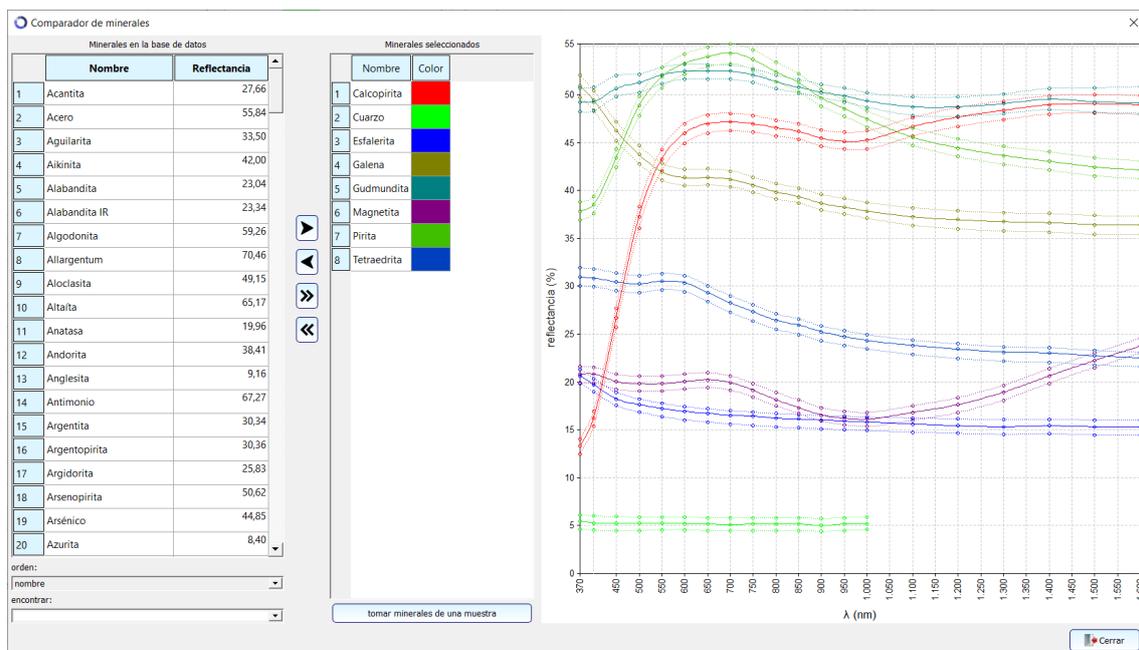


Figura 23 – Comparador de minerales de la base de datos del Sistema AMCO mostrando los espectros de reflectancia especular de los ocho minerales seleccionados. Cada espectro está compuesto por tres líneas: la línea continua es el valor medio, y las discontinuas los percentiles del 16% y del 84%

Para probarlo, se procedió a realizar un barrido automático de 5 x 6 campos contiguos (es decir, con una cobertura del 100% de la zona barrida) sobre la parte central de esta muestra, obteniendo la correspondiente serie de imágenes multispectrales VNIR. Precisamente, las ilustraciones Figura 8, Figura 13, Figura 15 y Figura 19 muestran diversas imágenes de este barrido.

El Caso 1 del apartado de Suplementos ilustra la capacidad del Sistema AMCO para asistir a un especialista en microscopía de menas en el análisis manual de una muestra como esta, mediante la indicación del mineral cuyo espectro se aproxima más al de una zona delimitada sobre la imagen, o realizando la identificación automatizada de los píxeles de una imagen o de una serie, aportando resultados cuantitativos que son prácticamente imposibles de obtener manualmente.

Por otra parte, el Sistema AMCO ha sido preparado para llevar a cabo la caracterización automatizada de muestras de menas molidas, tales como concentrados de planta. Para ello es necesario elaborar una lámina delgada pulida de un espesor nominal de 30  $\mu\text{m}$ , empleando resina epoxi teñida con un colorante fluorescente, según el procedimiento específico desarrollado por el LMA-UPM (Grunwald-Romera et al., 2019). A continuación, se efectúa con el programa *amcoCapture* el barrido automático de la lámina con el paso horizontal y vertical deseado, en función del número de imágenes deseadas, asegurándose de emplear un tiempo de exposición adecuado para la adquisición de la banda de fluorescencia. Una vez concluida la adquisición, se abre la serie de imágenes con el programa *amcoAnalysis*, se ajusta el valor de umbral más adecuado para la banda de fluorescencia y, tras seleccionar los minerales que se desea considerar en el análisis, se realiza la clasificación de minerales en toda la muestra, con lo que se obtiene el análisis modal general de la muestra. Seguidamente, tras fijar los parámetros deseados, se lleva a cabo el análisis de partículas en toda la muestra, que genera automáticamente un informe en formato HTML con numerosas tablas y gráficos que recogen los resultados de todos los análisis realizados.

El Caso 2 del apartado de Suplementos contiene un informe típico del análisis de una muestra molida de planta de la Faja Pirítica Ibérica.

Los resultados obtenidos demuestran que el Sistema AMCO logra una identificación y una cuantificación automatizadas fiables con un rendimiento comparable al de los sistemas de Mineralogía Automatizada basados en microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (SEM-EDS). Incluso supera a éstos en algunos casos, como el de la distinción de polimorfos (por ejemplo, pirita/marcasita/melnikovita) y minerales con composición muy similar, como algunas sulfosales (enargita/tennantita/luzonita), sulfuros de cobre (digenita/calcosina/djurleíta), minerales de hierro (hematites/magnetita/goethita), y en la identificación de grafito.

La microscopía de menas automatizada es una herramienta útil y de alto rendimiento no sólo para las aplicaciones mineralúrgicas, sino también para el aprendizaje de la microscopía de menas. El Sistema AMCO representa una alternativa real (competitiva o complementaria) a los sistemas SEM-EDS actualmente en uso. En ambos casos, el experto mineralogista, lejos de sentirse amenazado por un planteamiento de caja negra, puede ver su rendimiento enormemente potenciado.

## 8. REFERENCIAS

Atkin, B.P. and Harvey, P.K. (1979): Nottingham Interactive System for Opaque Mineral Identification: NISOMI. Trans. Inst. Mining Metall. 88, 1324-1327.

- Bernhardt, H.J. (1979): Computer-gestuetzte Erzmineral-Diagnose mittels Reflexionsspektren in sichtbarem Licht. N. Jb. Miner. Mh., H.9, 403-407. Stuttgart
- Bernhardt, H.J. (1987): A simple, fully-automated system for ore mineral identification. *Mineralogy and Petrology*, 36, 241-245.
- Bernhardt, H.J. (1990): Microscopic identification, and identification schemes, of ore minerals. Pp. 189-212, in: Jambor, J.L. and Vaughan, D.J., eds. *Advanced Microscopic Studies of Ore Minerals. Short Course Handbook 17*, Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 426 p.
- Berrezueta, E. and Castroviejo, R. (2007): Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico. *Rev. Metalurgia*, 43 (4), 294-309.
- 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.
- Castroviejo, R., Catalina, J.C., Bernhardt, H.J., Pirard, E., Segundo, F., Brea, C., Pérez-Barnuevo, L. (2010): A fully automated system for multispectral ore microscopy. *IMA2010 (20th General Meet. Internat. Mineralogical Association). Acta Mineral. Petrogr. Abstr. Ser.* (HU ISSN 0324-6523 / HU ISSN 1589-4835), Szeged, Budapest, p. 281. (Proc. CD\_ROM, Session EG53\_Geometallurgy and Process mineralogy, Code 4NF15).
- Catalina, J.C. and Castroviejo, R. (2017): Multispectral Reflectance Microscopy: Application to the Automated Recognition of Metallic Ores. *Journal of Metallurgy*. 53-4, 1-20. DOI: 10.3989/revmetalm.107.
- Catalina, J.C. (2018): Desarrollo de un sistema multiespectral para microscopía de menas. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid (DOI: 10.20868/UPM.thesis.52452; <http://oa.upm.es/52452/>).
- Criddle, A.J. and Stanley, C.J., eds. (1993): *Quantitative Data File for Ore Minerals*, 3rd edition. Chapman & Hall, London, 635 p.
- Criddle, A.J. (1998): *Ore Microscopy and Photometry (1890-1998)*. In Cabri, L.J. and Vaughan, D.J., eds. *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy. COM/IMA Short Course Series*, vol. 27, Ottawa, Ontario, 421 p.
- Gerlitz, C.N., Leonard, B.F. and Criddle, A.J. (1989): QDF database system, version 1.0: reflectance of ore minerals—a search-and-match identification system for IBM and compatible microcomputers using the IMA/COM Quantitative Data File for Ore minerals, second issue. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 89-0306A-E.
- Grunwald-Romera, U., Catalina, J.C., Alarcón, D., López-Benito, A., Castroviejo, R. (2019): A reliable method for the automated distinction of quartz gangue and epoxy resin with reflected light microscopy and its application to digital image analysis. *Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting. Glasgow, Scotland (27-30 August 2019)*.
- Kühnel, R.A., Prins, J.J. and Roorda, H.J. (1980): *The 'Delft' System for Mineral Identification*. Delft Univ. Press, Delft, The Netherlands, 204 p.
- López-Benito, A., Catalina, J.C., Alarcón, D., Grunwald-Romera, U., Romero, P., Castroviejo, R. (2019): Automated ore microscopy based on multispectral measurements of specular reflectance. I - A comparative study of some supervised classification techniques. *Minerals Engineering*, Volume 146, 2020, 106136, ISSN 0892-6875. DOI:10.1016/j.mineng.2019.106136; (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687519305473>)

Pérez-Barnuevo, L. (2014): Caracterización automatizada de texturas de menas mediante análisis digital de imagen para su aplicación geometalúrgica. Tesis Doctoral. E.T.S.I. de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, 298 p.

Picot, P. and Johan, Z. (1982): Atlas of Ore Minerals. B.R.G.M., Elsevier.

Pirard, E. (2004): Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. Mineralogical Magazine, April 2004, Vol. 68(2), pp. 323–333.

Pirard, E. (2016): Optical Microscopy. Ch.5, p 51-66, in: Becker M, Wightman EM, Evans CL (eds.) Process Mineralogy. JKMRC Monograph Series in Mining & Mineral Processing: No. 6. The University of Queensland, Australia, 470 p.

Shoji, T. and Kaneda, H. (1994): An interactive system to assist mineral identification in ore microscopy. Mathematical Geology, 26, 8: 961-972.

Supported by



This activity has received funding from the European Institute of Innovation and Technology (EIT), a body of the European Union, under the Horizon 2020, the EU Framework Programme for Research and Innovation

## 9. SUPLEMENTO

Ejemplos de aplicación práctica (análisis cualitativo y cuantitativo):

- Caso 1. Identificación automatizada (mena de sulfuros masivos)
- Caso 2: Análisis y caracterización de un concentrado de planta

## Caso 1. Identificación automatizada (mena de sulfuros masivos)

Este documento describe la capacidad del programa *amcoAnalysis* del Sistema AMCO para:

- identificar automáticamente el mineral correspondiente a una zona delimitada manualmente por el operador sobre una imagen
- identificar automáticamente el mineral correspondiente a cada uno de los píxeles de una imagen, o la totalidad de una serie de imágenes

a partir de sus valores multispectrales de reflectancia especular.

Esta capacidad resulta de gran interés para asistir a un especialista en microscopía de menas en el análisis manual de una muestra, ya que le permite obtener resultados cuantitativos sobre su composición que son prácticamente imposibles de conseguir de forma manual.

Para ejemplificarla, se empleará una serie de imágenes adquirida mediante la realización de un barrido automático de 5 x 6 campos sobre la parte central de la muestra 170315 del LMA-UPM. Esta muestra es un bloque pulido elaborado a partir de una muestra de mano de una mena de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica, que contiene piritita, esfalerita y ganga como componentes principales, y calcopirita, galena, tetraedrita, magnetita y gudmundita como componentes accesorios.

La serie de 30 imágenes multispectrales VNIR obtenida en el barrido puede ser examinada por el especialista de forma manual, recorriendo a voluntad las distintas imágenes, y delimitando en ellas diversas zonas de interés. El espectro de reflectancia de cada zona marcada en una imagen (calculado como la media o la moda de los espectros de todos los píxeles de la zona) se presenta en un gráfico en la esquina superior derecha de la ventana, en el mismo color asignado a su contorno. La comparación de dicho espectro con los espectros almacenados en la base de datos permite identificar el mineral correspondiente, como puede observarse en la Fig. Caso 1. 1, que presenta en la esquina inferior izquierda listas de los minerales de la base de datos cuyo espectro se asemeja más (según distintos criterios) al espectro de la zona marcada activa –esfalerita, en este caso– ordenados de menor a mayor distancia (de mayor a menor probabilidad).

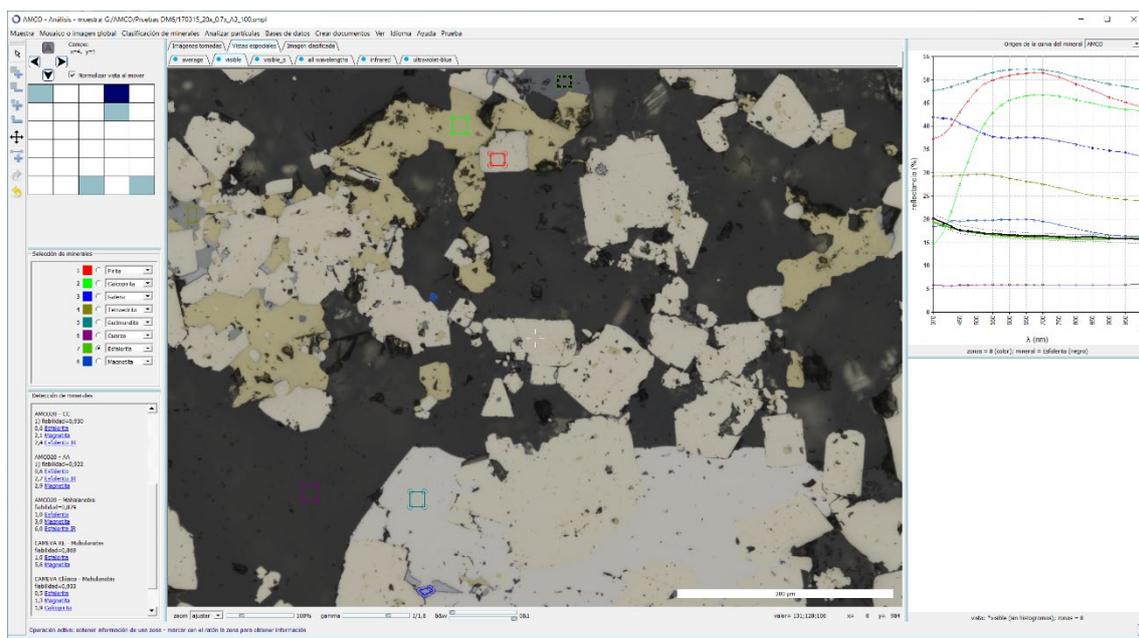
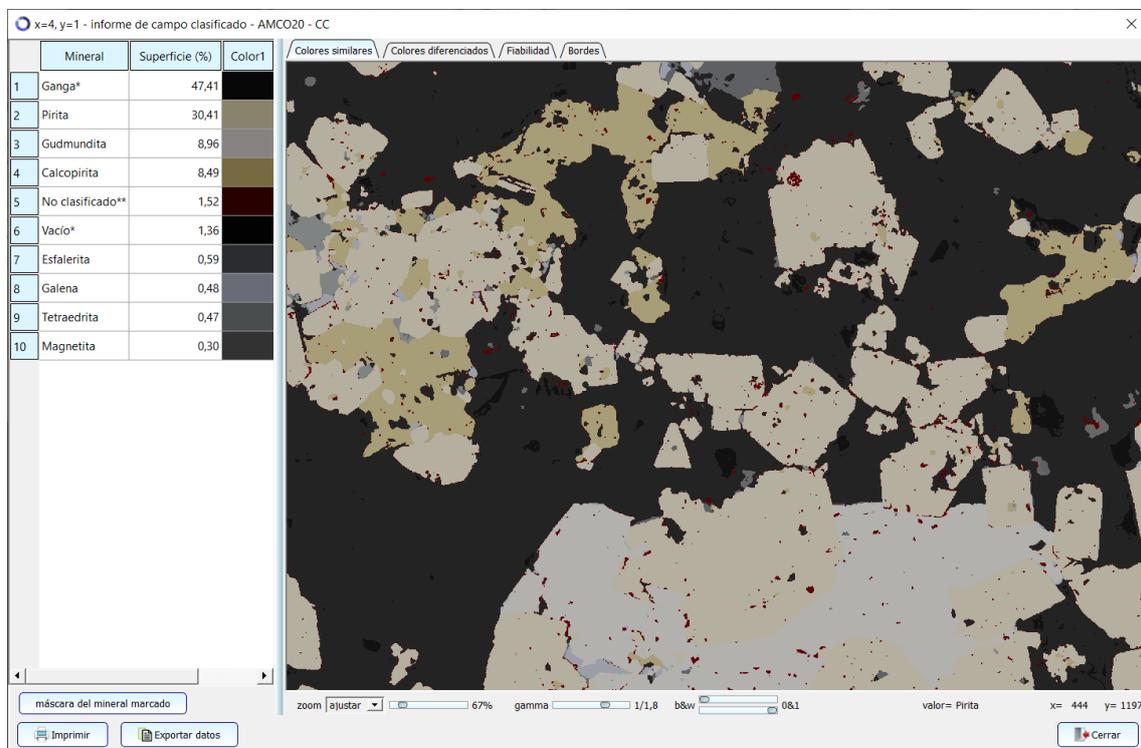


Fig. Caso 1. 1 – Análisis manual del campo (4,1) del barrido de una sección pulida. El operador ha delimitado ocho zonas de diversos minerales, que ha identificado tentativamente. Está activa la zona identificada como esfalerita

De esta forma, el programa *amcoAnalysis* puede ayudar al especialista a identificar con mayor seguridad los minerales presentes en la muestra, mediante la determinación cuantitativa de su espectro de reflectancia.

Una vez identificados los minerales presentes en la muestra, o los que podrían aparecer, conocido su origen, el especialista puede restringir las opciones consideradas en la identificación automática con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de clasificación y reducir la posibilidad de error, marcando los minerales que desea que el programa tenga en cuenta en el análisis en la ventana de selección de minerales.

La Fig. Caso 1. 2 presenta la ventana generada al aplicar la función “Clasificación de minerales en el campo actual”, en la que se muestra en su parte izquierda el análisis modal de todos los píxeles del campo, expresado en % en volumen, y en su parte derecha una imagen que codifica cada píxel con el color correspondiente a la clase asignada, de forma que las distintas fases minerales aparecen de color uniforme. Puede verse que la clasificación es muy buena, con pocos píxeles asignados a la clase “No clasificado”, que en su mayoría corresponden a bordes.



**Fig. Caso 1. 2 – Ventana generada al aplicar la función “Clasificación de minerales en el campo actual”. Muestra el análisis modal del campo y el resultado de la clasificación de todos los píxeles que lo integran.**

Para que el usuario pueda apreciar más fácilmente la localización de los distintos minerales en la imagen, que puede resultar algo confusa en el caso de que existan granos de pequeño tamaño, el programa permite mostrar por separado una imagen de la distribución de cada uno de los minerales en su color, enmascarando los demás minerales con un fondo blanco.

Como ejemplo, las diez figuras de la Fig. Caso 1. 3 a la Fig. Caso 1. 12 muestran la distribución de cada una de las clases detalladas en el análisis modal del campo anterior, incluyendo los píxeles asignados a “Vacío” (es decir, que no tienen mineral porque se produjo la saltadura de un grano durante el pulido) y a “No clasificado” (porque la identificación del mineral no es lo suficientemente segura como para considerarse válida).

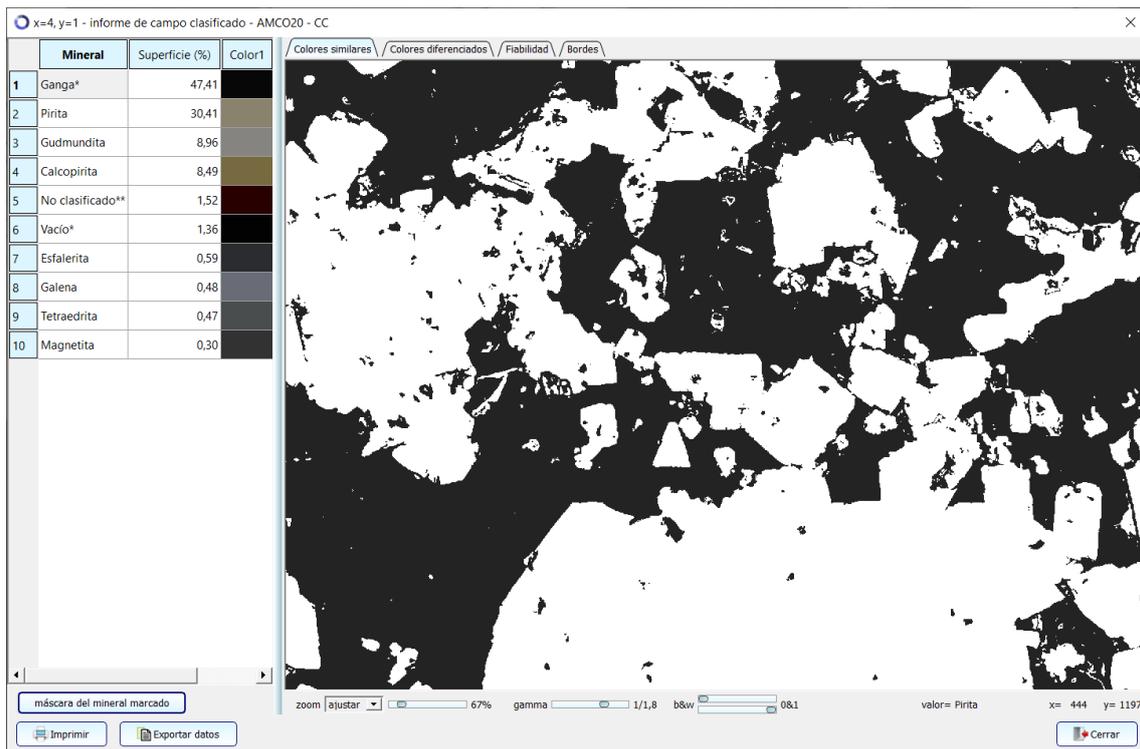


Fig. Caso 1. 3 – Máscara de las zonas de ganga

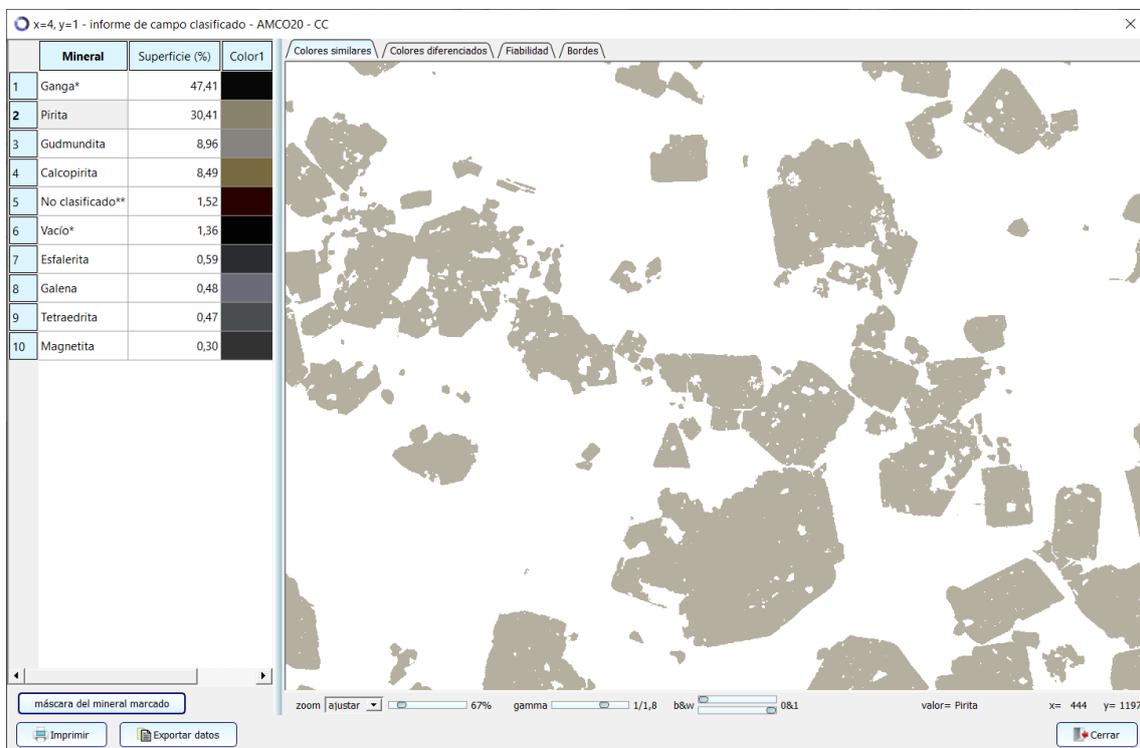


Fig. Caso 1. 4 – Máscara de las zonas de pirita

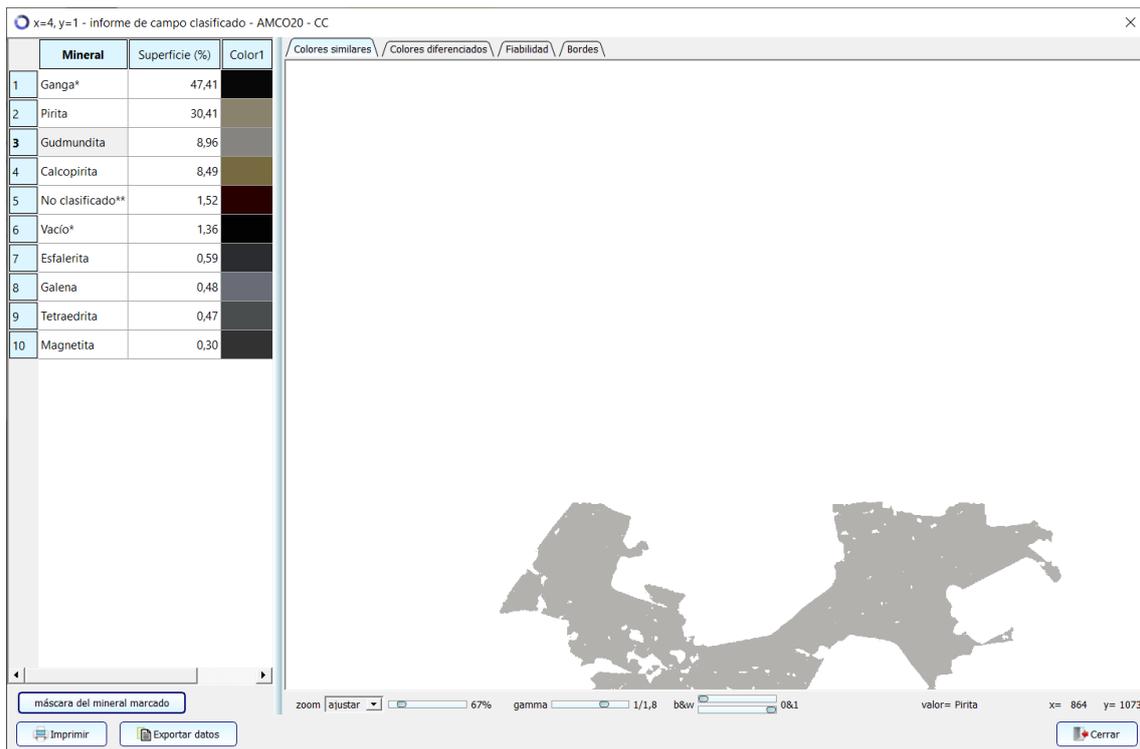


Fig. Caso 1. 5 – Máscara de las zonas de gudmundita

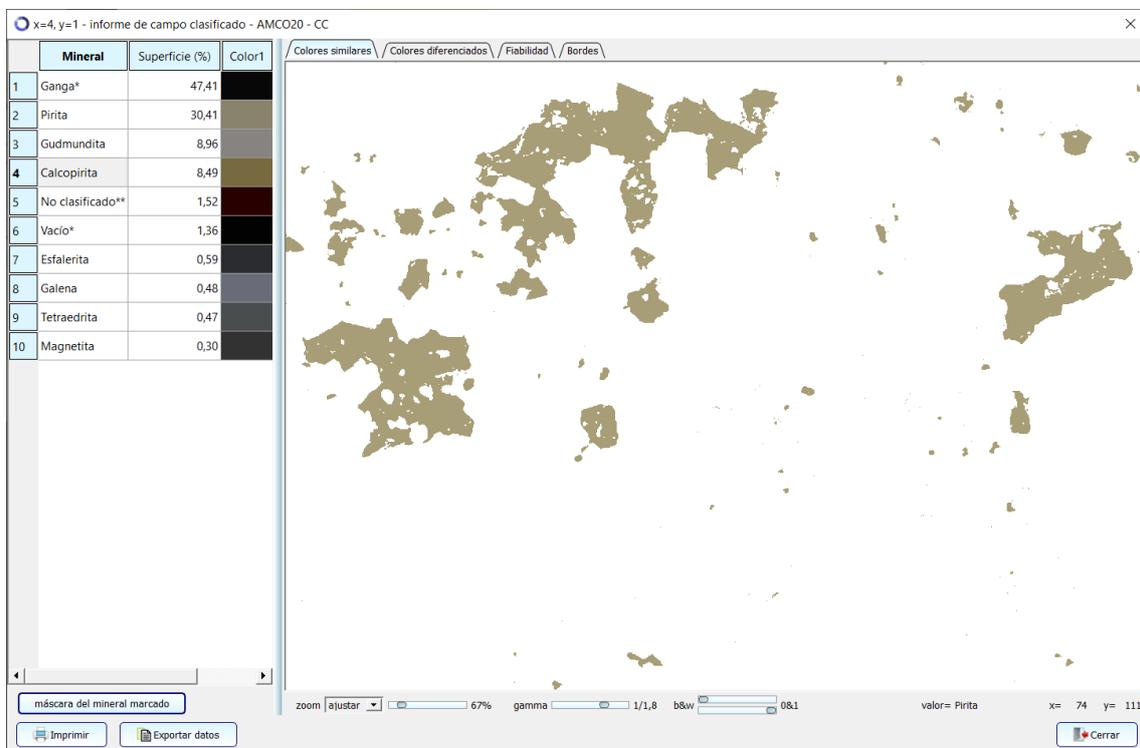


Fig. Caso 1. 6 – Máscara de las zonas de calcopirita

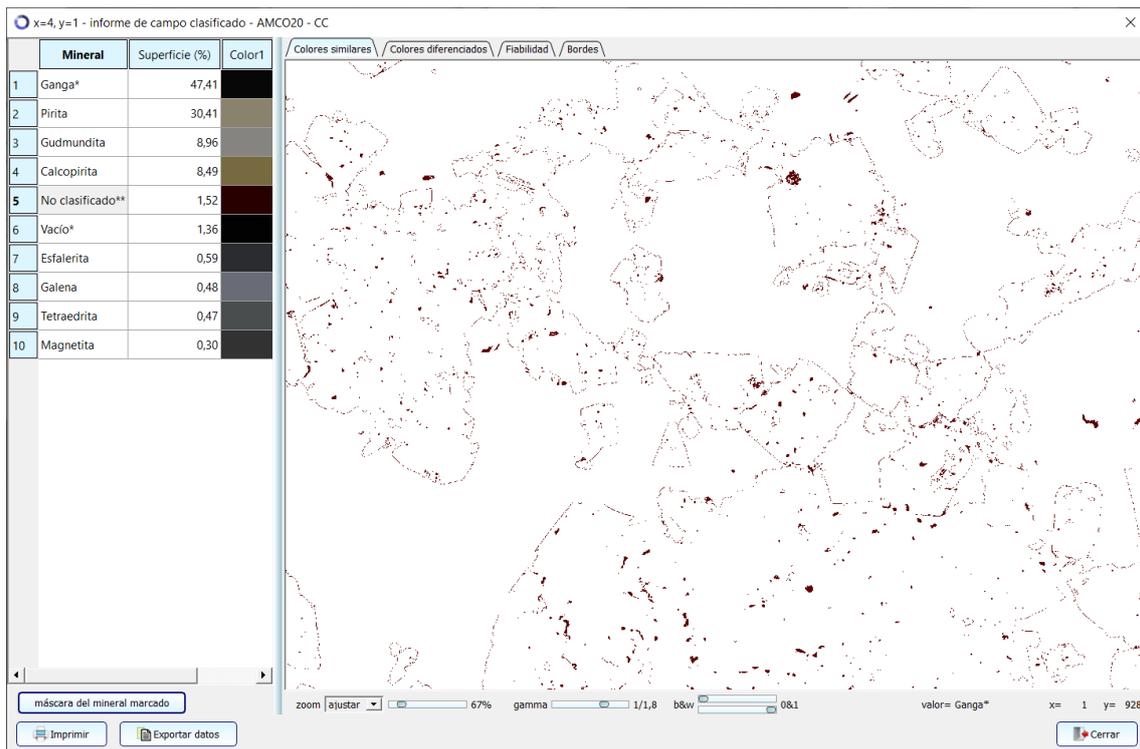


Fig. Caso 1. 7 – Máscara de las zonas no clasificadas por no alcanzar suficiente seguridad en la identificación

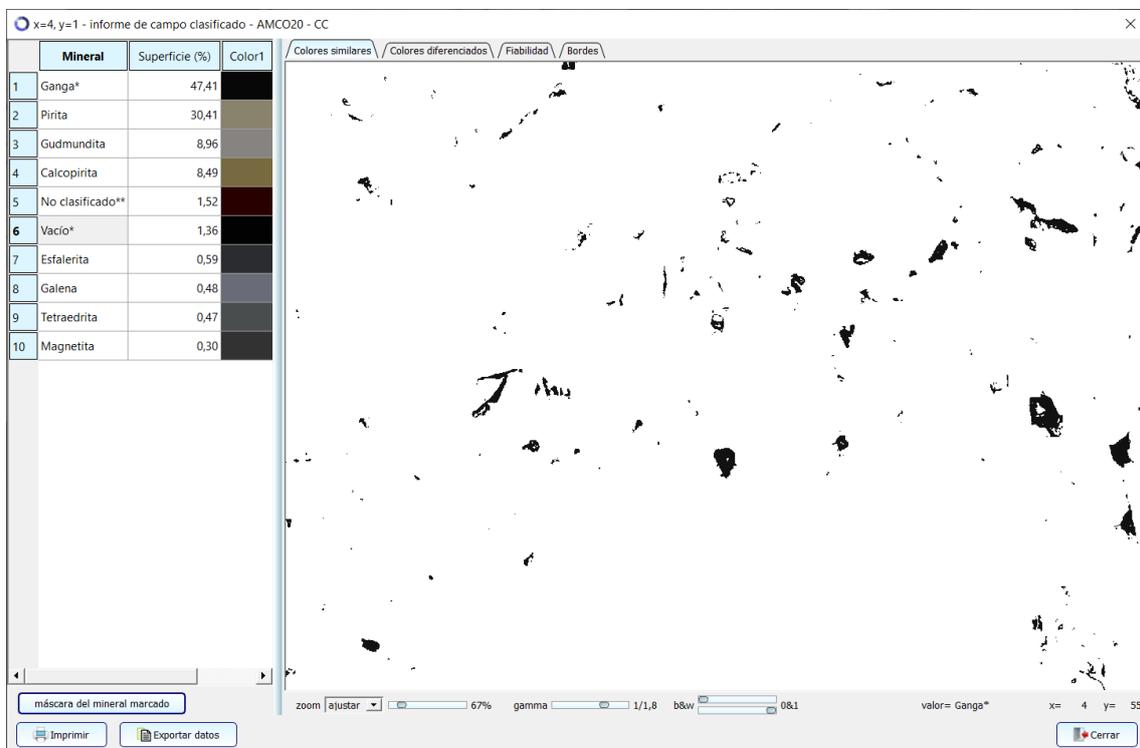


Fig. Caso 1. 8 – Máscara de las zonas de vacío (ausencia de mineral)

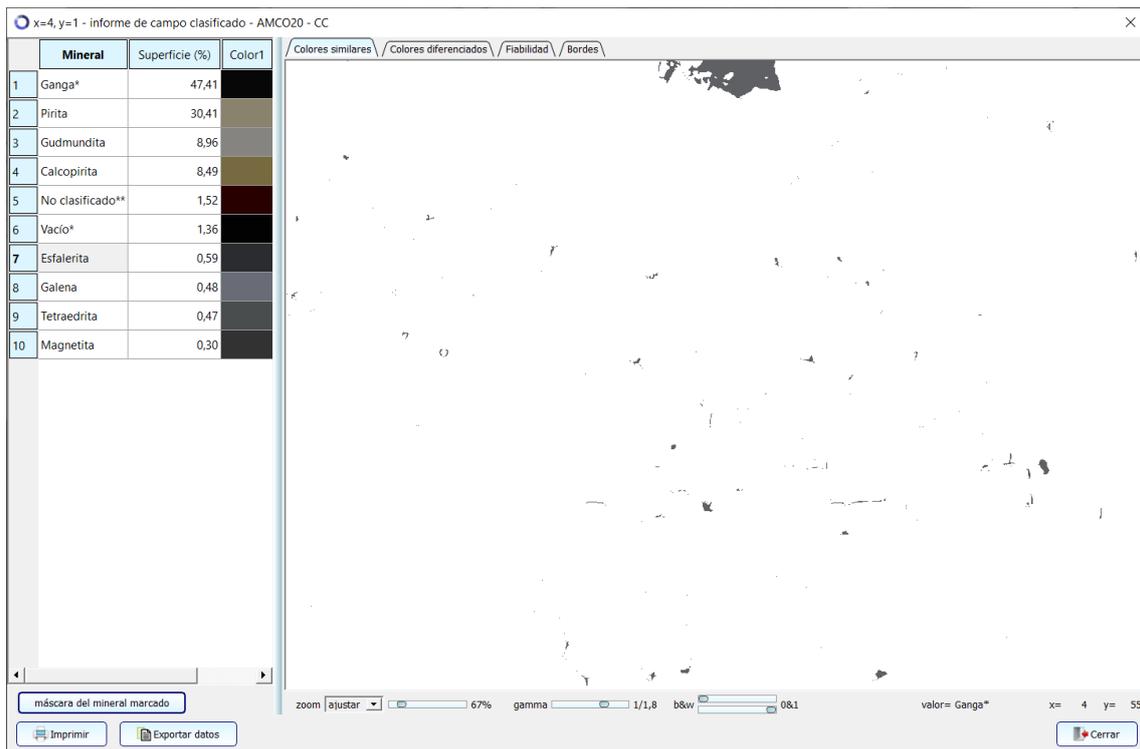


Fig. Caso 1. 9 – Máscara de las zonas de esfalerita

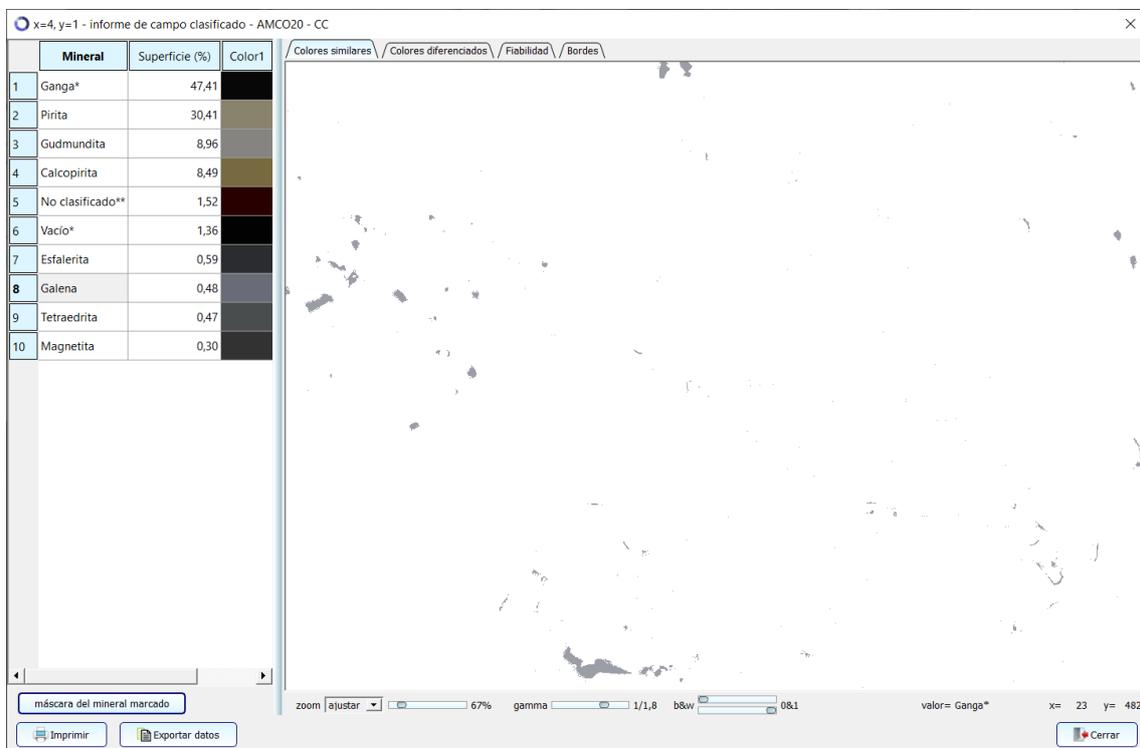


Fig. Caso 1. 10 – Máscara de las zonas de galena

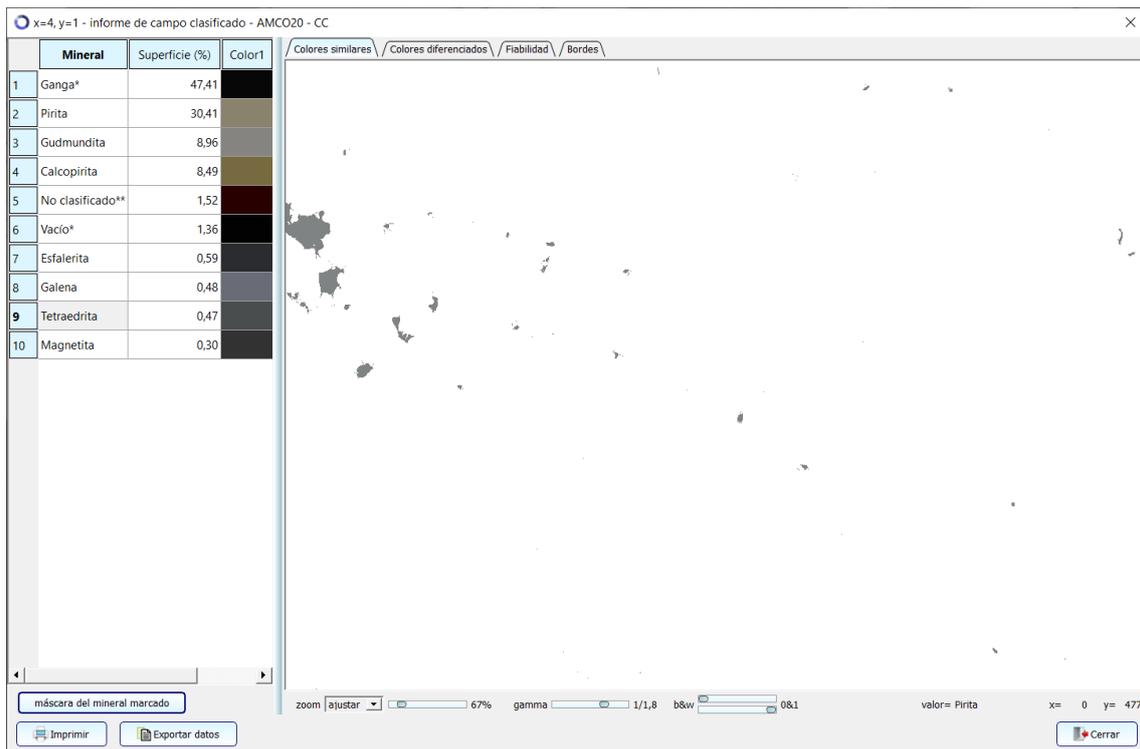


Fig. Caso 1. 11 – Máscara de las zonas de tetraedrita

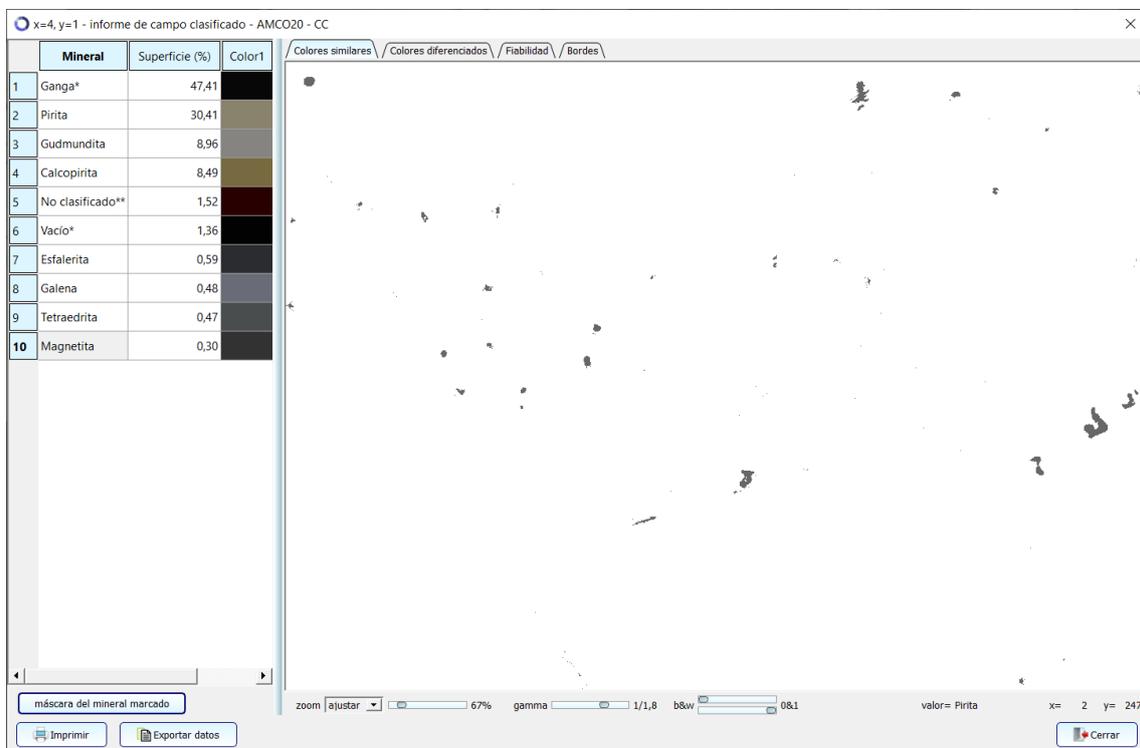


Fig. Caso 1. 12 – Máscara de las zonas de magnetita

La función “Clasificación de minerales en toda la muestra” permite obtener el análisis modal general de la muestra, que se expresa indistintamente en % en volumen o en % en peso de cada especie mineral considerada en el análisis. Los píxeles clasificados como “Vacío” o “No clasificado” se descuentan al calcular el análisis modal expresado en % en peso. La Fig. Caso 1. 13 recoge el análisis modal general de esta muestra.

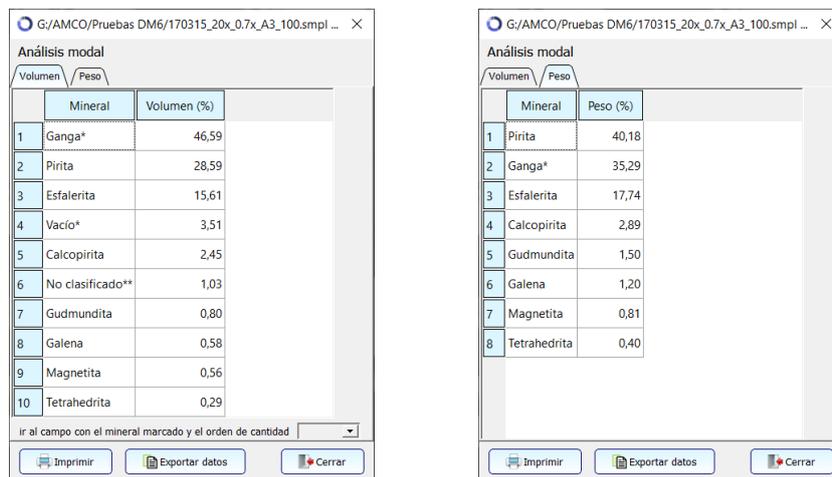


Fig. Caso 1. 13 – Análisis modal general de la serie de imágenes

La función “Clasificación de minerales en toda la muestra” también permite obtener la imagen clasificada de cada uno de los campos de la serie.

Cuando la serie de imágenes se ha adquirido mediante un barrido automático con cobertura del 100%, como es el caso de esta serie, el programa *amcoAnalysis* permite generar una imagen global de gran tamaño de la zona barrida mediante la yuxtaposición de todos los campos como si fueran teselas de un mosaico, aplicando el factor de escala necesario para que la imagen resultante tenga el tamaño indicado. La imagen se genera a partir de la modalidad de vista que esté activa en ese momento, que normalmente suele ser la vista en color verdadero o la imagen clasificada.

La Fig. Caso 1. 14 y la Fig. Caso 1. 15 muestran las dos imágenes “mosaico” de la zona barrida, que tiene unas dimensiones de 3400  $\mu\text{m}$  (H) x 3007  $\mu\text{m}$  (V). Aunque las imágenes han sido escaladas para obtener una escala de 1  $\mu\text{m}$ /píxel, resultan tan grandes que el proceso de impresión no permite apreciar todo su detalle.

En conclusión, la capacidad del programa *amcoAnalysis* para identificar los minerales presentes en una imagen multiespectral de reflectancia especular puede resultar muy útil para:

- asistir al especialista en microscopía de menas en la identificación de minerales poco frecuentes o dudosos al realizar el análisis manual de una muestra
- obtener valores cuantitativos precisos de la proporción de los distintos minerales existentes en una muestra (análisis modal), sin necesidad de contar con un especialista en microscopía de menas.
- servir de apoyo al alumno que está aprendiendo a reconocer los minerales al microscopio, ayudándole a resolver sus dudas

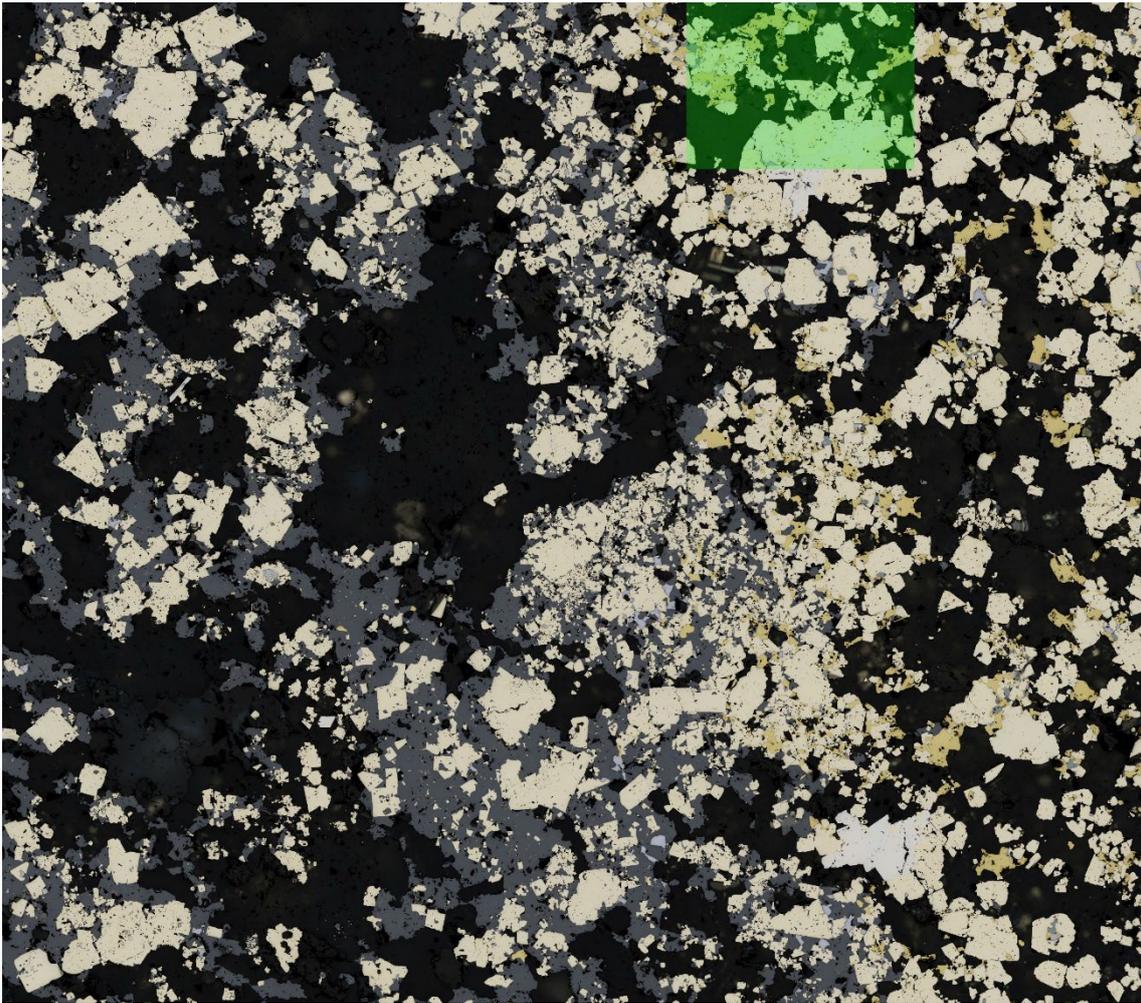
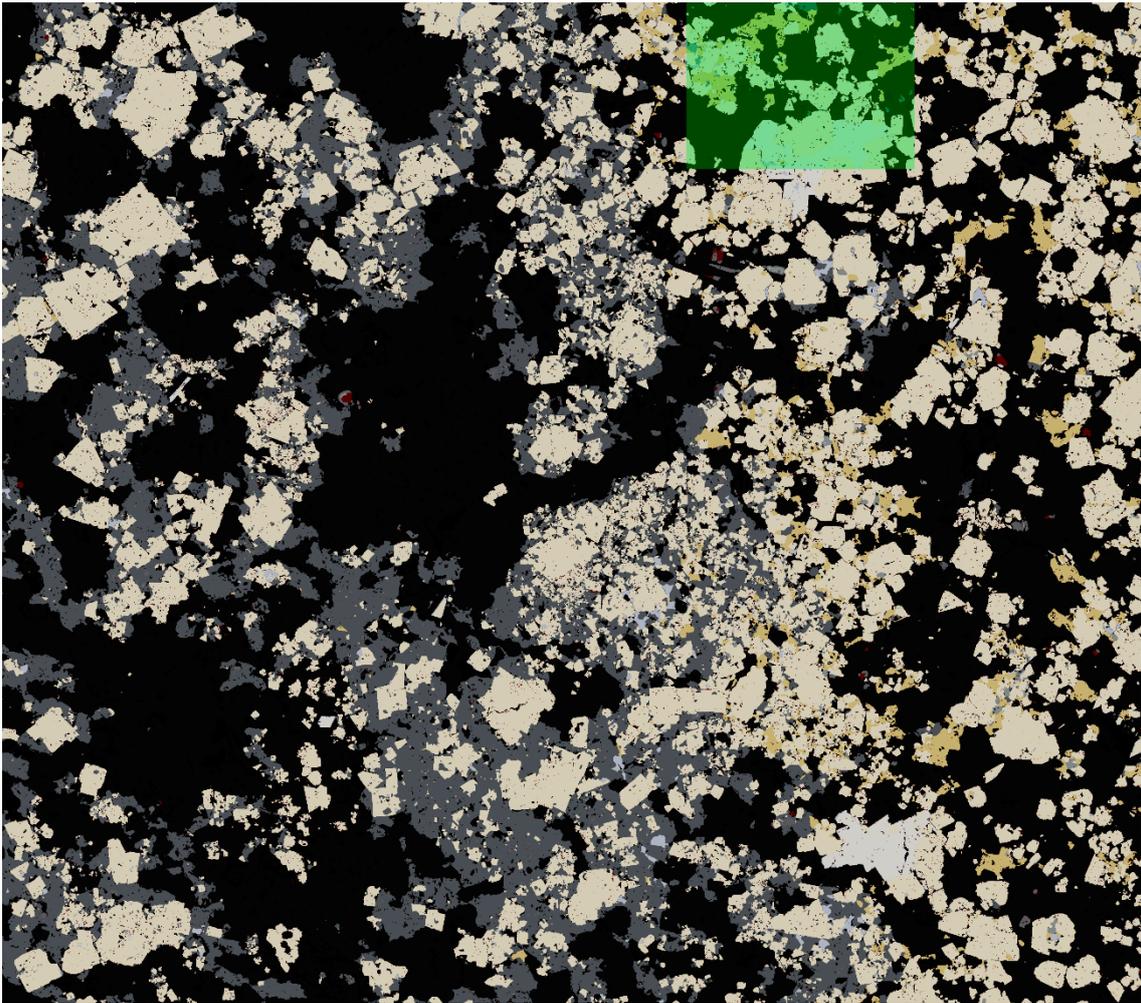


Fig. Caso 1. 14 – Mosaico del barrido obtenido a partir de la vista en color verdadero.  
La zona correspondiente al campo (4,1) aparece sombreada en verde.



**Fig. Caso 1. 15 – Mosaico del barrido obtenido a partir de las imágenes clasificadas.  
La zona correspondiente al campo (4,1) aparece sombreada en verde.**

## Caso 2. Análisis y caracterización de un concentrado de planta

Las siguientes páginas recogen un ejemplo característico del tipo de informe generado por el software amcoAnalysis al realizar el análisis de partículas sobre la totalidad de las imágenes adquiridas en el barrido automatizado de una sección delgada pulida elaborada a partir de una muestra de mineral molido. En este caso concreto, la muestra procede de la trituración de un fragmento de testigo de sondeo de una mina de la Faja Pirítica Ibérica.

Los parámetros a aplicar en el análisis son totalmente configurables por el usuario mediante una ventana de configuración como la que se muestra en la siguiente figura.

**Parámetros del análisis de partículas**

---

**Análisis granulométrico**

Hacer análisis granulométrico imprimir tabla granulométrica en  columnas

Intervalos de tamaño de partículas en  $\mu\text{m}$  - escribir los tamaños para el análisis granulométrico separados por ',' y en orden creciente

---

**Análisis modal por tamaño**

Hacer análisis modal por tamaño

Intervalos de tamaño de partículas en  $\mu\text{m}$  - escribir los tamaños para el análisis granulométrico separados por ',' y en orden creciente

---

**Análisis de liberación**

Hacer análisis de liberación Método de cálculo  composición  
 superficie

Intervalos de tamaño de partículas en  $\mu\text{m}$  - escribir los tamaños para el análisis de liberación separados por ',' y en orden creciente

Intervalos de liberación en % - escribir los % para el análisis de liberación separados por ',' y en orden creciente

Grupos de minerales para el análisis de liberación

Minerales en el grupo	
1	Calcopirita; Calcosina; Covelina; Bornita; Digenita; Djurleita
2	Esfalerita
3	Galena; Bourmonita
4	Pirita; Arsenopirita; Melnikovita; Marcasita

---

**Análisis de composición de partículas**

Hacer análisis de composición de partículas

Intervalos de tamaño de partículas en  $\mu\text{m}$  - escribir los tamaños para el análisis de composición separados por ',' y en orden creciente

Grupos de minerales para el análisis de composición de partículas

	Nombre del grupo en inglés	Nombre de grupo en español	Minerales en el grupo
1	Cu sulphides	Sulfuros de Cu	Calcopirita; Calcosina; Covelina; Bornita; Digenita; Djurleita
2	Sphalerite	Esfalerita	Esfalerita
3	Pb sulphides	Sulfuros de Pb	Galena; Bourmonita
4	Fe sulphides	Sulfuros de Fe	Pirita; Melnikovita; Marcasita; Pirrotina
5	As&Sb minerals	Minerales de As&Sb	Arsenopirita; Tetrahedrita; Tenantita; Enargita; Luzonita
6	Gangue	Ganga	Ganga*; Rutilo; Titanita

Umbral para tener en cuenta un componente  %

Fig. Caso 2. 1 – Captura de la ventana de configuración de parámetros de análisis de partículas



## ANÁLISIS DE PARTÍCULAS

Muestra: Q:/AMCO\_samples/XXXX/XXXX-M02F/A4\_20x\_2000x2000.smpl

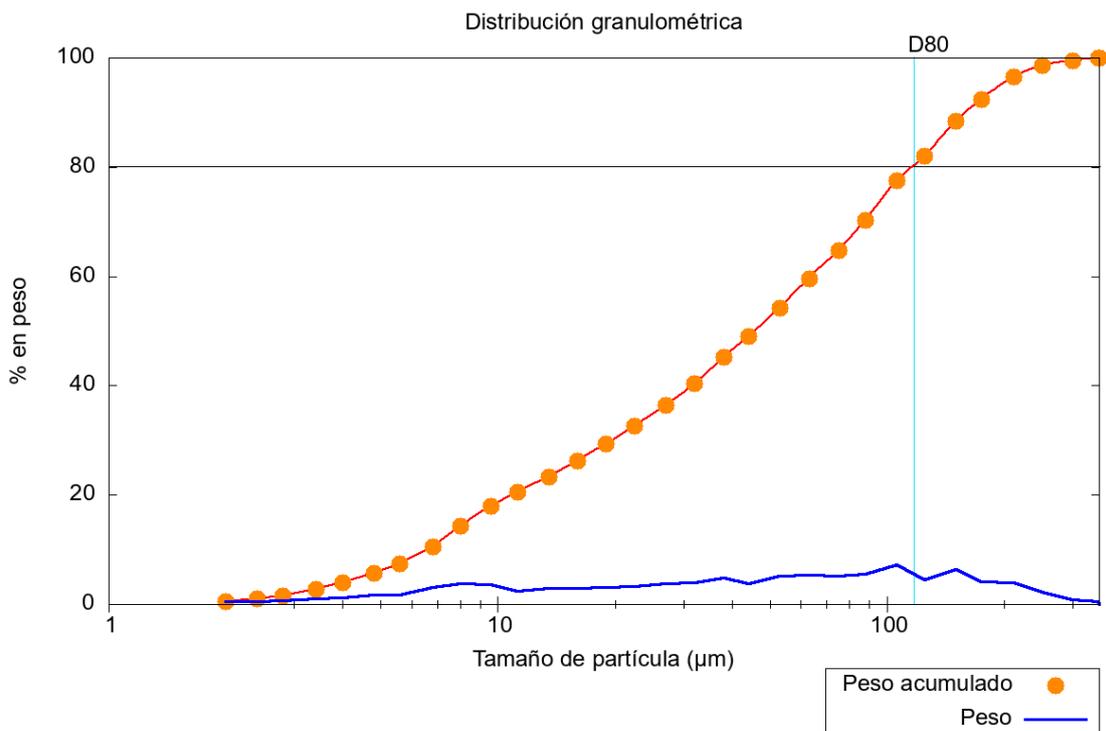
Fecha hora: 2022-03-14 10:55

### Distribución granulométrica

Intervalo de tamaño (µm)	% en peso	% acumulado
[0; 2)	0,50	0,50
[2; 2,4)	0,50	0,99
[2,4; 2,8)	0,63	1,62
[2,8; 3,4)	1,10	2,72
[3,4; 4)	1,21	3,93
[4; 4,8)	1,72	5,65
[4,8; 5,6)	1,76	7,41
[5,6; 6,8)	3,12	10,53
[6,8; 8)	3,86	14,39
[8; 9,6)	3,61	18,00
[9,6; 11,2)	2,47	20,47
[11,2; 13,5)	2,94	23,40
[13,5; 16)	2,89	26,30
[16; 19)	3,04	29,34
[19; 22,4)	3,30	32,64
[22,4; 27)	3,73	36,37

Intervalo de tamaño (µm)	% en peso	% acumulado
[27; 32)	4,01	40,38
[32; 38)	4,80	45,18
[38; 44)	3,81	48,99
[44; 53)	5,24	54,23
[53; 63)	5,41	59,64
[63; 75)	5,11	64,76
[75; 88)	5,59	70,34
[88; 106)	7,21	77,56
[106; 125)	4,49	82,04
[125; 150)	6,32	88,37
[150; 175)	4,11	92,48
[175; 212)	3,99	96,47
[212; 250)	2,18	98,64
[250; 300)	0,84	99,48
[300; 350)	0,52	100,00
[350; ∞)	0,00	100,00

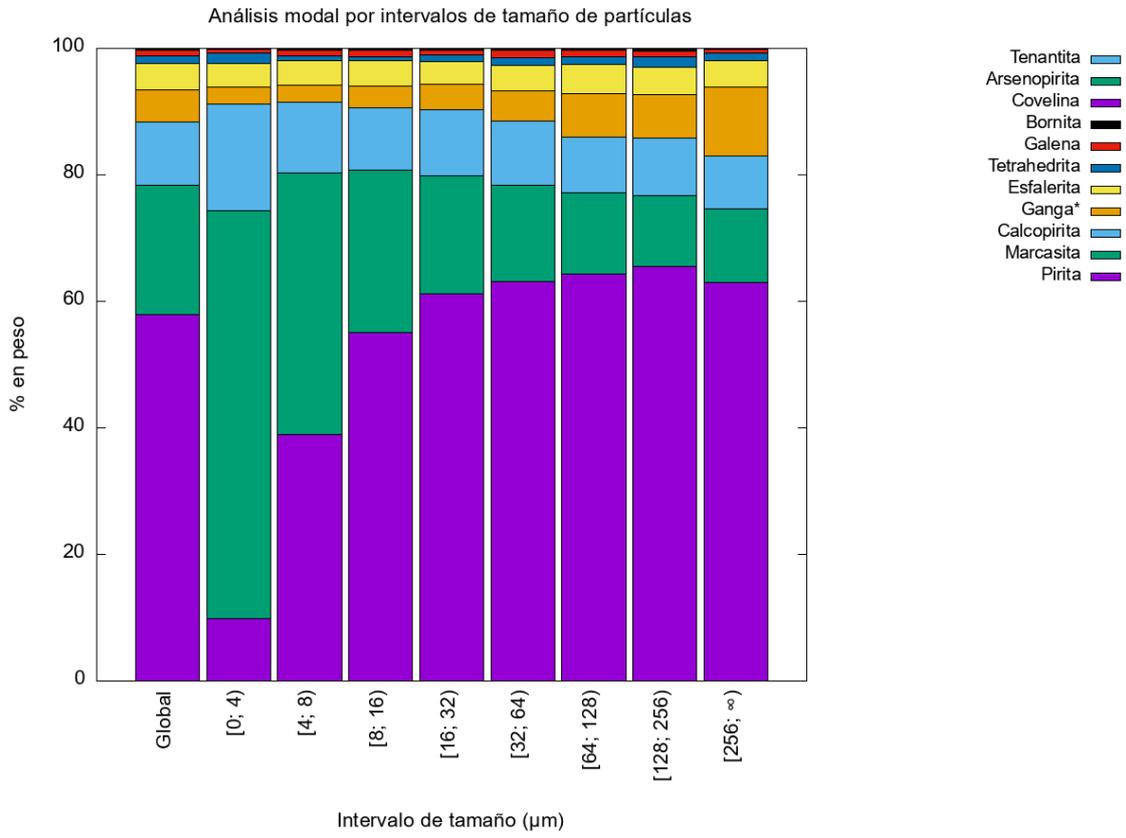
D80 = 116,35 µm



## Análisis modal por intervalos de tamaño de partículas

Análisis modal por intervalos de tamaño de partículas la suma de todas las celdas (intervalo de tamaño, mineral) es 100%									
% en peso		Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )							
		[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )
Minerales	Total	3,93	10,46	11,91	14,08	19,92	22,91	15,56	1,22
Pirita	57,91	0,38	4,07	6,57	8,61	12,59	14,74	10,19	0,77
Marcasita	20,43	2,54	4,33	3,05	2,64	3,02	2,95	1,76	0,14
Calcopirita	10,02	0,66	1,17	1,18	1,46	2,01	2,02	1,41	0,10
Ganga*	5,10	0,11	0,29	0,40	0,57	0,97	1,57	1,06	0,13
Esfalerita	4,12	0,15	0,40	0,48	0,52	0,80	1,04	0,69	0,05
Tetrahedrita	1,16	0,06	0,09	0,08	0,13	0,23	0,30	0,26	0,02
Galena	0,94	0,02	0,09	0,11	0,11	0,23	0,22	0,14	0,01
Bornita	0,22	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,04	0,00
Covelina	0,08	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
Arsenopirita	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Tenantita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

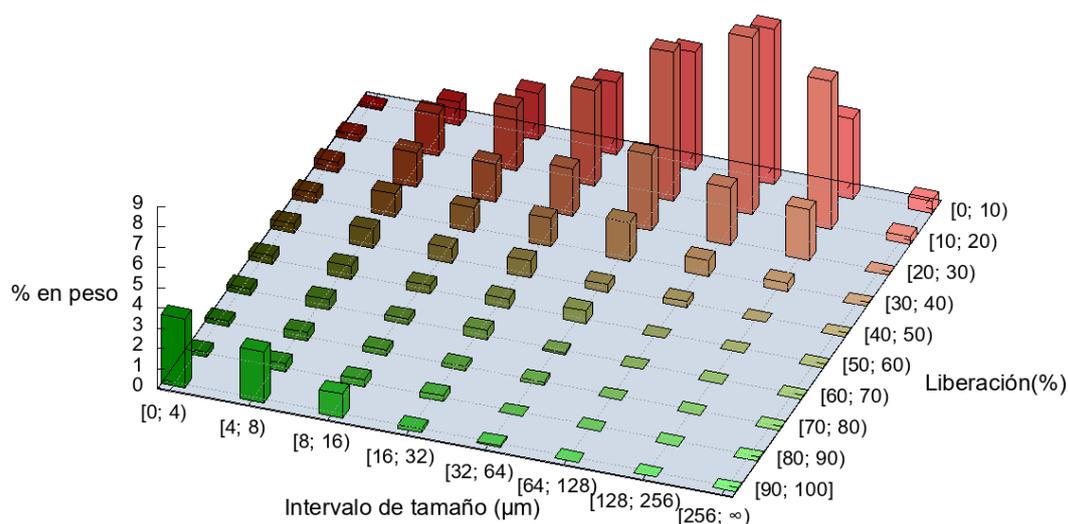
Análisis modal por intervalos de tamaño de partículas la suma de cada columna (intervalo de tamaño) es 100%									
% en peso		Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )							
Minerales	Total	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )
Pirita	57,91	9,78	38,89	55,14	61,16	63,20	64,31	65,45	63,03
Marcasita	20,43	64,51	41,37	25,59	18,75	15,18	12,86	11,33	11,54
Calcopirita	10,02	16,85	11,17	9,94	10,34	10,10	8,83	9,05	8,43
Ganga*	5,10	2,70	2,78	3,34	4,04	4,86	6,86	6,82	10,94
Esfalerita	4,12	3,76	3,82	4,02	3,69	4,03	4,53	4,41	4,09
Tetrahedrita	1,16	1,63	0,82	0,70	0,91	1,15	1,30	1,64	1,24
Galena	0,94	0,55	0,90	0,93	0,78	1,16	0,97	0,92	0,51
Bornita	0,22	0,09	0,10	0,17	0,20	0,24	0,26	0,28	0,21
Covelina	0,08	0,11	0,08	0,08	0,06	0,07	0,07	0,09	0,01
Arsenopirita	0,03	0,03	0,08	0,09	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Tenantita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



## Liberación de grupos minerales por intervalos de tamaño de partículas

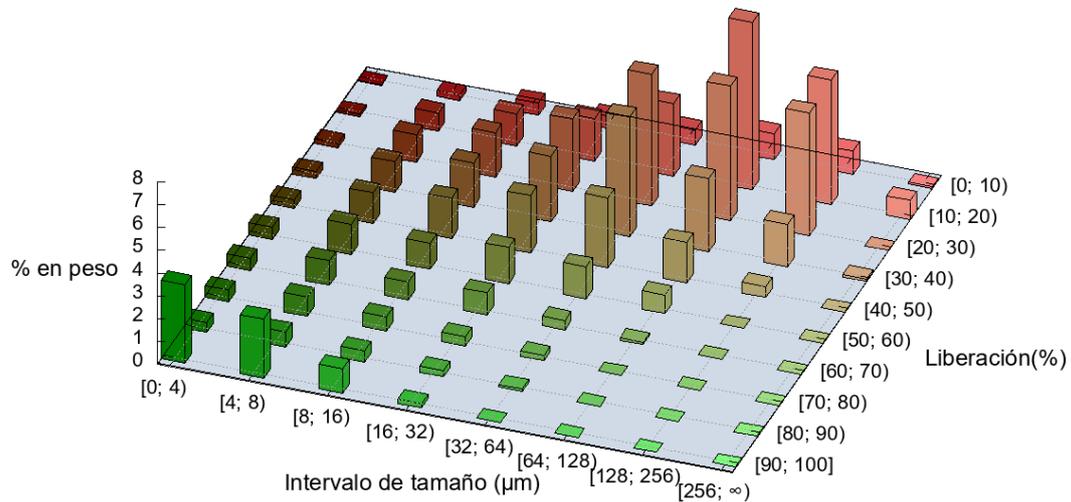
Liberación por composición de Calcopirita + Calcosina + Covelina + Bornita + Digenita + Djurleita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,10	1,13	2,30	3,57	5,78	7,65	3,96	0,66	25,15
[10; 20)	0,31	2,09	3,13	4,69	7,31	8,75	7,37	0,37	34,02
[20; 30)	0,49	1,69	1,88	2,37	3,78	2,90	2,50	0,00	15,61
[30; 40)	0,51	1,19	1,19	1,40	1,92	0,79	0,40	0,00	7,40
[40; 50)	0,47	0,92	0,73	0,84	0,40	0,29	0,00	0,00	3,65
[50; 60)	0,41	0,63	0,42	0,48	0,62	0,00	0,00	0,00	2,56
[60; 70)	0,32	0,52	0,28	0,45	0,07	0,00	0,00	0,00	1,64
[70; 80)	0,24	0,42	0,30	0,20	0,15	0,00	0,00	0,00	1,31
[80; 90)	0,24	0,41	0,35	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,29
[90; 100]	3,42	2,51	1,18	0,18	0,08	0,00	0,00	0,00	7,37

Liberación por composición de Calcopirita + Calcosina + Covelina + Bornita + Digenita + Djurleita



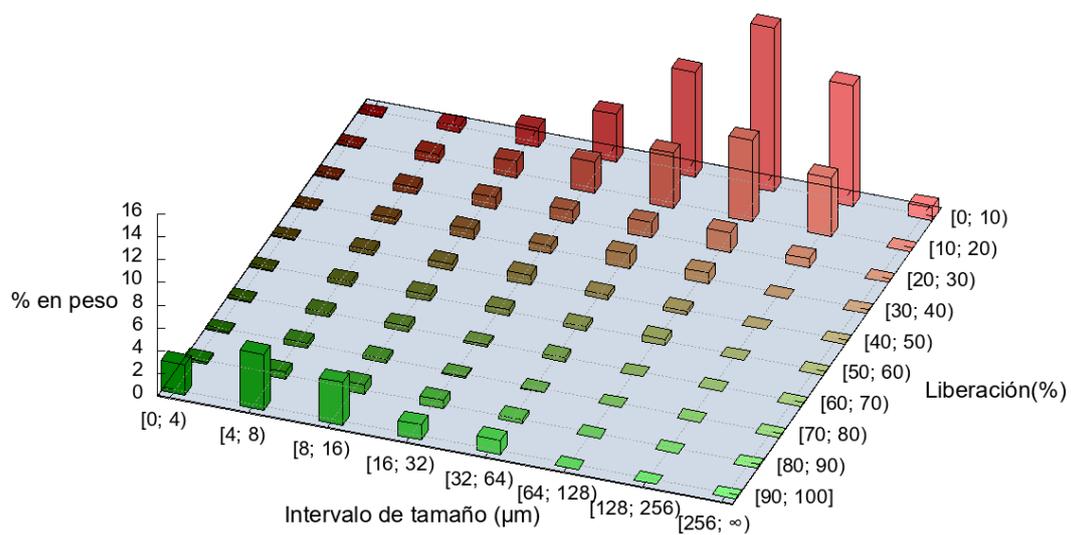
Liberación por superficie de Calcopirita + Calcosina + Covelina + Bornita + Digenita + Djurleita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,05	0,24	0,54	0,54	0,66	1,15	1,03	0,08	4,29
[10; 20)	0,10	0,82	1,42	1,87	3,16	7,39	5,49	0,84	21,08
[20; 30)	0,20	1,23	1,95	3,20	5,80	5,94	5,40	0,00	23,73
[30; 40)	0,30	1,39	1,98	2,92	5,29	3,22	1,85	0,10	17,04
[40; 50)	0,39	1,34	1,75	2,52	3,05	1,76	0,47	0,00	11,29
[50; 60)	0,53	1,33	1,14	1,60	1,39	0,81	0,00	0,00	6,80
[60; 70)	0,54	1,08	0,81	0,97	0,41	0,10	0,00	0,00	3,91
[70; 80)	0,50	0,84	0,63	0,41	0,23	0,00	0,00	0,00	2,60
[80; 90)	0,43	0,66	0,49	0,28	0,12	0,00	0,00	0,00	1,98
[90; 100]	3,46	2,59	1,06	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	7,29

Liberación por superficie de Calcopirita + Calcosina + Covelina + Bornita + Digenita + Djurleita



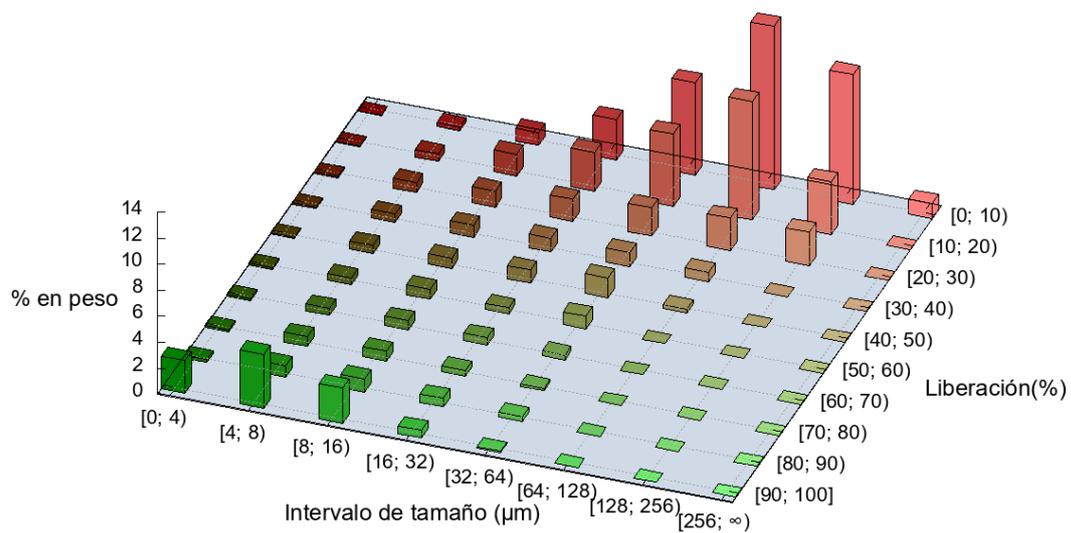
Liberación por composición de Esfalerita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,06	0,53	1,67	4,20	9,18	14,36	10,63	1,21	41,84
[10; 20)	0,08	0,81	1,48	2,71	4,81	7,20	5,23	0,00	22,32
[20; 30)	0,10	0,63	1,05	1,18	1,36	1,74	0,79	0,00	6,86
[30; 40)	0,09	0,55	0,86	0,69	1,30	0,96	0,00	0,00	4,45
[40; 50)	0,09	0,39	0,58	0,88	0,45	0,34	0,00	0,00	2,73
[50; 60)	0,11	0,37	0,56	0,55	0,36	0,57	0,00	0,00	2,52
[60; 70)	0,10	0,40	0,50	0,20	0,35	0,00	0,00	0,00	1,55
[70; 80)	0,10	0,46	0,37	0,10	0,07	0,00	0,00	0,00	1,09
[80; 90)	0,20	0,63	0,82	0,75	0,36	0,00	0,00	0,00	2,76
[90; 100]	2,66	4,91	3,73	1,33	1,25	0,00	0,00	0,00	13,88

Liberación por composición de Esfalerita



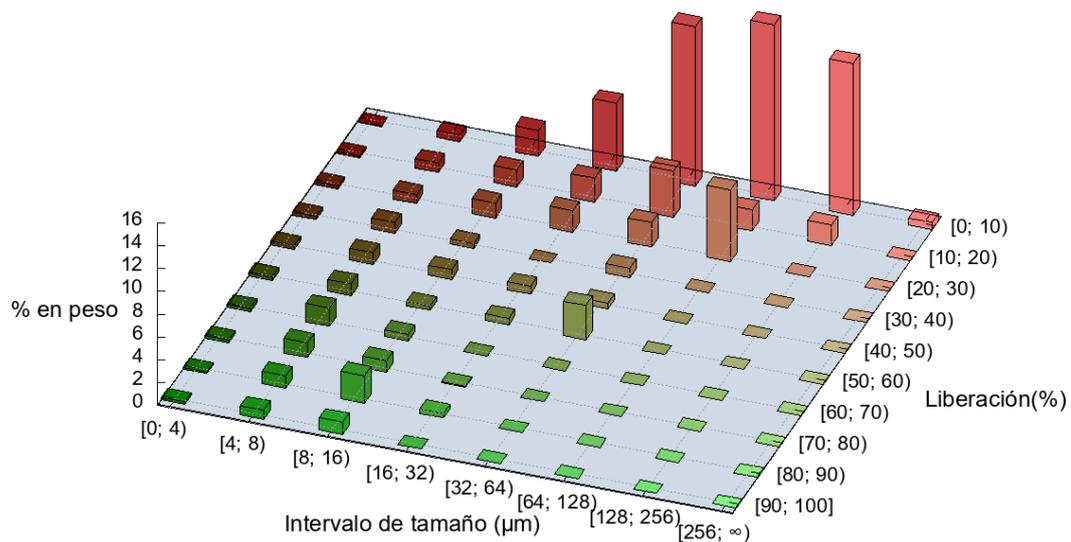
Liberación por superficie de Esfalerita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,04	0,26	0,97	3,10	7,06	12,53	9,97	1,21	35,12
[10; 20)	0,06	0,58	1,68	2,97	5,52	9,12	4,11	0,00	24,05
[20; 30)	0,10	0,75	1,26	1,75	2,24	2,52	2,57	0,00	11,19
[30; 40)	0,11	0,68	0,91	1,05	1,12	0,74	0,00	0,00	4,62
[40; 50)	0,11	0,62	0,80	1,00	1,52	0,27	0,00	0,00	4,33
[50; 60)	0,14	0,51	0,78	0,48	0,98	0,00	0,00	0,00	2,88
[60; 70)	0,13	0,53	0,73	0,56	0,36	0,00	0,00	0,00	2,31
[70; 80)	0,15	0,74	0,77	0,44	0,19	0,00	0,00	0,00	2,29
[80; 90)	0,22	0,89	1,01	0,67	0,38	0,00	0,00	0,00	3,17
[90; 100]	2,52	4,13	2,69	0,58	0,12	0,00	0,00	0,00	10,05

Liberación por superficie de Esfalerita



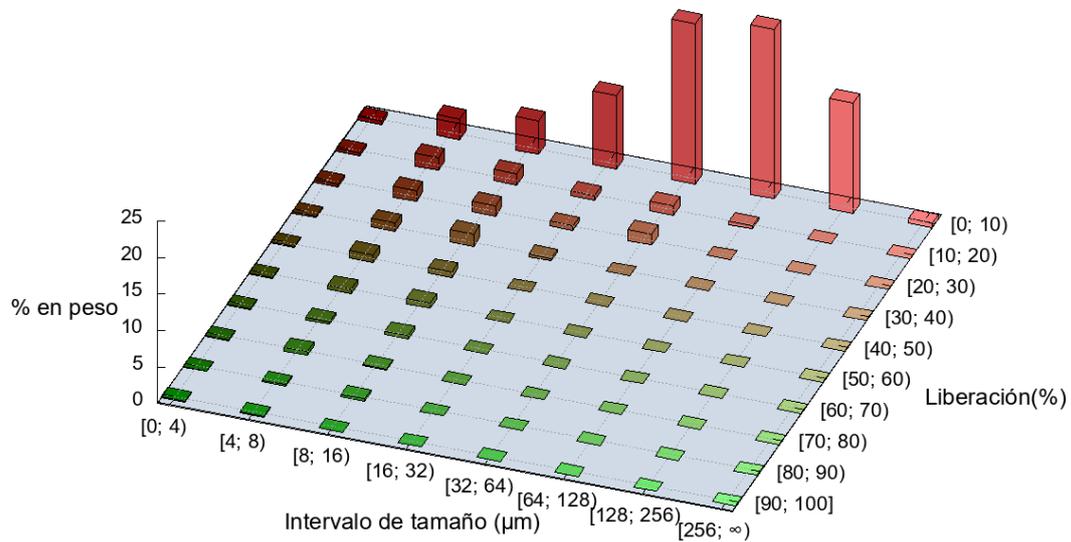
Liberación por composición de Galena + Bournonita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,04	0,59	2,27	5,95	13,98	15,40	13,31	0,66	52,21
[10; 20)	0,16	0,84	1,52	2,10	4,05	1,91	1,84	0,00	12,41
[20; 30)	0,22	0,77	1,35	1,99	2,22	6,36	0,00	0,00	12,91
[30; 40)	0,28	1,01	0,41	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	2,55
[40; 50)	0,34	1,03	0,84	0,67	0,53	0,00	0,00	0,00	3,42
[50; 60)	0,34	1,02	0,37	0,58	3,02	0,00	0,00	0,00	5,34
[60; 70)	0,29	1,60	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,49
[70; 80)	0,25	1,28	1,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60
[80; 90)	0,15	1,11	2,40	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	4,02
[90; 100]	0,23	0,80	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,07

Liberación por composición de Galena + Bournonita



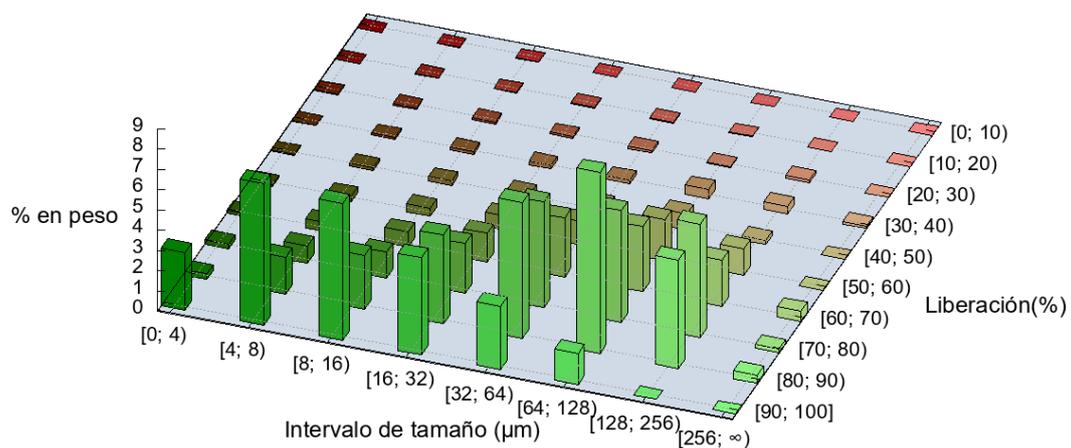
Liberación por superficie de Galena + Bournonita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño (µm)								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; ∞)	
[0; 10)	0,56	2,81	4,61	10,08	21,93	23,22	15,15	0,66	79,02
[10; 20)	0,35	1,75	1,59	0,63	1,24	0,45	0,00	0,00	6,01
[20; 30)	0,35	1,46	1,48	0,65	1,48	0,00	0,00	0,00	5,41
[30; 40)	0,22	1,20	1,70	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50
[40; 50)	0,20	1,05	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96
[50; 60)	0,15	0,57	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
[60; 70)	0,12	0,37	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
[70; 80)	0,08	0,51	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
[80; 90)	0,08	0,22	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59
[90; 100]	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31

Liberación por superficie de Galena + Bournonita



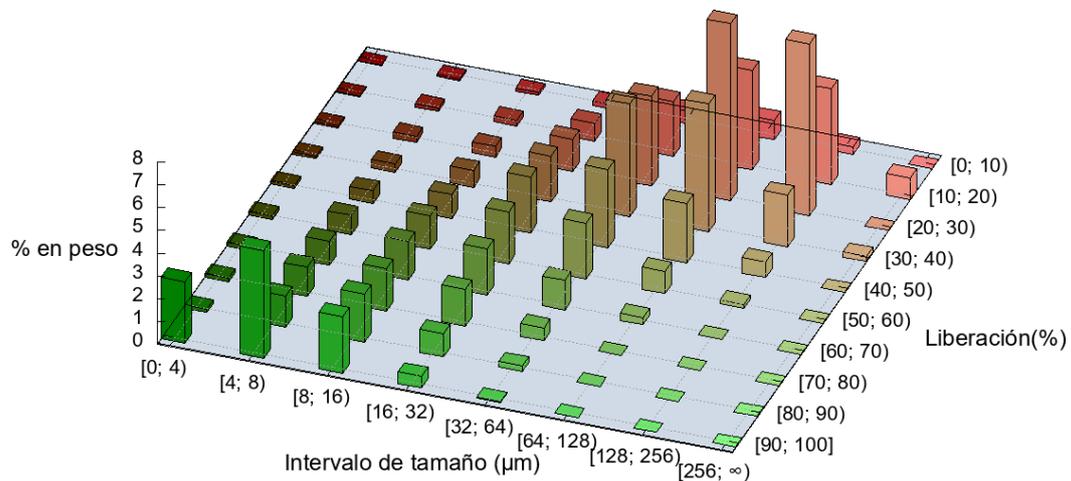
Liberación por composición de Pirita + Arsenopirita + Melnikovita + Marcasita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
[10; 20)	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,00	0,00	0,18
[20; 30)	0,02	0,06	0,09	0,08	0,11	0,06	0,14	0,00	0,56
[30; 40)	0,03	0,10	0,13	0,19	0,19	0,45	0,37	0,11	1,57
[40; 50)	0,05	0,15	0,21	0,32	0,47	0,79	0,21	0,00	2,20
[50; 60)	0,10	0,26	0,39	0,70	1,17	2,04	1,31	0,00	5,96
[60; 70)	0,16	0,45	0,75	1,42	2,90	3,21	2,29	0,49	11,68
[70; 80)	0,22	0,86	1,28	2,44	5,21	5,52	5,58	0,17	21,29
[80; 90)	0,28	1,82	2,65	4,38	6,73	8,92	5,34	0,39	30,51
[90; 100]	2,86	6,98	6,73	4,79	3,12	1,53	0,00	0,00	26,02

Liberación por composición de Pirita + Arsenopirita + Melnikovita + Marcasita



Liberación por superficie de Pirita + Arsenopirita + Melnikovita + Marcasita									
Distribución del % en peso por intervalos de tamaño y liberación									
Liberación(%)	Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )								Total
	[0; 4)	[4; 8)	[8; 16)	[16; 32)	[32; 64)	[64; 128)	[128; 256)	[256; $\infty$ )	
[0; 10)	0,02	0,07	0,12	0,21	0,55	0,84	0,35	0,00	2,16
[10; 20)	0,04	0,15	0,27	0,78	2,40	4,39	4,24	0,95	13,21
[20; 30)	0,07	0,27	0,48	1,44	3,97	7,80	7,56	0,00	21,59
[30; 40)	0,11	0,39	0,74	2,05	4,99	5,64	2,25	0,21	16,38
[40; 50)	0,13	0,56	1,04	2,45	3,43	2,60	0,68	0,00	10,89
[50; 60)	0,18	0,84	1,46	2,29	2,45	0,97	0,18	0,00	8,37
[60; 70)	0,18	1,07	1,71	2,03	1,29	0,30	0,00	0,00	6,56
[70; 80)	0,15	1,28	1,88	1,61	0,56	0,02	0,00	0,00	5,49
[80; 90)	0,14	1,38	2,10	1,02	0,25	0,00	0,00	0,00	4,90
[90; 100]	2,71	4,71	2,47	0,50	0,05	0,00	0,00	0,00	10,45

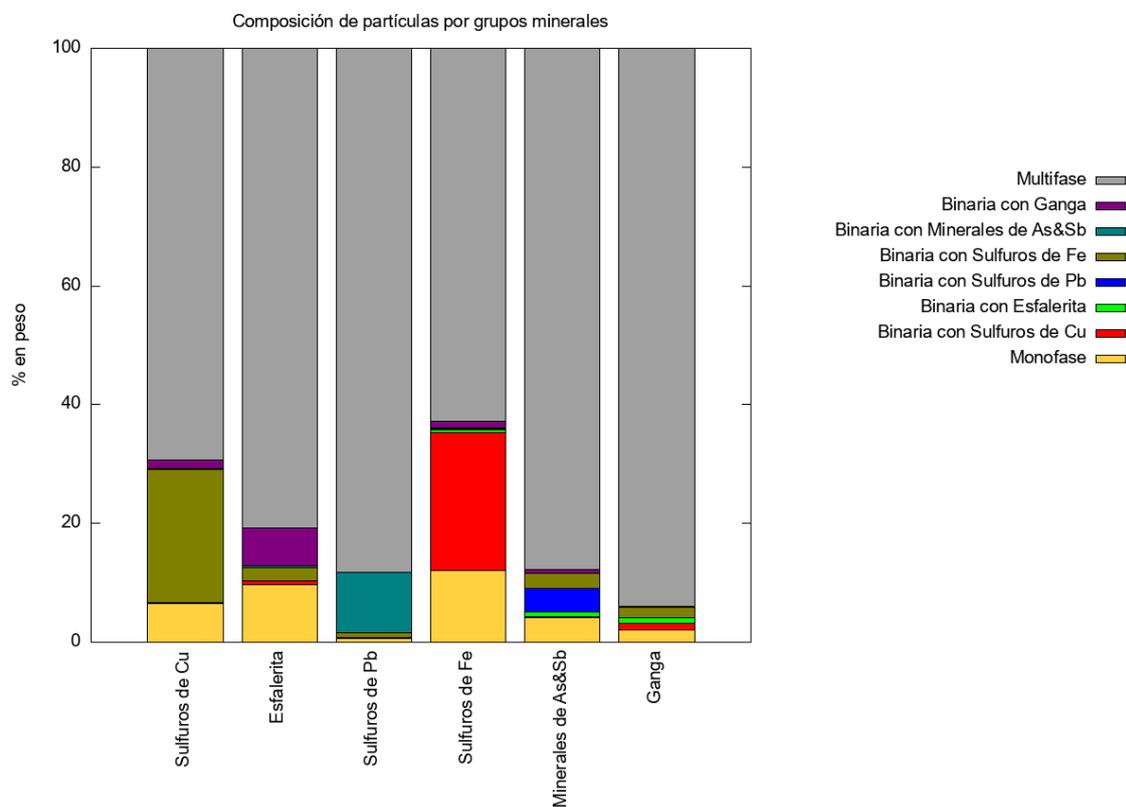
Liberación por superficie de Pirita + Arsenopirita + Melnikovita + Marcasita



## Composición de partículas por grupos minerales e intervalos de tamaño de partículas

Definición de grupos	
Grupo	Minerales
■ [1] Sulfuros de Cu	Calcopirita + Calcosina + Covelina + Bornita + Digenita + Djurleita
■ [2] Esfalerita	Esfalerita
■ [3] Sulfuros de Pb	Galena + Bournonita
■ [4] Sulfuros de Fe	Pirita + Melnikovita + Marcasita + Pirrotina
■ [5] Minerales de As&Sb	Arsenopirita + Tetrahedrita + Tenantita + Enargita + Luzonita
■ [6] Ganga	Ganga* + Rutilo + Titanita

Composición de partículas por grupos minerales - % en peso								
Grupo	Monofase	Binaria						Multifase
		■ [1]	■ [2]	■ [3]	■ [4]	■ [5]	■ [6]	
■ [1] Sulfuros de Cu	6,44	☒	0,23	0,01	22,48	0,03	1,56	69,26
■ [2] Esfalerita	9,66	0,65	☒	0,10	2,08	0,35	6,43	80,72
■ [3] Sulfuros de Pb	0,69	0,04	0,09	☒	0,84	10,16	0,00	88,18
■ [4] Sulfuros de Fe	12,05	23,24	0,56	0,09	☒	0,18	1,05	62,83
■ [5] Minerales de As&Sb	4,09	0,22	0,77	3,91	2,55	☒	0,71	87,74
■ [6] Ganga	2,11	1,09	0,86	0,00	1,86	0,05	☒	94,04



■ [1] Sulfuros de Cu								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		■ [1]	■ [2]	■ [3]	■ [4]	■ [5]	■ [6]	
[0; 4)	3,17	☒	0,06	0,00	2,57	0,02	0,35	0,37
[4; 8)	2,19	☒	0,08	0,00	5,88	0,01	0,61	2,77
[8; 16)	0,90	☒	0,08	0,00	4,83	0,01	0,40	5,45
[16; 32)	0,10	☒	0,01	0,00	3,73	0,00	0,20	10,38
[32; 64)	0,08	☒	0,00	0,00	3,30	0,00	0,00	16,76
[64; 128)	0,00	☒	0,00	0,00	2,06	0,00	0,00	18,37
[128; 256)	0,00	☒	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	14,13
[256; ∞)	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,03

■ [2] Esfalerita								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		■ [1]	■ [2]	■ [3]	■ [4]	■ [5]	■ [6]	
[0; 4)	2,54	0,07	☒	0,00	0,20	0,06	0,57	0,34
[4; 8)	4,07	0,21	☒	0,00	0,66	0,19	1,90	3,15
[8; 16)	2,49	0,22	☒	0,04	0,60	0,10	1,65	6,94
[16; 32)	0,47	0,16	☒	0,06	0,25	0,00	1,08	10,42
[32; 64)	0,09	0,00	☒	0,00	0,08	0,00	1,23	17,70
[64; 128)	0,00	0,00	☒	0,00	0,29	0,00	0,00	24,44
[128; 256)	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	0,00	16,48
[256; ∞)	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	0,00	1,26

■ [3] Sulfuros de Pb								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		■ [1]	■ [2]	■ [3]	■ [4]	■ [5]	■ [6]	
[0; 4)	0,20	0,01	0,04	☒	0,08	2,02	0,00	0,38
[4; 8)	0,22	0,03	0,00	☒	0,22	4,95	0,00	6,47
[8; 16)	0,27	0,00	0,01	☒	0,29	3,12	0,00	10,10
[16; 32)	0,00	0,00	0,04	☒	0,20	0,07	0,00	12,16
[32; 64)	0,00	0,00	0,00	☒	0,05	0,00	0,00	25,32
[64; 128)	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	21,43
[128; 256)	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	12,32
[256; ∞)	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	0,00	0,00

■ [4] Sulfuros de Fe								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
[0; 4)	2,62	0,90	0,03	0,00	☒	0,02	0,06	0,09
[4; 8)	4,60	4,39	0,17	0,01	☒	0,06	0,27	1,22
[8; 16)	2,95	5,33	0,17	0,02	☒	0,08	0,23	3,49
[16; 32)	1,18	5,04	0,08	0,03	☒	0,03	0,18	7,83
[32; 64)	0,51	4,54	0,08	0,02	☒	0,00	0,08	14,70
[64; 128)	0,19	2,97	0,04	0,00	☒	0,00	0,23	19,14
[128; 256)	0,00	0,06	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	15,20
[256; ∞)	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	0,00	1,16

■ [5] Minerales de As&Sb								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
[0; 4)	3,52	0,13	0,41	1,81	0,52	☒	0,50	0,96
[4; 8)	0,34	0,08	0,31	1,76	1,06	☒	0,19	7,56
[8; 16)	0,23	0,01	0,05	0,33	0,85	☒	0,02	9,24
[16; 32)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12	☒	0,00	12,63
[32; 64)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	18,28
[64; 128)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	20,36
[128; 256)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	18,15
[256; ∞)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	0,00	0,56

■ [6] Ganga								
Intervalo de tamaño (µm)	Monofase	Binaria						Multifase
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
[0; 4)	1,02	0,29	0,17	0,00	0,28	0,03	☒	0,38
[4; 8)	0,79	0,54	0,43	0,00	0,79	0,02	☒	3,24
[8; 16)	0,27	0,19	0,18	0,00	0,41	0,01	☒	6,61
[16; 32)	0,02	0,06	0,05	0,00	0,14	0,00	☒	10,42
[32; 64)	0,00	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	☒	18,48
[64; 128)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	☒	30,82
[128; 256)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	21,33
[256; ∞)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	☒	2,75