



Mineralogía de ganga mediante SWNIR aplicada al modelamiento y estimación de UGM de minerales de cobre en mina Antucoya. AMSA 2025

Jorge Andrés Ávila Espinoza

Profesor Guía: MSc., Abraham Elías González Martínez
Profesores Comisión: MSc., Liubow Nikolaivna González Martínez
Sr., Ramiro Ulises Bonilla Parra

Resumen.

La mina Antucoya, perteneciente a Antofagasta Minerals, inició producción en septiembre de 2015 y se sustenta en 1170 sondajes equivalentes a 227.000 metros, con recursos totales de 1259 Mt a 0,31 % CuT y una ley de corte de 0,15 %. Su procesamiento se realiza mediante lixiviación en pilas dinámicas con ácido sulfúrico y agua de mar. La planta de chancado trata 32 Mt anuales de mineral con 0,35 % CuT, generando alrededor de 85.000 toneladas de cátodos de cobre fino por año.

El yacimiento presenta desafíos técnicos relacionados con la permeabilidad, el consumo de ácido y la eficiencia de recuperación. Para abordarlos, se llevaron a cabo pruebas metalúrgicas de laboratorio (ensayos en botellas iso-pH, columnas y permeabilidad), junto con estudios mineralógicos de ganga mediante DRX. Estos trabajos identificaron siete minerales principales: sericita, caolinita, szomolnokita, clorita, calcita, cuarzo y plagioclasa.

Posteriormente, se analizaron cerca de 20.000 muestras de sondajes y pozos de tronadura mediante espectroscopía SWNIR, cuyos resultados fueron calibrados en modelos quemométricos. Así, fue posible estimar la mineralogía de ganga en el modelo de bloques y definir Unidades Geometalúrgicas (UGM), mejorando la predicción de recuperación, consumo ácido y permeabilidad, con un impacto positivo en la planificación minera de corto y largo plazo.

Palabras Claves: *Unidades Geometalúrgicas, Permeabilidad y Recuperación.*

1. Introducción

El yacimiento Antucoya, ubicado en la Región de Antofagasta (Figura 1), en la cordillera de la costa a 120 kilómetros al norte de Antofagasta y 30 kilómetros al sur de María Elena, el yacimiento está emplazado en el sistema de falla de atacama, próximo a labores asociadas a no metálicos, y su descubrimiento se asocia a la exploración de no metálicos. Antucoya es un yacimiento especial, ya que se puede describir en sector oeste un clásico pórfido cuprífero de composición granodiorítico conocido como sector Antucoya, con un nucleó potásico y desarrollo de una alteración fílica y sobreimposición de sericita-clorita. El sector este de Buey Muerto, está descrito como un pórfido con una sobreimposición de una alteración cuarzo sericítico intensa desarrollada en halos de vetas de piritas masivas. Ambos ambientes fueron sometidos a eventos supérgenos donde se desarrollaron las columnas de óxidos y sulfatos de cobre de hasta 500 metros. Esto generó el desarrollo de dos ambientes totalmente distintos en una misma cota y a menos de 100 metros en la horizontal. Estas diferencias geológicas generan variabilidad en el comportamiento metalúrgico, como la recuperación de cobre, el consumo de ácido y la permeabilidad del mineral tratado por lixiviación en pilas.

Con el fin de mejorar la planificación minera y reducir la incertidumbre operativa, se desarrolló un estudio para caracterizar la mineralogía de ganga a través de SWNIR (Infrarrojo Cercano de Onda Corta). Este término se refiere a un rango del espectro electromagnético que se encuentra en la región del infrarrojo cercano, específicamente en las longitudes de onda más cortas dentro de ese rango (típicamente entre 1100 y 2500 nm). Es comúnmente utilizado en espectroscopía SWIR/SWNIR para análisis mineralógico. Ya que cada mineral tiene reflectancia

especifica en el rango del haz de luz, se utiliza principalmente para determinación de micas y arcillas directamente.



Figura 1. Ubicación Antucoya

Objetivo General

Caracterizar unidades geometalúrgicas para predecir recuperación, consumo ácido y permeabilidad en el yacimiento Antucoya.

Objetivos Específicos

- Identificar los minerales de ganga más influyentes en el comportamiento metalúrgico, esto a partir de modelos Químicos basados en espectrometría SWNIR, donde se midieron 20.000 metros de sondajes y 20.000 pozos de tronadura.
- En paralelo se hicieron pruebas metalúrgicas de permeabilidad, recuperación, consumo de ácido, a escala de botellas iso pH, mini columnas de 1 metros y pruebas a escala industrial.
- Realizar caracterización mineralógica de detalle a través de TIMA para poder entrenar los modelos Químicos
- Generar unidades a través de un EDA, que tuvieran correlación espacial y buena regionalización para crear un modelo de

arcillas y micas.

- Con esta información se procedió a generar UE unidades de estimación y posteriormente de acuerdo con su comportamiento definir UGM

1 Marco Geológico o Definición del Problema

El yacimiento Antucoya se ubica en la Región de Antofagasta, al este del Salar del Carmen, y corresponde a un sistema de pórfido de cobre del Paleógeno controlado estructuralmente por el Sistema de Falla de Atacama. Su evolución geológica está marcada por una intensa actividad tectónica y magmática, que favoreció la formación de distintos estilos de alteración hidrotermal.

Principales unidades y rasgos geológicos (Figura 2).

El área de estudio está conformada por las siguientes unidades principales:

Intrusivo Pórfido Andesítico (IPA): Unidad caja del mineral. Corresponde a un pórfido de composición andesítica con alteración potásica dominante (biotita, ortosa), acompañado de vetillas tipo A y B, típica del núcleo del sistema porfídico.

Roca Volcánica Andesítica (RVA): Cubre al IPA en discordancia erosiva. Presenta alteración intermedia entre clorita-sericita y cuarzo-sericita, dependiendo de su proximidad al pórfido.

Unidad Sedimentaria Post-mineral (USP): Secuencia continental compuesta por gravas y areniscas poco consolidadas. Actúa como cubierta estéril sin alteración significativa.

Falla Antucoya (FA): Rasgo estructural principal. Controla la localización del sistema hidrotermal y ha generado zonas de brechamiento y mayor permeabilidad.

Los ensamblajes de alteración (Figura 3), se identifican dos dominios alteraciones superpuestos:

Antucoya: Ensamblaje clásico de potásica central (biotita + magnetita), con halo cuarzo-sericita periférico y transición a clorita-sericita.

Buey Muerto: Dominado por vetillas de cuarzo-sericita-pirita (QSP), con mayor contenido de pirita y fuerte lixiviación de cobre secundario.

Esta superposición genera contrastes importantes en recuperación, consumo de ácido y permeabilidad, siendo un factor clave para la definición de Unidades Geometalúrgicas (UGM).

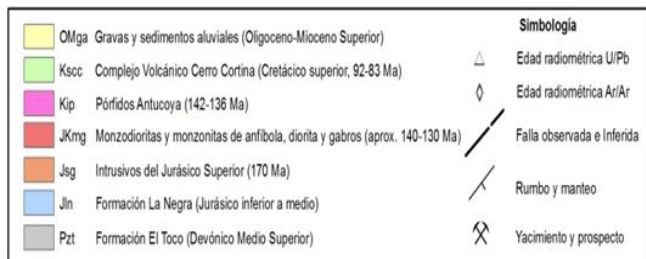
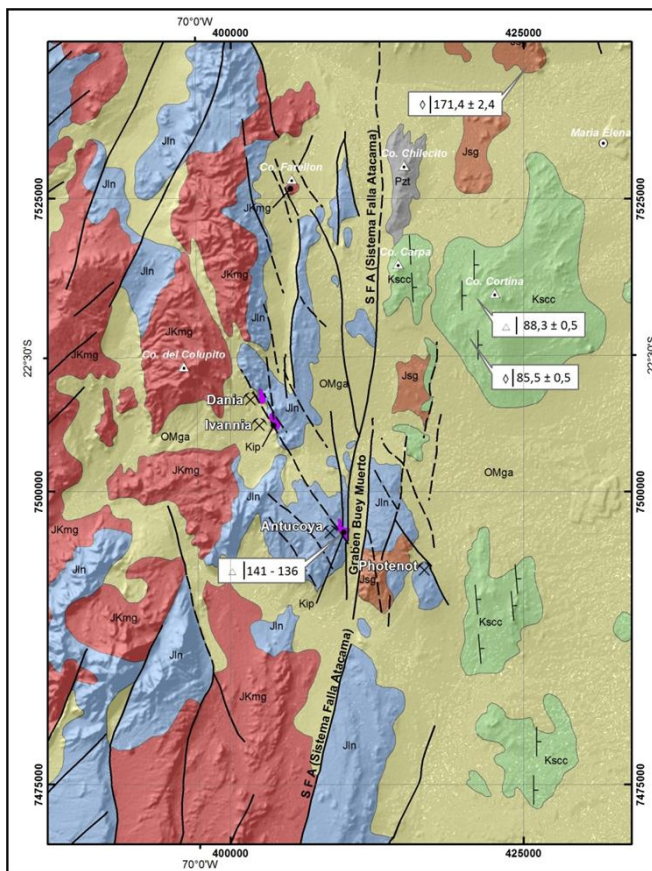


Figura 2. Marco geológico.

El problema se genera cuando se comenzó a cargar las pilas dinámicas de lixiviación, evidenciándose primeramente apozamientos en las superficies de las pilas, lo que no permitía que los fluidos percolaran al lecho de pila y pudieran ser transportados a la planta de SX-EW, estos apozamientos generaron que la razón de lixiviación (cantidad de litros por metro cuadrado de riego) fuera muy baja no logrando extraer el cobre contenido por ende tener bajas recuperaciones (Foto 1). Esto generó además que las pilas también tuvieran una alta carga hidrodinámica lo que comenzó a generar colapso en los taludes (Foto2), generando ya problemas de seguridad e integridad de los trabajadores, junto con bloquear las canaletas de traspaso de soluciones.



Foto 1. Apozamientos soluciones.

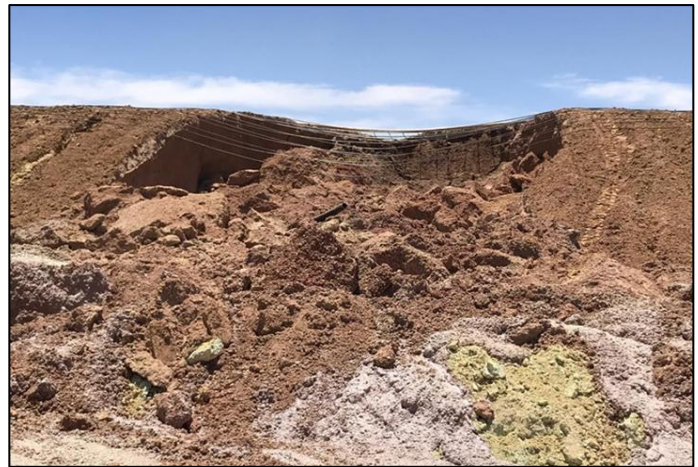


Foto 2. Derrumbe de taludes.

2 Metodología

En primera instancia se reconstruyeron las pilas con mayores problemas para poder identificar el origen de los materiales, en paralelo se trabajó con mediciones espectrales SWNIR (Figura 4), enfocadas en la identificación y cuantificación de los principales minerales de alteración que pudieran impactar negativamente el proceso de lixiviación. Ya con la reconstrucción hecha se identificó que la zona de Buey Muerto, que correspondía a una zona de alteración intensa de cuarzo – sericita, con vetillas masivas de piritita y acompañada de sulfatos de Fe-Cu, como la szomolnokita y la brochantita, así como arcillas del tipo caolinita, las cuales afectan la permeabilidad y el consumo ácido. Los principales efectos que se pudieron ver que la alta solubilidad en agua de los sulfatos de Fe- Cu, generaban un coloide que, durante los ciclos de intermitencia de la pila, se solidificaban generando niveles impermeables, además, al solubilizarse generaban ácido sulfúrico que generaba una chancabilidad química del resto de la roca

destruyendo los glómeros y la estabilidad de la pila (Figura 5). No así ocurría cuando se alimentaba del sector Antucoya que no tenía problemas de permeabilidad ni estabilidad, pero si consumía ácido por su ensamblaje mineralógico, crisocola, clorita principalmente. La integración de estos resultados con un set de pruebas metalúrgicas a pequeña escala (botellas iso-pH) y pruebas de columna permitió establecer rangos de tolerancia operativa para dichos minerales de ganga. Esta información fue clave para definir criterios de aceptación mineralógica en la planificación y en la asignación de unidades geometalúrgicas (UGM) con comportamiento predecible en recuperación, permeabilidad y consumo de ácido.

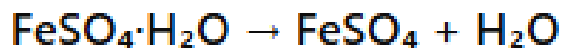


Figura 5. Formula szomolnokita

Con estos resultados exploratorios de datos se procedió a regionalizar la información a través de la metodología de SWNIR, ya descrita, lo que permitió medir sondajes y pozos de tronadura para poder cuantificar respecto a la roca total el contenido de sulfatos principalmente, ya con esta información se definieron UGM, que se describen a continuación:

- UGM 10:** pórfido Antucoya, alto en caolín y muscovita. (sin restricción de alimentación)
- UGM 20:** pórfido Buey Muestrero con contenidos menores a 2% de szolomonkita (sin restricción de alimentación)
- UGM 21:** pórfido Buey Muerto con contenidos menores a 3.5% de szolomonkita (en mezcla menor al 40%)
- UGM 24:** pórfido Buey Muerto con contenidos mayor a 3.5% de szolomonkita (en mezcla menor al 25%)
- UGM 30:** pórfido Antucoya, alto en clorita y biotita. Consumidora de ácido. (sin restricción de alimentación)
- UGM 40:** pórfido Buey Muerto sin szolomonkita, bajo consumo de ácido. (sin restricción de mezcla).

La definición de tolerancia de mezcla se hizo a través de las pruebas metalúrgicas y pruebas a escala industrial (Figura 6).

3 Resultados

Con la identificación de las unidades y sus tolerancias máximas en el proceso, se procedió a realizar un nuevo plan minero que tomara las restricciones de mezcla, las cuales eran instantáneas, es decir se seguía cumplimiento hora a hora para así, generar pilas con mezcla homogénea, y a través del sistema de monitoreo de los modelos de bloques, se realizó una adición de ácido en el tambor aglomerador diferenciada por UGM, disminuyendo el consumo de ácido. Las pilas dinámicas tienen un ciclo de 90 días, por lo que a los primeros 5 meses (Figura 7), ya el comportamiento de la recuperación tuvo un cambio de pendiente respecto al modelo fenomenológico (línea naranja), con los resultados reales (línea azul), logrando subir 10 puntos de recuperación, además de que la producción de cátodos se logró estabilizar cumpliendo los planes de producción.

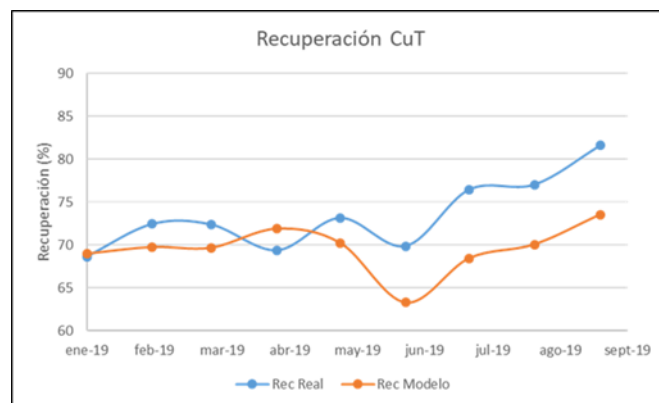


Figura 7. Cambio en el vector de recuperación

4 Discusión

La aplicación de espectroscopía SWNIR como herramienta de caracterización mineralógica en el yacimiento Antucoya demostró ser altamente efectiva para resolver desafíos operacionales complejos relacionados con la lixiviación. La identificación precisa de minerales de ganga como la szomolnokita, caolinita y clorita, a partir de modelos químico métricos entrenados con mineralogía cuantitativa (TIMA) y respaldados por ensayos metalúrgicos, permitió establecer una correlación directa entre la mineralogía y los principales parámetros del proceso: recuperación, consumo de ácido y permeabilidad.

Una de las principales fortalezas del estudio fue la capacidad de escalar esta información a todo el yacimiento mediante mediciones SWNIR en más de 20.000 metros de sondajes y pozos de tronadura. Esto permitió generar modelos predictivos robustos en el modelo de bloques, base fundamental para la definición de Unidades Geometalúrgicas (UGM) con comportamiento metalúrgico homogéneo y predecible.

Asimismo, la validación empírica a través de pruebas de laboratorio (iso-pH, columnas) y a escala industrial permitió establecer umbrales críticos de contenido de minerales perjudiciales, particularmente la szomolnokita, para asegurar la estabilidad estructural de las pilas y evitar la formación de zonas impermeables. Este enfoque integrador, que combina mineralogía espectral, pruebas metalúrgicas y planificación minera, resultó clave para mitigar los efectos negativos observados en los primeros ciclos de lixiviación.

Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones inherentes al método SWNIR, especialmente en la estimación de minerales opacos o sin señal espectral distintiva (como óxidos de hierro). Esto requiere complementar los modelos espectrales con datos de DRX y análisis químicos selectivos para mejorar la precisión de ciertas estimaciones mineralógicas. Además, el entrenamiento y validación de los modelos quimio métricos demanda una inversión significativa en mineralogía cuantitativa y pruebas metalúrgicas, lo que puede limitar su aplicación inmediata en otros yacimientos sin un set de datos base comparable.

5 Conclusiones

Se logró caracterizar de forma efectiva la mineralogía de ganga en Antucoya utilizando espectroscopía SWNIR y modelos quimio métricos, lo cual permitió definir Unidades Geometalúrgicas con impacto directo en la planificación y operación minera.

La identificación de minerales críticos como la szomolnokita y la cuantificación de su efecto sobre la permeabilidad y recuperación permitió definir umbrales de tolerancia de mezcla en pilas de lixiviación, lo que redujo significativamente los problemas operacionales.

La implementación de este modelo permitió un aumento sostenido de 10 puntos en la recuperación de cobre y una disminución del consumo específico de ácido, contribuyendo a la estabilidad y eficiencia del proceso.

Se validó que las herramientas espectrales, cuando se integran con pruebas metalúrgicas y mineralogía cuantitativa, pueden escalar a nivel mina con alta confiabilidad, representando una alternativa eficiente y operacionalmente viable para la caracterización geometalúrgica.

La metodología desarrollada en este estudio puede ser replicada y adaptada a otros depósitos de oxidados y mixtos, con ajustes específicos en función de la mineralogía local, representando una contribución relevante a la geometalurgia predictiva y la minería sustentable

7. Referencias

Parra-Avila, L.A.; Ballard, C. 2015. Application of hyperspectral technologies for ore characterization and geometallurgical modelling. Congreso Geometallurgy 2015, Actas: 195-202. Lima

Addison, P.S.; Clarke, J.C.; Menzies, M.I.; Lo, J.; Farrell, D. 2019. Development of a geometallurgical model for a copper heap leach operation using mineralogical and spectral data. Minerals Engineering. Vol. 138: 12-25. (Oxford)

Carrasco, C.; Lizama, K. 2017. Characterization of gangue minerals in heap leaching: a geometallurgical approach. Remin – Revista de Metalurgia e Innovación. Año 4, Nº 2: 55-68. (Santiago)

López, L.; González, R. 2016. Espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano: aplicaciones en exploración y minería del cobre en Chile. Boletín Geológico y Minero. Vol. 127 (2): 221-232. (Madrid)

Iyakwari, S., Amankwah, R. K., & Glass, H. J. (2016). Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper samples. Applied Geochemistry, Vol. 68, pp. 1–7.

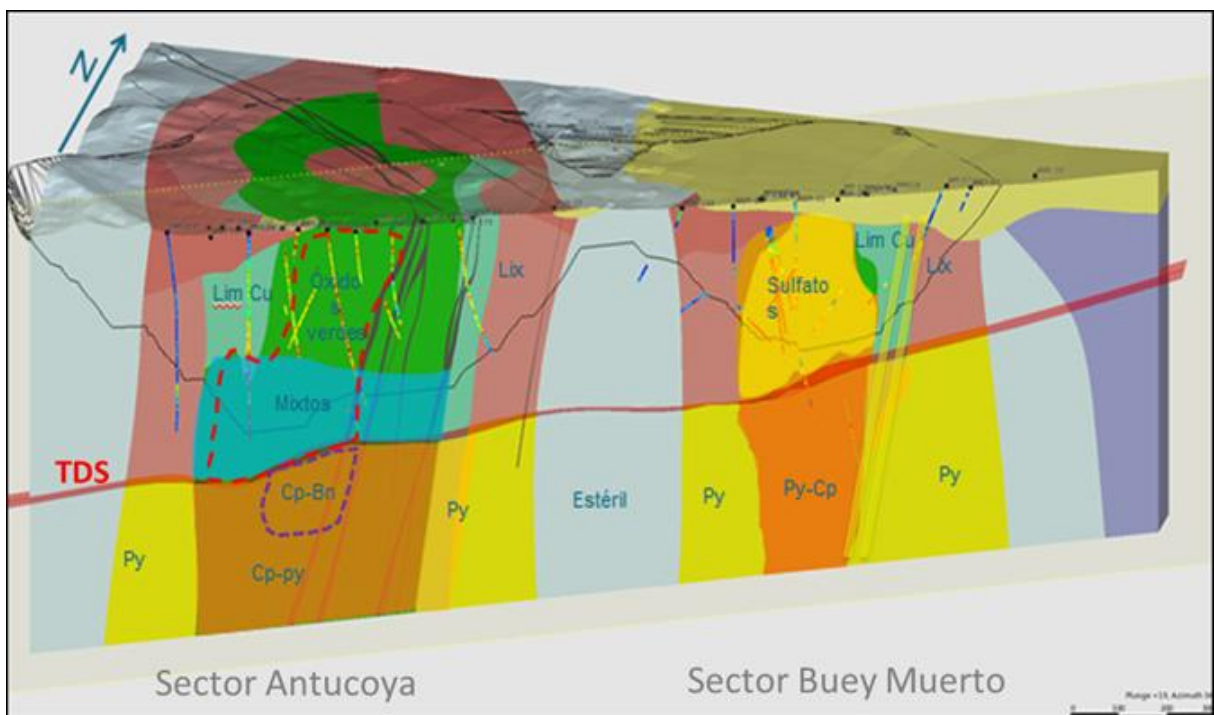


Figura 3. Perfil esquemático yacimiento Antucoya. Zonas Minerales

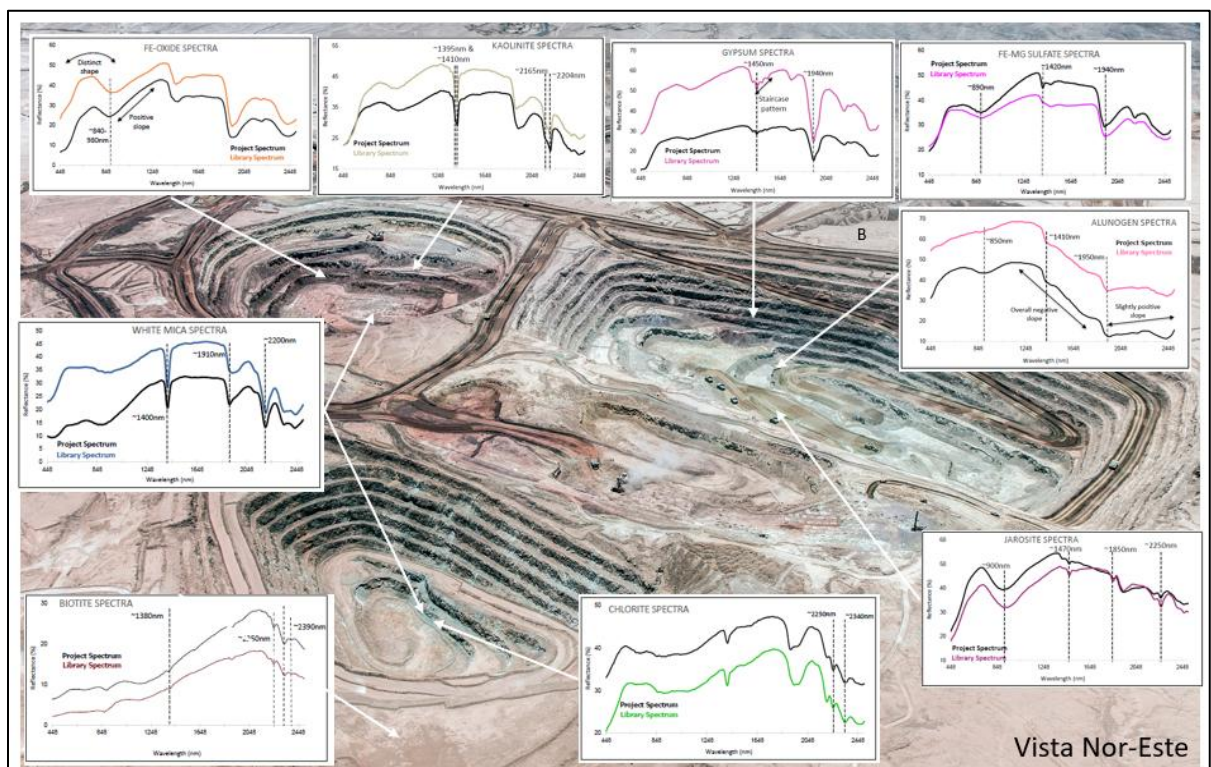


Figura 4. Espectrometría distintas zonas Antucoya

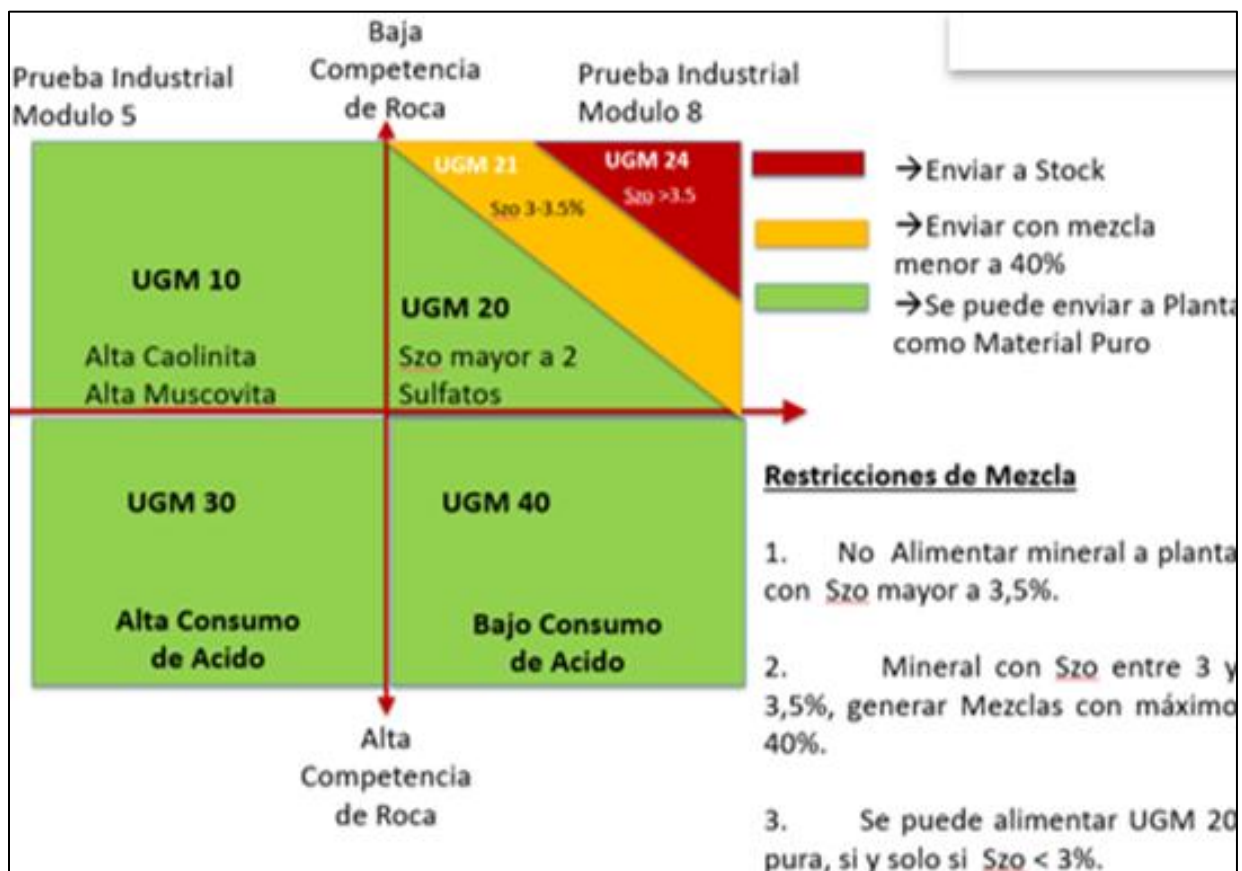


Figura 6. Definición UGM – Tolerancia de mezclas.