



# BALANCE MINERALÓGICO COMO HERRAMIENTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA PRUEBAS DE FLOTACION Y ANÁLISIS DE MINERALOGÍA AUTOMATIZADA

Carolina Elena Moya Cañoles

**Profesor Guía:** MsC. Abraham Elías González Martínez  
**Profesores Comisión:** MsC. Liubow González Martínez  
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

## Resumen.

La tecnología QEMSCAN® ha sido desarrollada para proveer información respecto de la abundancia de las especies minerales, su tamaño de grano, asociaciones con otros minerales, características de liberación, entre otros.

Al área de Mineralogía Avanzada de SGS Chile, se le solicita implementar el balance mineralógico a las muestras producto de las pruebas de flotación (cabezas, concentrados y relaves), como un nuevo control de calidad, tanto para las mismas pruebas, como para los análisis mineralógicos.

El presente estudio tiene como objetivo demostrar que el balance mineralógico es una herramienta útil de control de calidad. Para ello, se analizan las mineralogías de los productos de 244 flotaciones, a través de los métodos BMA y PMA de la tecnología QEMSCAN®.

Se realizan los balances mineralógicos para los sulfuros de cobre y pirita, donde obtenemos cabezas calculadas, las que son determinadas a través de un balance de masa con su concentrado y relave. Estas son comparadas con las cabezas analizadas, dando como resultado correlaciones muy similares entre ellas. Esto permite asegurar que el balance mineralógico es una excelente herramienta para el control de calidad, tanto para las muestras de

flotaciones, como para los análisis de mineralogía entregadas por las lecturas QEMSCAN®.

**Palabras Claves:** Mineralogía Automatizada, QEMSCAN®, Balance Mineralógico, Control de Calidad, Pruebas de Flotación.

## 1 Introducción

La tecnología QEMSCAN® (Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscope" (Sutherland et al, 1987), combina la microscopía electrónica, rayos X y análisis de imágenes de forma automatizada (Sutherland y Gottlieb, 1991; Gottlieb et al, 2000; Gottlieb, 2008; Goodall y Butcher, 2012). Esta técnica ha sido ampliamente aplicada en la industria minera en la caracterización mineralógica, análisis de imágenes en determinaciones modales de especies minerales de mena y ganga, asociaciones mineralógicas y estudios de granulometría y grado de liberación para la geometalurgia (Flores, 2006).

En la actualidad, la mineralogía automatizada permite procesar información capturada de la lectura de productos de chancado y molienda, cuttings de perforación de aire reverso, testigos diamantinos, muestras de mano, particulados, productos procesados, carbón pulverizado, sedimentos, muestras de suelo, metales y escorias, etc.

El presente estudio es realizado en las instalaciones

de SGS Minerals Resources, en la comuna de Pudahuel, en la ciudad de Santiago. Específicamente, en el laboratorio de Mineralogía Automatizada, perteneciente al área de Mineralogía Avanzada (Figura 1).



**Figura 1 Laboratorio de Mineralogía Automatizada. Equipo QEMSCAN®.**

Uno de los principales clientes de SGS, solicita la implementación de un sistema de control de calidad mineralógico más riguroso. Esto incluye homologación de los mineralogistas encargados de analizar las muestras, control de las lecturas mediante muestras duplicadas y balances mineralógicos.

Generar un balance mineralógico para los minerales de mena y ganga, permite tener un control de calidad más exhaustivo de las muestras de cabezas o alimentaciones, concentrados y relaves, producto de las pruebas de flotación, al mismo tiempo que se controla la calidad del análisis mineralógico.

La flotación es el proceso por el cual se recupera mineral de una muestra por medio de reactivos, obteniendo productos como concentrados y relaves.

La calcopirita es el principal mineral de mena del yacimiento, en cambio, la bornita, calcosina y covelina tienen concentraciones más bajas, es por eso que, para efectos de este estudio serán

agrupados en sulfuros de cobre y se les realizará el balance mineralógico como un conjunto. Además, se balanceará como mineral de ganga la pirita.

Se analizaron 244 muestras de cabezas, 244 muestras de concentrados y 244 muestras de relaves.

### **1.1 Objetivo General**

El objetivo general es demostrar que el balance mineralógico es una herramienta útil del control de calidad de pruebas de flotación y del propio análisis mineralógicos con la tecnología QEMSCAN®.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son:

- Revisar los protocolos e instructivos de lecturas de equipos y control de calidad de briquetas.
- Revisar, analizar e interpretar la mineralogía de las muestras provenientes de las pruebas de flotación.
- Desarrollar una metodología para el balance mineralógico.

### **1.3 Agradecimientos**

Agradecer al gerente de Mineralogía Avanzada por permitir el uso de los datos para este estudio. Al grupo de mineralogistas del área, en especial a Tania, Paulina y Felipe, muchas gracias por su apoyo. Un especial agradecimiento a mi amigo César, por su incondicionalidad. Por último, a todos quienes componen el equipo de preparación y lectura del laboratorio que, sin duda, son un gran valor para que los productos finales sean de calidad.

## **2 Definición del Problema**

Debido a que la mineralogía ha tomado una mayor importancia en la caracterización de los modelos geometalúrgicos de corto y largo plazo, es fundamental generar una mejora en el control de calidad de las pruebas de flotación y de los análisis mineralógicos a través de la tecnología QEMSCAN®, ya que en el pasado solo era controlado con muestras duplicadas y conciliación con leyes químicas versus leyes estequiométricas.

Algunos de los principales problemas que se tenían eran:

- Cruce o cambio de muestra, ya que no existía un

chequeo al momento exacto del análisis de las muestras ingresadas al laboratorio de mineralogía avanzada y solo se reflejaba al momento del estudio final de los resultados.

- Utilización de distintos análisis y técnicas químicas, uno para las muestras de flotación (Absorción atómica) y otro para las muestras mineralógicas (Fluorescencia de rayos X).

### 3 Metodología

Para llegar a desarrollar un balance mineralógico, es necesario el estudio de mineralogía de las muestras, donde se analizaron 244 muestras de cabezas, 244 muestras de concentrados y 244 muestras de relaves.

El proceso es el siguiente:

#### 3.1 Preparación de Briquetas

La preparación mecánica de briquetas para análisis mineralógico QEMSCAN® considera una etapa en seco y otra húmeda, cuyo detalle se presenta en la Figura 2.

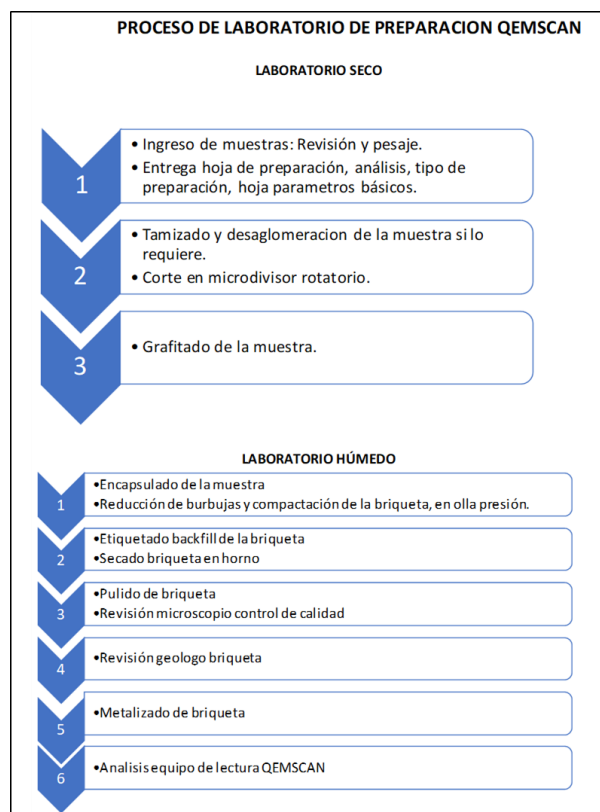


Figura 2. Esquema preparación mecánica de briquetas. Las briquetas son cilindros sólidos, con un diámetro

de 3 cm. Son producto de la mezcla de 0.5 a 1 gr de muestra más resina epoxi más grafito (con granulometría similar a la muestra). La que tiene una superficie pulida y recubrimiento con una película de carbono (Figura 3).



Figura 3. Briquetas de muestras. Cilindros sólidos con un diámetro de 3 cm

#### 3.2 Métodos de Lecturas

En mineralogía automatizada existen varios métodos de lecturas, en este caso, las muestras son leídas mediante:

**BMA (Bulk Mineralogy Analysis)** es un método rápido de lectura por líneas, usado para identificar el número y largo de las intersecciones con especies minerales en cada línea. La información es usada para determinar la abundancia modal, área de las partículas y fases minerales, ocurrencia de elementos de interés y asociaciones minerales (Goodall et al, 2005; Gottlieb et al, 2000).

**PMA (Particle Mineralogy Analysis)**, este modo de lectura entrega información textural detallada de las fases minerales presentes, en partículas de hasta 1 mm (Gottlieb et al, 2000). Una imagen de cada campo de observación es analizada para determinar el perímetro de partícula y ubicación dentro de un mapa de la briqueta. La información que entrega PMA, partícula por partícula es ideal para conducir análisis de liberación (Gottlieb et al, 2000).

Las condiciones de lecturas para las muestras analizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros y condiciones de lecturas para las muestras analizadas.

	N° Briquetas	Granuletría	Método de Lectura	Tiempo de Lectura	Resolución (Point Space)	Espaciamiento Lineal (Line Space)
Cabezas	2	+212 µm	PMA	60 min	10 µm	NA
		-212 µm		120 min	3 µm	
Concentrados	1	NA	BMA	120 min	3 µm	150 µm
Relaves	2	+212 µm	PMA	60 min	10 µm	NA
		-212 µm		120 min	3 µm	

NA: No aplica

### 3.3 Pre-procesos

Los datos de lectura se analizan utilizando el software iDiscover versión 5.2. En este software se cargan las listas mineralógicas específicas y se realiza el análisis de las muestras, en la Figura 4, se observa una librería resumida, disponible para reportar la información capturada durante las lecturas o análisis QEMSCAN®.

Mineral Name	Area(...)
Pyrite	40739
Sphalerite	7
Arsenopyrite	0
Molybdenite	210
Galena	10
Other Sulphides	8
Quartz	671118
K-Feldspar	446507
K-Feldspar Epoxy	129021
K-Feldspar01	317486
Plagioclase/Albite	293804
Epidote/Zoisite	2307
Toumaline	26144
Amphiboles	3711
Sericite/Muscovite	371113

General	
Name	K-Feldspar Epoxy
Colour	255, 128, 0
Description	
Id Code	227
Notes	
Mineral Database Code	76.1.1.1

Composition	
Elements	Al 8.00, K 11.27, Na 1.01, Si 20

Properties	
Density	2

**Colour**  
The colour to be used in particle images, for minerals falling into this mineral grouping.

Figura 4. Lista Mineral Simplificada. (Modificado de Flores, 2006)

Lo primero que se realiza son los pre-procesos que corrigen ciertos problemas de la técnica como bordes artificiales en ciertas asociaciones minerales, eliminación de artefactos mineralógicos, desagregación de partículas etc. Los pre-procesos utilizados son:

#### 3.3.1 Field Stich

Pre-proceso realizado a la fracción gruesa de las cabezas y relaves. Dado que la lectura del equipo se realiza por "campos", las partículas gruesas muchas

veces son leídas en distintos campos y algunas partículas quedan divididas. El Field Stich, consiste en el traslape de los campos con partículas repetidas para así unir las partículas gruesas cortadas en la lectura de cada campo, como se observa en la Figura 5, esto es realizado de manera manual por el mineralogista.

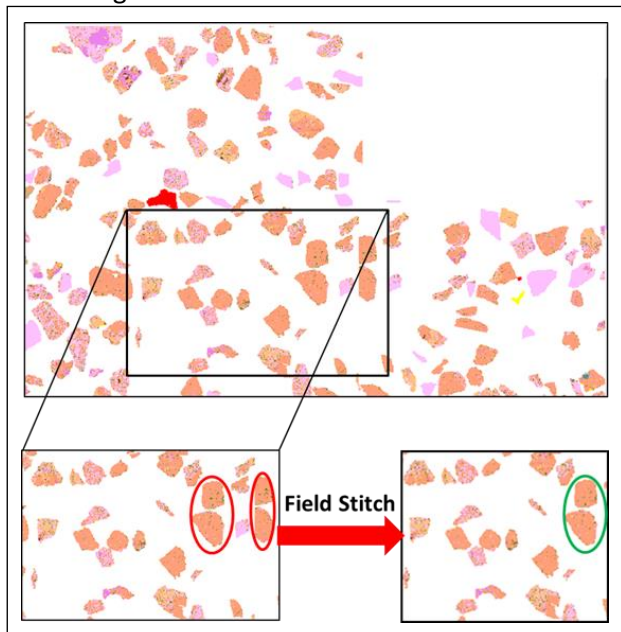
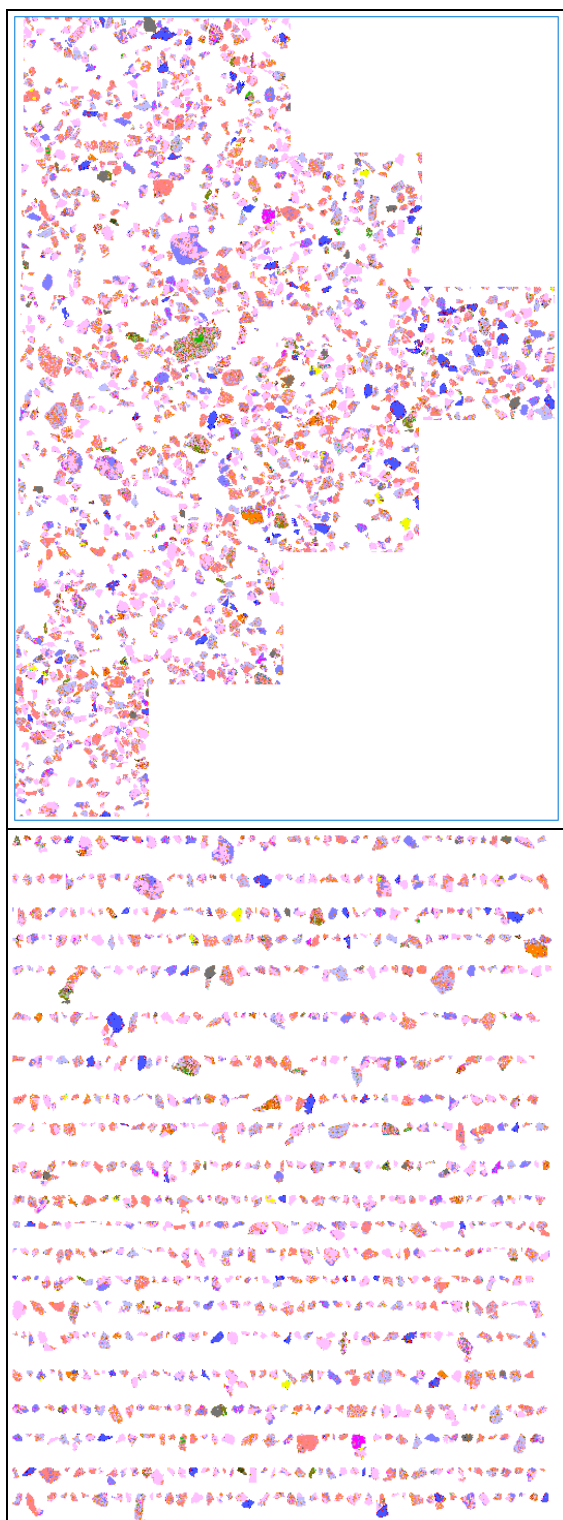


Figura 5. Aplicación de pre-proceso Field Stich. En rojo se muestran partículas repetidas en la lectura por 2 campos, luego de aplicar el pre-proceso se observa la corrección de dicha duplicidad (en verde).

#### 3.3.2 Particulator

Este pre-proceso también se realiza en las fracciones gruesas de cabezas y relaves, debido a que el Field Stich agrupa todas las partículas en una sola. Lo que hace el Particulator es volver a individualizar cada una de las partículas presentes en la briqueta, tal como se observa en la Figura 6.





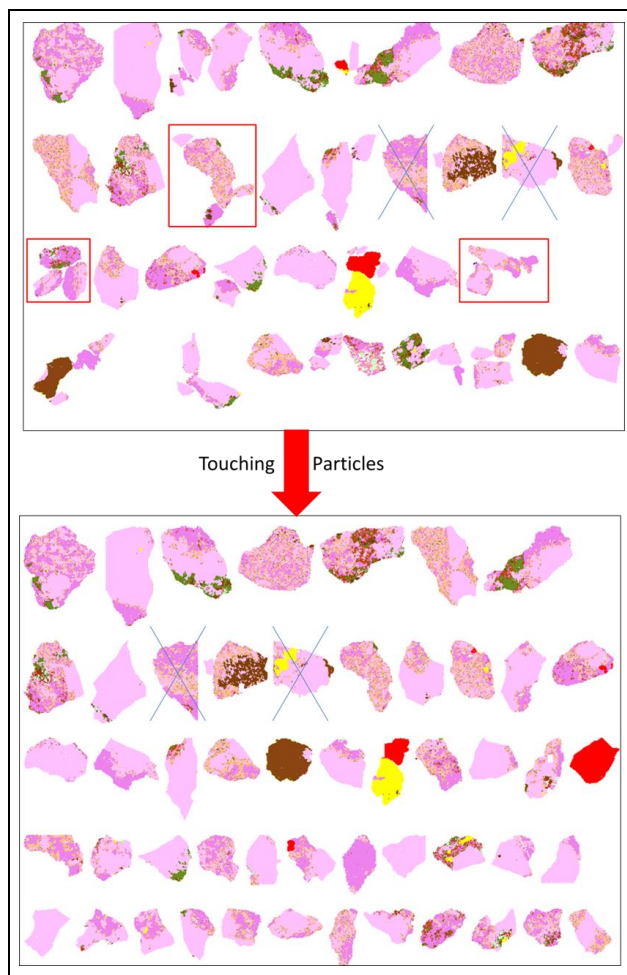
**Figura 6. Pre-Proceso Particulator.** Arriba, la línea azul indica el perímetro de la “nueva” partícula agrupada. Abajo, partículas individualizadas una vez aplicado el pre-proceso.

### 3.3.3 Touching particles

Este consiste en separar las partículas que se encuentran unidas, con el objetivo de individualizar

cada una, esto se realiza para efectos de asociaciones de minerales y tamaños (Figura 7). En los casos en que el pre-proceso deje aún partículas en contacto, estas son separadas manualmente.

Además, se deben descartar las partículas cortadas, ya que estas alterarían el porcentaje de área o perímetro expuesto del mineral de interés (Figura 7).



**Figura 7. Pre-proceso Touching Particles.** Arriba, en rojo, ejemplos de partículas en contacto. Abajo partículas individuales y con X las partículas que se deben descartar.

### 3.3.4 Clean Particles

Este pre-proceso se utiliza para eliminar bordes falsos que se generan en los contactos de distintas asociaciones minerales como, por ejemplo:

- Cuarzo en contacto con muscovita generándose un falso borde de feldespato potásico (Figura 8).
- Biotita en zona de contacto clorita-muscovita.
- Bornita en zona de contacto pirita-calcosina.
- Jarosita en zona de contacto pirita-muscovita.

- Biotita en zona de contacto siderita-feldespato potásico.
- Turmalina dentro de clorita o viceversa.

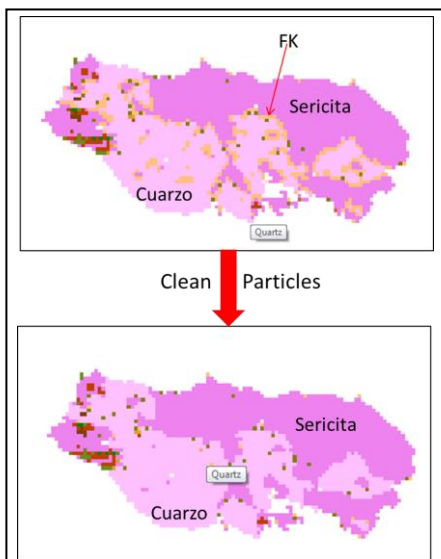


Figura 8. Pre-proceso Clean Particles. Falso feldespato potásico en zona de contacto cuarzo-sericita.

### 3.4 Balance Mineralógico

Para las conciliaciones químicas se utilizan los mismos análisis químicos de los balances metalúrgicos de las pruebas de flotación a tiempo fijo, con el fin de unificar datos y evitar posibles diferencias de datos.

A las muestras que tengan mineralogía de relave se les realizará un balance en masa, con el objetivo de validar tanto la prueba de flotación como los resultados mineralógicos individuales de cabeza, concentrado y relave. Se utilizará como parámetros de medición el cálculo de los sulfuros de cobre y la pirita en las cabezas.

La fórmula para calcular la especie mineralógica de cabeza es la siguiente:

$$\text{Mineral cabeza calc} = \frac{\text{masa concentrado} \times \% \text{ mineral en concentrado} + \text{masa relave} \times \% \text{ mineral en relave}}{\text{masa cabeza}}$$

Se realiza el análisis mineralógico al 100% de las muestras de relaves con una ley de cabeza sobre 0.3% de cobre. En el caso de las muestras con una ley inferior de 0.3% de cobre se escogerá de manera aleatoria un 30% para realizar mineralogía al relave, en consecuencia, balance mineralógico. Con estas condiciones se realizan 244 balances mineralógicos.

Los criterios de validación usados son:

- Sulfuros de cobre, un error relativo de un 7%, con una banda de aceptación máxima del 10%.
- Pirita un error relativo de 10%, con una banda de aceptación máxima de 15%.

## 4 Resultados

Una vez realizado el balance mineralógico para cada una de las pruebas de flotación, se procede al análisis comparativo de los sulfuros de cobre y de la pirita medido en la cabeza analizada, versus el de la cabeza calculada, que en control de calidad se asemeja a un análisis de muestra original versus muestra duplicada (Figura 9 y Figura 10).

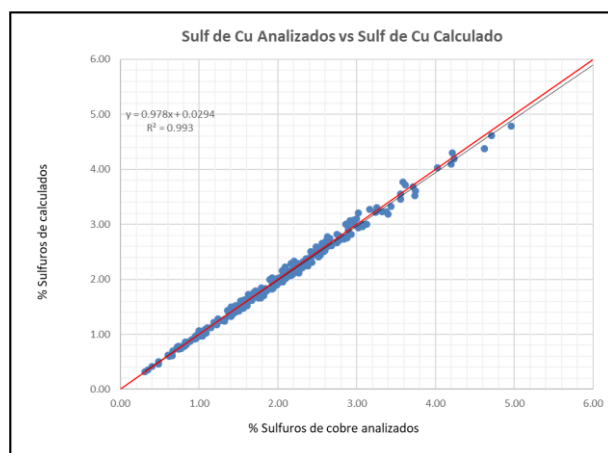


Figura 9. Gráfico comparativo de sulfuros de cobre. Concentración de sulfuros de cobre analizados versus sulfuros de cobre calculados (%).

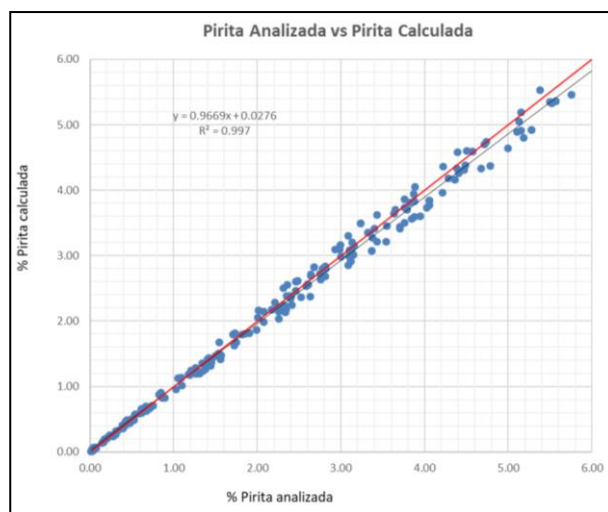


Figura 10. Gráfico comparativo de pirita. Concentración de pirita analizada versus pirita calculada (%).

El balance mineralógico de los sulfuros de cobre da

como resultado para los datos calculados una media de 1.99% y para los datos analizados una media de 2.00% (Tabla 2). La media de las diferencias es de 0.015, con una desviación estándar de 0.079 (Tabla 3) y el coeficiente de correlación es de 0.997 (Tabla 4).

**Tabla 2.** Estadística de las muestras estudiadas Sulfuros de cobre.

Muestra	N° Muestras	Promedio	Desv.Est.	Mín	Máx
Analizada	244	2.00	0.9	0.31	6.09
Calculado	244	1.99	0.9	0.31	5.71

**Tabla 3.** Estadística de las diferencias entre sulfuros de cobre analizados y sulfuros de cobre calculados.

Media de Diferencias	0.015
Desviación Estándar	0.079
Coef Var (Imprec) %	2.8
E. Relativo (%)	0.73
N° Observaciones	244

**Tabla 4.** Regresión Lineal. Sulfuros de cobre.

Intercepto	0.029
Pendiente	0.978
Factor de Correlación	0.993
Coefficiente de Correlación	0.997

En los gráficos de las Figuras 10 y 11 (Fuera de texto), se observan los datos en orden correlativo de muestras y por rango de concentraciones de sulfuros de cobre.

La media para la pirita analizada es de 2.74% y para la pirita calculada un 2.68% (Tabla 5). En cuanto a la media de las diferencias esta tiene un valor de 0.063 (Tabla 6) y el coeficiente de correlación de 0.998 (Tabla 7).

**Tabla 5.** Estadística de las muestras estudiadas. Pirita

Muestra	N° Muestras	Promedio	Desv.Est.	Mín	Máx
Analizada	244	2.74	2.4	0.01	19.82
Calculado	244	2.68	2.3	0.01	19.00

**Tabla 6.** Estadística de las diferencias entre pirita analizados y pirita calculados.

Media de Diferencias	0.063
Desviación Estándar	0.150
Coef Var (Imprec) %	3.9
E. Relativo (%)	2.33
N° Observaciones	244

**Tabla 7.** Regresión Lineal. Pirita

Intercepto	0.028
Pendiente	0.967
Factor de Correlación	0.997
Coefficiente de Correlación	0.998

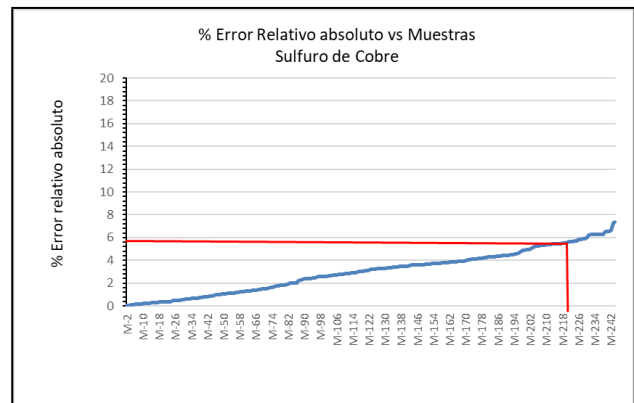
En los gráficos de las Figuras 12 y 13 (Fuera de texto), se presentan los datos ordenados por correlativo de muestras y por rango de concentraciones de pirita.

## 5 Discusión

Los sulfuros de cobre y la pirita presentan una buena correlación de los datos calculados respecto a los analizados, en las cabezas de las pruebas de flotación balanceadas.

El 99.18% de los balances mineralógicos para los sulfuros de cobre se encuentran dentro de la banda del 7% y solo 2 muestras, que corresponden al 0.82%, están entre las bandas del 7 y el 10% (Figura 11 y 12, fuera de texto). Cabe destacar, que todas las muestras presentan concentraciones mayores a 0.30%.

En el gráfico de la Figura 15, la línea roja, representa el percentil 90 con valores bajo la banda del 7% de valor relativo absoluto, incluso bajo el 6%.



**Figura 15.** Gráfico de sulfuros de cobre, error relativo absoluto versus muestras. La línea roja muestra el percentil 90.

El 92.62% de los balances mineralógicos de pirita oscilan dentro de la banda de error del 10% y sólo el 6.15% se encuentra fuera de la banda del 15% de error relativo, esto coincide con concentraciones bajo en 0.1% de pirita (Figura 13 y 14, fuera de texto), donde se observa un sesgo.

En el gráfico de la Figura 16, la línea roja, representa el percentil 90 con valores bajo la banda del 10%.

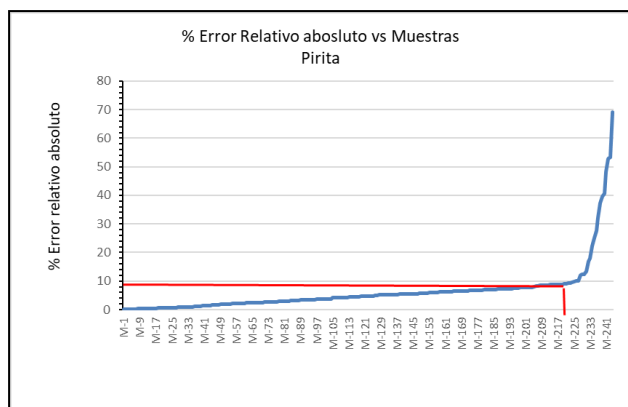


Figura 16. Gráfico de piritita, error relativo absoluto versus muestras. La línea roja muestra el percentil 90.

## 6 Conclusiones

- Como método de control de calidad, el balance mineralógico es una buena herramienta para concentraciones de sulfuros de cobre mayores al 0.30% y para concentraciones de piritita sobre el 0.1%.
- En los sulfuros de cobre no se observan sesgos significativos. En cambio, las bajas concentraciones de piritita presentan sobreestimación de los valores de la cabeza analizada versus la calculada.
- El balance mineralógico de las muestras producto de las pruebas de flotación, permiten asegurar la utilización de estos datos en procesos posteriores, tales como modelos geometalúrgicos de corto o largo plazo, ya que los resultados no evidencian sesgos significativos y se mantienen dentro de las bandas de aceptación. Asegurando la calidad de la información mineralógica entregada por los análisis QEMSCAN®.
- Los criterios de validación para el error relativo podrían ser modificados a un 5% para los sulfuros de cobre y un 7% para la piritita.
- Todo esto demuestra que el balance mineralógico, es un excelente indicador de la calidad de la mineralogía entregada y analizada con la tecnología QEMSCAN®.
- En un futuro, se recomienda realizar balances mineralógicos para concentraciones menores al 0.30% de sulfuros de cobre, con el objetivo de observar el comportamiento de error relativo y así, validar o descartar el método para esos rangos.

Luego de este trabajo, el balance mineralógico queda establecido dentro de los procedimientos internos de control de calidad de SGS.

## 7. Referencias

- Flores, L. 2006. QEMSCAN, Evaluación Cuantitativa de Mineralogía. Imágenes BSE + Energía dispersiva de Rayos X. Generalidades del Método y Bibliografía. Informe Interno SGS Chile. Santiago.
- Goodall, W. y Butcher, A. 2012. Use of QEMSCAN in Practical Gold Department Studies. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C). Vol. 121. N°4: 199-204.
- Goodall, W.; Scales, P. y Butcher, A. 2005. The use of QEMSCAN and Diagnostic Leaching in the Characterization of Visible Gold in Complex Ores. Minerals Engineering Vol 18, 877-886.
- Gottlieb, P. 2008. The Revolutionary Impact of Automated Mineralogy on Mining and Mineral Processing. In: Wang, D; Sun, C; Wang, F; Zhang, L. y Hang, L. (eds) 24th International Mineral Processing Congress. Science Press. 165-174. Beijing
- Gottlieb, P.; Wilkie, G.; Sutherland, D.; Ho-Tun, E.; Suthers, S.; Perera, K.; Jenkins, B.; Spencer, S.; Butcher, A.; y Rayner, J. 2000. Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. JOM. Vol 52, 24-25.
- Sutherland, D. N., Gottlieb, P. Application of Automated Quantitative Mineralogy in Mineral Processing. Minerals Engineering, 1991, Vol. 4, N° 7-11: 753-762.
- Sutherland, D.; Creelman, R.; Gottlieb, P., Jackson, R.; Quittner, V.; Wilkie, G.; Zuiderwyk, M.; Allen, N.; y Maclean, T. 1987. The Development and Application of QEM\*SEM. CHEMCA. Vol. 2, 106.1-106.6. Sydney.



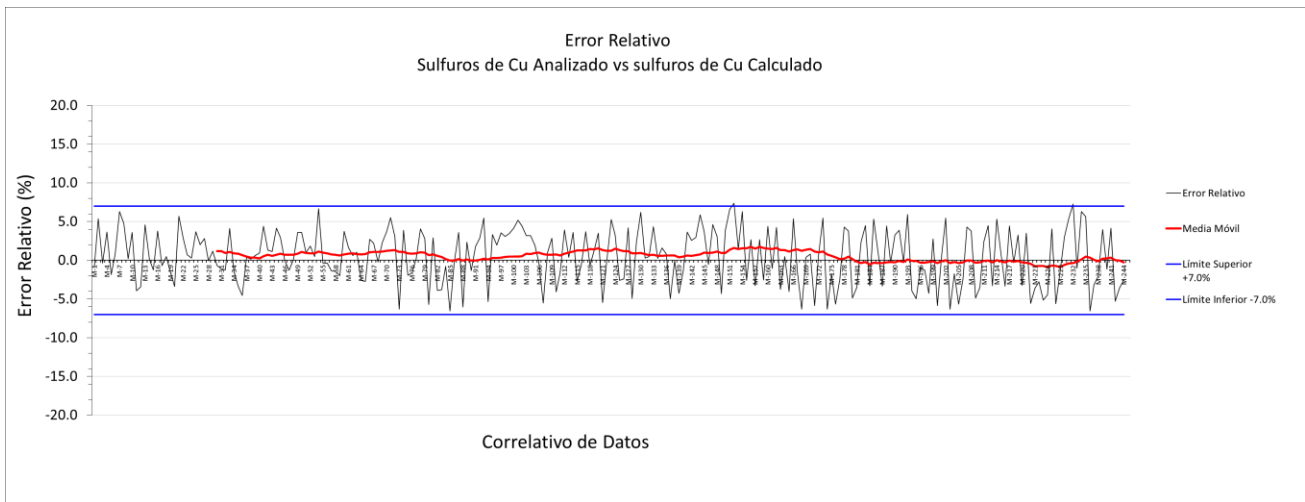


Figura 11 Gráfico de error relativo. Comparativo de sulfuros de cobre analizados versus calculado, ordenados por correlativo de muestras.

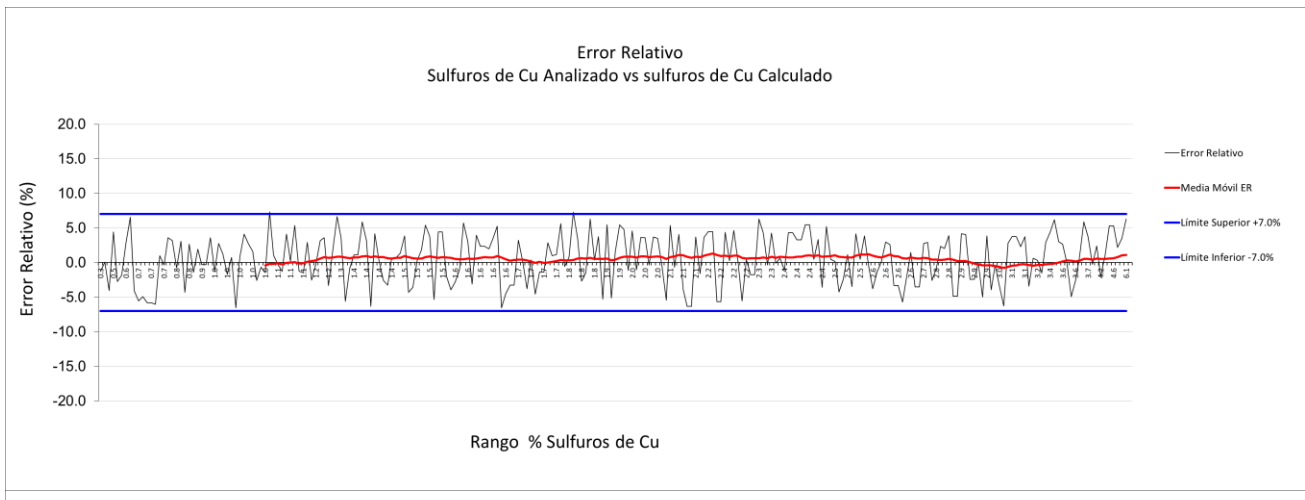


Figura 12 Gráfico de error relativo. Comparativo de sulfuros de cobre analizados versus calculado, ordenados por rangos de concentraciones.

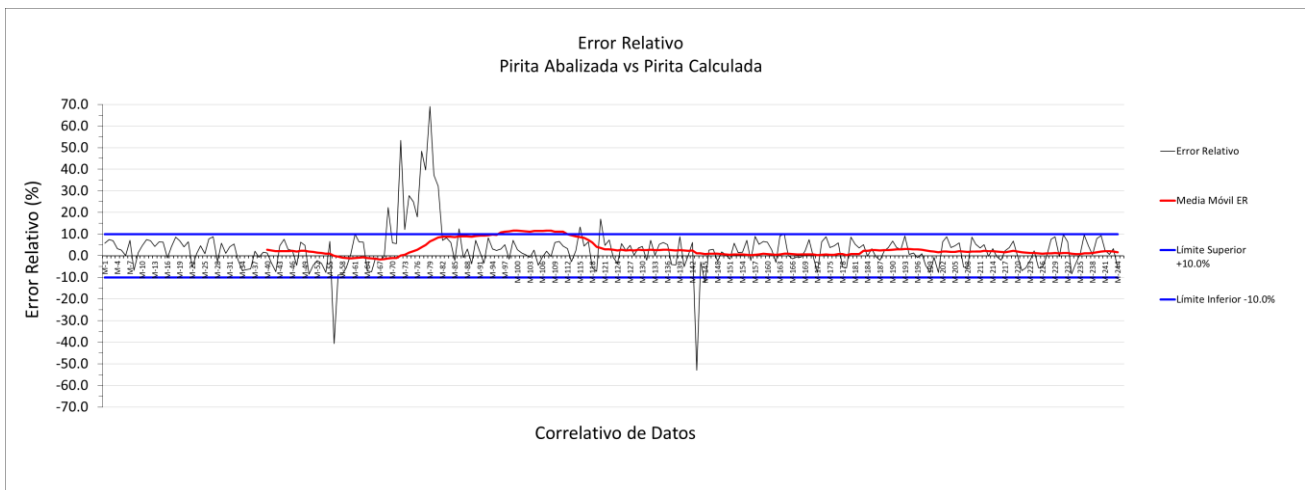


Figura 13 Gráfico de error relativo. Comparativo de pirita analizada versus calculada, ordenados por correlativo de muestras.

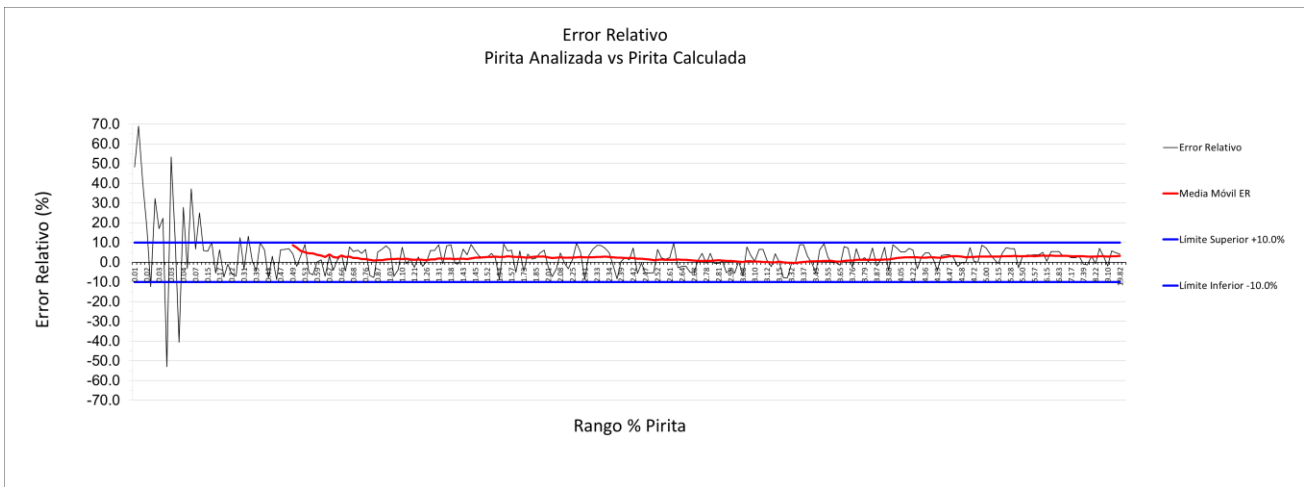


Figura 14 Gráfico de error relativo. Comparativo de pirita analizada versus calculada, ordenados por rangos de concentraciones.