

Estudio mineralógico y cuantificación  
por análisis digital de imagen de una  
mena Ag-Sn-Zn. Argentina.  
Aplicación a la mejora del proceso  
mineralúrgico

Mineralogy and quantification study  
by digital image analysis from a mena  
Ag-Sn-Zn. Argentina.  
Application to the improvement of  
the mineralurgical process

Elber Quispe<sup>1</sup>  
Javier Santos <sup>1</sup>  
Fernando Quispe<sup>1</sup>  
Graciela Castro<sup>1,2</sup>  
Mariel Negrelli<sup>1,2</sup>

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Minas, Av. Libertador 1109 (O) Capital 5400. San Juan.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Mineras Av. Libertador 1109 (O) Capital 5400. San Juan.



## RESUMEN

La mineralogía es una de las ciencias de mayor aplicación en la industria minera, por ello es importante conocer profundamente el comportamiento cualitativo y cuantitativo de los minerales en todas las fases del proceso minero.

En la actualidad existen diversas técnicas de estudio, que se apoyan en instrumentos costosos y de difícil mantenimiento como el Microscopio Electrónico de Barrido, Difracción de rayos X y Espectrómetros, que permiten obtener información cualitativa y cuantitativa de la mineralogía, de manera objetiva y precisa.

Con la aplicación de esta nueva técnica de análisis, “Análisis Digital de Imagen” (ADI) como complemento del estudio mineralógico óptico tradicional, ha podido determinar cuantitativamente las partículas de minerales presentes.

Para tal objetivo, las muestras analizadas pertenecen a una mena de Sn-Ag-Zn correspondiente a un depósito diseminado de baja ley, encontrándose sulfosales portadoras de plata.

Mediante microscopía óptica y el empleo del software de ADI se analizaron muestra cabeza, concentrado y cola, identificando las especies minerales y cuantificación de las mismas. Para la confirmación de partículas muy finas de sulfosales de plata contenidas en el concentrado, se utilizó el método de Difracción de Rayos X y SEM - EDS.

Los resultados muestran que la aplicación de estas técnicas brinda al mineralurgista información cuantitativa de tipo mineralógico, para su investigación.

El porcentaje en peso de los minerales valiosos en el concentrado, es aproximadamente 4,5 a 5 %. Las especies valiosas que se identificaron a través de Difracción de Rayos X fueron: Argentopirita, Pirargirita, Wurtzita-2H, Freibergita, Esfalerita, Ramdhorita, Pirquitasita, Fizelyta y Dickita.

**Palabras Clave:** Análisis Digital de Imagen,

## ABSTRACT

Mineralogy is one of the most applied sciences in the mining industry, so it is important to know deeply the qualitative and quantitative behavior of minerals in all phases of the mining process.

At present, there are several study techniques that rely on expensive and difficult maintenance instruments such as the Scanning Electron Microscope, X-ray Diffraction and Spectrometers, which allow to obtain qualitative and quantitative information of the mineralogy, objectively and precisely.

With the application of this new analysis technique, “Digital Image Analysis” (ADI) as a complement to the traditional optical mineralogical study, has been able to quantitatively determine the mineral particles present.

For this purpose, the analyzed samples belong to a Sn-Ag-Zn ore corresponding to a low-grade disseminated deposit, with sulfosal silver carriers being found.

By means of optical microscopy and the use of the ADI software, head, concentrate and tail samples were analyzed, identifying the mineral species and quantifying them. For the confirmation of very fine silver sulfosal particles contained in the concentrate, the X-Ray Diffraction and SEM-EDS method was used.

The results show that the application of these techniques gives the mineralurgist quantitative information of mineralogical type, for its investigation.

The percentage by weight of the valuable minerals in the concentrate is approximately 4.5 to 5%. The valuable species that were identified through X-ray diffraction were: Argentopyrite, Pirargirita, Wurtzita-2H, Freibergita, Sphalerite, Ramdhorita, Pirquitasita, Fizeleyta and Dickita.

**Keywords:** Digital Image Analysis

## INTRODUCCIÓN

El estudio mineralógico de una mena abarca partes cualitativas y cuantitativas como la identificación, descripción, análisis y cuantificación, entre otros. Los métodos y procesos que podemos utilizar para implicar el estudio mineralógico son variados y su uso va a depender de la muestra problema que se requiera analizar. El presente trabajo, se basa en el análisis de una mena metálica de Ag – Sn – Zn mediante microscopía óptica por reflexión, con el apoyo de la técnica ADI. Por tal motivo, el objetivo de ésta investigación, es presentar las posibilidades que ofrece la técnica de ADI (Análisis digital de imagen) como

complemento de las técnicas tradicionales de microscopía. Concretamente, su aplicación se enfoca en la cuantificación automática y/o semiautomática de parámetros geométricos de fases minerales presentes en probetas pulidas.

La parte cualitativa del estudio mineralógico se basa en la identificación de fases minerales visibles en probetas pulidas mediante ADI y microscopio de reflexión. Para su desenlace, ha sido necesario obtener una probeta de muestra óptima y homogénea procurando una calidad de pulido buena, normalizar la puesta a punto del software ADI y aplicar el análisis sobre la imagen en color obtenida.

La técnica de análisis digital de imagen pretende ofrecer un soporte numérico de cuantificación que complementen a los estudios tradicionales de microscopía. Para obtener resultados confiables, cada paso del procedimiento de ADI debe ser desarrollado siguiendo una metodología rígida que garantice la reproducibilidad de las medidas y la identificación de las posibles fuentes de error. (Berrezueta, 2002).

La representatividad estadística de las medidas obtenidas del conjunto de imágenes, estará condicionada al cumplimiento de un estricto proceso de muestreo en la selección de la muestra. Esto es, cumplir el requisito de aleatoriedad a fin de que la imagen no represente una infama parte del producto a caracterizar. Es importante además mencionar que una imagen digital es tan solo una representación bidimensional del cuerpo u objeto tridimensional a caracterizar.

El uso de imágenes, en la cuantificación mineralógica, representa un avance en comparación a técnicas como el conteo de puntos (Pirard, 2004; Berrezueta, 2004) y una alternativa menos costosa a sistemas más desarrollados como Quantitative Evaluation of Materials by Electron Microscopy (QEMSCAN) o Mineral Liberation Analyzer (MLA) sistemas basados en la microscopía electrónica. La técnica ADI, en comparación a los demás sistemas, ofrece una mayor versatilidad, agilidad y sistematización, lo que permite aumentar la base de observación y automatizar el tratamiento matemático de los datos, generando resultados más fiables y rápidos.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

La metodología del trabajo consistió en realizar una caracteriza-

ción química y mineralógica de la muestra obtenida en las diferentes etapas del tratamiento mineral por flotación: M1 (Alimentación), M2 (Concentrado Final) y M3 (Cola Final).

La caracterización química de las muestras M1 y de los diferentes productos (M2 y M3) se efectuó por el método ICP (plasma de acoplamiento inductivo).

La caracterización mineralógica fue realizada por el siguiente instrumental:

Microscopio Óptico de Polarización Leica DM 2700 P con luz reflejada y transmitida. Provisto de una cámara de video Leica DFC 295 incorporada, con un software computarizado para tratamiento de imágenes (ADI).

Equipo de Difracción de Rayos X Shimadzu modelo 6100, radiación de  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda=1,540600 \text{ \AA}$ ) y Monocromador CM-3121, operado a 30 mA y 20 kV en la fuente de alta tensión y con un ángulo de barrido ( $2\theta$ ) comprendido entre  $5^\circ$  y  $90^\circ$ . Para la interpretación de facies minerales, se empleó el software Match! 3, comparando el difractograma experimental con las distintas especies minerales insertas en la base de datos COD (Crystallography Open Database).

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS), modelo EVO MA10W, original Carl Zeiss.

El análisis cuantitativo fue llevado a cabo por medio del microscopio óptico. Se basó en la medición de áreas y el uso del peso específico sostenido en el principio de "De Lesse", mediante la aplicación del software de Análisis de Imágenes (ADI).

Las muestras analizadas fueron preparadas en probetas pulidas y con una granulometría de tamaño  $-70\# +100\#$  para luz reflejada, para luz transmitida, muestras en grano suelto con líquido de inmersión ( $n=1,54$ ).

La metodología llevada a cabo para la cuantificación se describe a continuación:

1. Adquisición de imagen, mediante el software LAS V4.4, procurando obtener unas series de imágenes a color que sean nítidas y homogéneas.

2. Procesamiento de imagen utilizando ADI, el software opera mediante varias secuencias de herramientas, la misma sigue el siguiente orden: selección de imagen, pre filtro de imagen, ajuste de umbral, pre filtro binario, edición binaria, selección resultado, histo-

grama.

De todos estos pasos mencionados, el más importante es el ajuste de umbral puesto que con el mismo distinguimos las fases de la especie mineral que se desea analizar en el momento. La muestra en cuestión posee tres especies de interés por lo que se tendrá que ajustar el umbral la misma cantidad para el análisis de las distintas especies presentes.

Requerimos el uso de los prefiltros para lograr una buena diferenciación de las especies en cada imagen, en tanto con la edición binaria corregimos las anomalías que se presentaron a lo largo de los análisis. El resultado que nos interesa es porcentaje de área, este valor ADI lo expresa mediante histogramas y números.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de cuantificación mineralógica demostraron que se encuentran en correlación con los ensayos químicos realizados sobre las muestras.

### a. Caracterización Química

La Tabla 1 presenta los resultados del análisis químico de las tres muestras suministradas por la flotación:

Tabla 1: Resultados del Análisis Químico

Muestra	Ag (%)	Zn (%)	Fe (%)
Alimentación	0,014214	0,24	5,83
Concentrado Final	2,0648	5,06	8,21
Cola Final	0,004491	0,22	5,82

### b. Caracterización Mineralógica

#### Análisis Cualitativo

Con la microscopía óptica, se pudo observar la presencia de minerales transparentes y opacos. Los minerales transparente corresponden principalmente a cuarzo, feldspatos y minerales de arcillas (Figura 1). Los opacos reconocidos fueron pirita y esfalerita. Éste último presentaba inclusiones de partículas de calcopiritas y probables sulfosales (Figura 2).



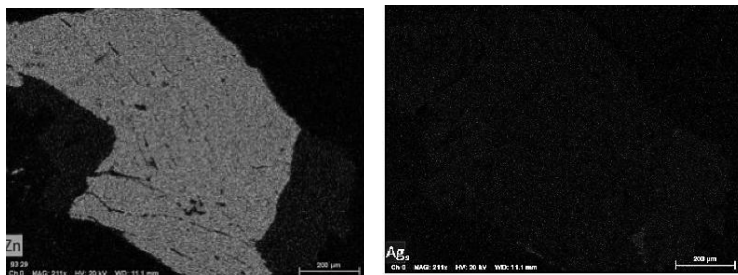


Figura 4: Fotomicrografía mostrando la presencia de plata en la esfalerita.

### Análisis Cuantitativo

Para la cuantificación se utilizaron un número de 40 fotografías por cada briqueta de muestra, donde una fotografía incluye dentro de su campo un promedio aproximadamente de 50 partículas, lo que indica que se contaron aproximadamente 2000 partículas en total por muestra analizada. Las partículas contabilizadas correspondieron a esfalerita, pirita y ganga. En el caso de las sulfosales, no se pueden contabilizar a través del ADI, por lo que se estimó el contenido en la esfalerita presente. Además se relacionó la cuantificación mineralógica con los resultados obtenidos en la caracterización química.

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos por análisis de imágenes y porcentaje en peso de los minerales en cada muestra.

Minerales	Sulfosales	Esfalerita	Pirita	Gangas y otros	Total
Alimentación	0,007	0,090	2,487	97,416	100
Concentrado Final	1,046	1,971	3,695	93,288	100
Cola Final	0,002	0,091	2,468	97,441	100

Alimentación					
Mineral	Porcentaje de área	Peso Específico	Ley %	Elementos	%
Sulfosales	0,007	5,22	0,38	Ag	0,014
Esfalerita	0,091	4	0,64	Zn	0,233
Pirita	2,481	5	0,45	Fe	5,582



<b>Concentrado final</b>					
<b>Mineral</b>	<b>Porcentaje de área</b>	<b>Peso Especifico</b>	<b>Ley %</b>	<b>Elementos</b>	<b>%</b>
<b>Sulfosales</b>	1,046	5,22	0,38	Ag	2,075
<b>Esfalerita</b>	1,973	4	0,64	Zn	5,051
<b>Cola</b>					
<b>Mineral</b>	<b>Porcentaje de área</b>	<b>Peso Especifico</b>	<b>Ley %</b>	<b>Elementos</b>	<b>%</b>
<b>Sulfosales</b>	0,002	5,22	0,38	Ag	0,004
<b>Esfalerita</b>	0,092	4	0,64	Zn	0,236
<b>Pirita</b>	2,462	5	0,45	Fe	5,54

Tabla 2. Resultados por ADI de las muestras Alimentación, Concentrado Final y Cola Final.

Las texturas que presentan las sulfosales se encuadran en el tipo de intercrecimiento de partículas denominado “Emulsión”, en donde una de las fases de éstas se encuentra en forma de minúsculas inclusiones diseminadas dentro de la otra fase.

Este tipo de intercrecimiento responde para el proceso de flotación la fase más abundante, ya que generalmente estas pequeñas inclusiones no suelen superar el 5 % del volumen total de la partícula binaria. Además, su tamaño suele ser inferior a 5  $\mu\text{m}$ , lo cual hace inviable su recuperación por remolienda.

## CONCLUSIONES

La utilización del método ADI en la aplicación de un caso real, ha puesto de manifiesto que la metodología desarrollada es capaz de caracterizar cuantitativamente el tipo de intercrecimiento mineral y proporcionar gran cantidad de información a la que actualmente no todos los mineralurgista pueden acceder mediante el uso de estos sistemas.

En estos casos, el método desarrollado resulta especialmente útil, ya que proporciona información detallada sobre las características texturales de las partículas para cada tipo de intercrecimiento.

Mediante el análisis por microscopía óptica, se identificaron las siguientes especies minerales cuarzo, feldespatos, minerales de arcillas, esfalerita, calcopirita, pirita y probables sulfosales de plata.

Con la aplicación de DRX se pudo corroborar las especies minerales presentes y además, poder distinguir los minerales arcillosos y las variedades de las sulfosales de plata.

Con la técnica de SEM-EDS, se confirmó la inclusión de la plata

en la esfalerita.

## REFERENCIAS

1. Berrezueta, E. y Castroviejo, R. Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico. Rev. Metalurgia, 43 (4), 294-309. 2007.
2. Berrezueta, E. Caracterización de Menas Metálicas mediante Análisis Digital de Imagen: investigación de un sistema experto aplicable a problemas mineros. Tesis Doctoral (Dir. R. Castroviejo), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 2004.
3. Castroviejo, R., Catalina J. C., Bernhardt H.-J, Espí J. A., Eric Pirard, Samper J., Pérez-Barnuevo L. Caracterización y Cuantificación automatizada de menas metálicas mediante Visión Artificial". Simposio Avances recientes en Mineralogía aplicados a Geometalurgia. R4, XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima (Perú). 2008.