



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

COMPORTAMIENTO DE LA MINERALOGÍA DE GANGA EN EL PROCESO
HIDROMETALÚRGICO EN MINA CERRO COLORADO

TÉISIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ALEJANDRO MARCOS HOFMANN NÚÑEZ

PROFESOR GUÍA:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VICTOR MAKSAEV J.
JULIÁN ORTIZ C.
BRIAN TOWNLEY C.

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2012

En el yacimiento Cerro Colorado, ubicado en la Primera Región de Tarapacá, existe la necesidad de integrar información geológica y metalúrgica en modelos predictivos, con el fin de estimar y proyectar el comportamiento metalúrgico del recurso mineral, e incorporarlo en los planes de producción minera.

Para esto, se genera un plan de trabajo con el objetivo de construir modelos mineralógicos basados en el comportamiento metalúrgico de los minerales de ganga que pueden considerarse relevantes para el proceso minero-metalúrgico.

Como parte de este plan se utiliza la información que se obtiene de pruebas metalúrgicas que determinan el comportamiento durante la lixiviación de cuatro muestras de mineral de cabeza representativas de las actuales fases de producción del yacimiento. Se busca en ellas representar diferentes composiciones mineralógicas de ganga con el objeto de conocer su comportamiento a escala de laboratorio y poder predecir su conducta durante el proceso hidrometalúrgico.

El estudio determina que las muestras con ganga caolinítica presentan baja dureza y fácil disgregación en contacto con solución de refinó. En estas muestras los valores de las constantes de conductividad hidráulica indican menor permeabilidad que en las muestras sin el carácter caolinítico de la ganga. Esto se explica por la ocurrencia del fenómeno de “delaminación” del caolín. Por otro lado, las muestras con carácter esmectítico de la ganga tienen mejor conductividad hidráulica, esto se explicaría por la presencia de vetillas de cuarzo que les confiere buena resistencia mecánica e inhibe la expansividad de las esmectitas en ambiente acuoso.

El consumo de ácido por la ganga es superior en las muestras con presencia de biotita finamente diseminada. Este mineral sería el principal responsable del alto consumo de ácido, evidenciado por la mayor liberación de Fe durante la lixiviación.

Con estos resultados se construyen los modelos mineralógicos preliminares que permiten proyectar el comportamiento metalúrgico del recurso mineral, a través de herramientas prácticas y operativas, y que son incorporados en el modelo de bloques como variables que deben ser utilizadas en la planificación minera, tanto para su optimización como para medir la gestión de la operación de la planta de proceso.

Esta metodología es absolutamente objetiva y permite tomar mejores decisiones que lleven a encontrar el plan que mejore el Valor Presente Neto (VPN) para la compañía.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	INTRODUCCIÓN Y ALCANCES DEL TRABAJO	3
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	UBICACIÓN Y ACCESO	4
1.4	TRABAJOS GEOLÓGICOS ANTERIORES	5
2	GEOMORFOLOGÍA	5
2.1	REGIÓN SEPTENTRIONAL	6
2.2	GEOMORFOLOGÍA ZONAL	7
2.3	CLIMA E HIDROGRAFÍA	9
3	MARCO GEOLÓGICO	10
3.1	GEOLOGÍA REGIONAL	10
3.2	GEOLOGÍA DISTRITAL	13
3.2.1	Rocas estratificadas	13
3.2.2	Rocas Intrusivas	16
3.2.3	Rocas metamórficas	16
3.2.4	Estructuras	16
3.3	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CERRO COLORADO	18
3.3.1	Litología	18
3.3.2	Alteración	20
3.3.3	Génesis Alteración Supérgena	22
3.3.4	Mineralización	23
3.4	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	27
4	METODOLOGÍA	29
4.1	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO DE LA GANGA	29
4.1.1	Selección de muestras	29
4.1.2	Protocolo de Lixiviación	29
4.2	DETERMINACIÓN DE LA GANGA REACTIVA	30
4.3	MODELAMIENTO DE LA GANGA REACTIVA	30
4.3.1	Definición de Dominios Mineralógicos	30
4.3.2	Etape de modelamiento	31
4.3.3	Incorporación de variables en Modelo de Bloques	31
5	RESULTADOS	31
5.1	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO DE LA GANGA	31
5.1.1	Descripción Mineralógica	31
5.1.2	Análisis por Difracción de rayos X	40
5.1.3	Caracterización química	40
5.1.4	Pruebas de Reacción y Test de Dureza	41
5.1.5	Pruebas de Consumo de ácido	45
5.1.6	Pruebas de Conductividad Hidráulica	46
5.1.7	Pruebas de Lixiviación	47
5.1.8	Estudio de Ripios	51
5.2	DETERMINACIÓN DE LA GANGA REACTIVA RELEVANTE	52
5.3	MODELAMIENTO DE LA MINERALOGÍA DE GANGA REACTIVA	53
5.3.1	Definición de dominios de ganga reactiva relevante	54
5.3.2	Modelamiento de los dominios	54
5.3.3	Modelo de bloques	55
6	CONCLUSIONES	57
7	REFERENCIAS	58
8	ANEXOS	60

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCES DEL TRABAJO

La importancia de definir variables que representen el comportamiento de los minerales en los procesos metalúrgicos radica en la necesidad de construir modelos predictivos que permitan mejorar la planificación minera, y así optimizar el negocio minero.

Para esto, en el yacimiento de cobre Cerro Colorado se ha decidido contruir modelos mineralógicos basados en una caracterización geo-metalúrgica del mineral de ganga, es decir, relacionar variables geológicas y resultados de ensayos metalúrgicos, los cuales, a partir de su escalamiento al proceso, permiten estimar respuestas industriales de variables metalúrgicas relevantes para el negocio.

Se define un plan de trabajo que consiste en realizar pruebas metalúrgicas para caracterizar el comportamiento a escala de laboratorio de unidades geológicas representativas de las fases de producción del yacimiento. Esta caracterización metalúrgica se correlaciona con la mineralogía de ganga presentes en las muestras estudiadas. Esto permite construir los modelos mineralógicos cuyo criterio se basa en el comportamiento metalúrgico relevante determinado para cada especie de la ganga. Con esta información se definen dominios mineralógicos que quedan determinados con la información mineralógica obtenida de la base de datos de sondajes.

Para la caracterización metalúrgica de la ganga se seleccionan cuatro muestras que representan fuertes cambios mineralógicos en cuanto a ganga reactiva se refiere. Esta selección es posible con la ayuda de un estudio previo que consistía en la caracterización mineralógica de la mena y ganga, el cual aporta la información mineralógica integral de 350 muestras estudiadas de las distintas fases de producción del yacimiento.

Una vez contruidos los modelos mineralógicos basados en el comportamiento de la ganga, se incorpora en el modelo de bloques cada uno de los dominios de la ganga reactiva definidos. Esto permite mejorar la planificación minera, además de dar a los metalurgistas una herramienta de gestión en la operación de la planta.

Las pruebas metalúrgicas realizadas forman parte del mejoramiento de la información mineralógica y herramientas predictivas del comportamiento de los minerales de ganga durante el proceso de lixiviación en pila, realizados en conjunto con el Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción, donde también fue realizada la caracterización mineralógica y parte de las pruebas metalúrgicas a escala de laboratorio.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general

Conocer el comportamiento metalúrgico de las distintas especies de ganga reactiva a través de pruebas a escala de laboratorio y construir modelos mineralógicos basados en esta caracterización metalúrgica.

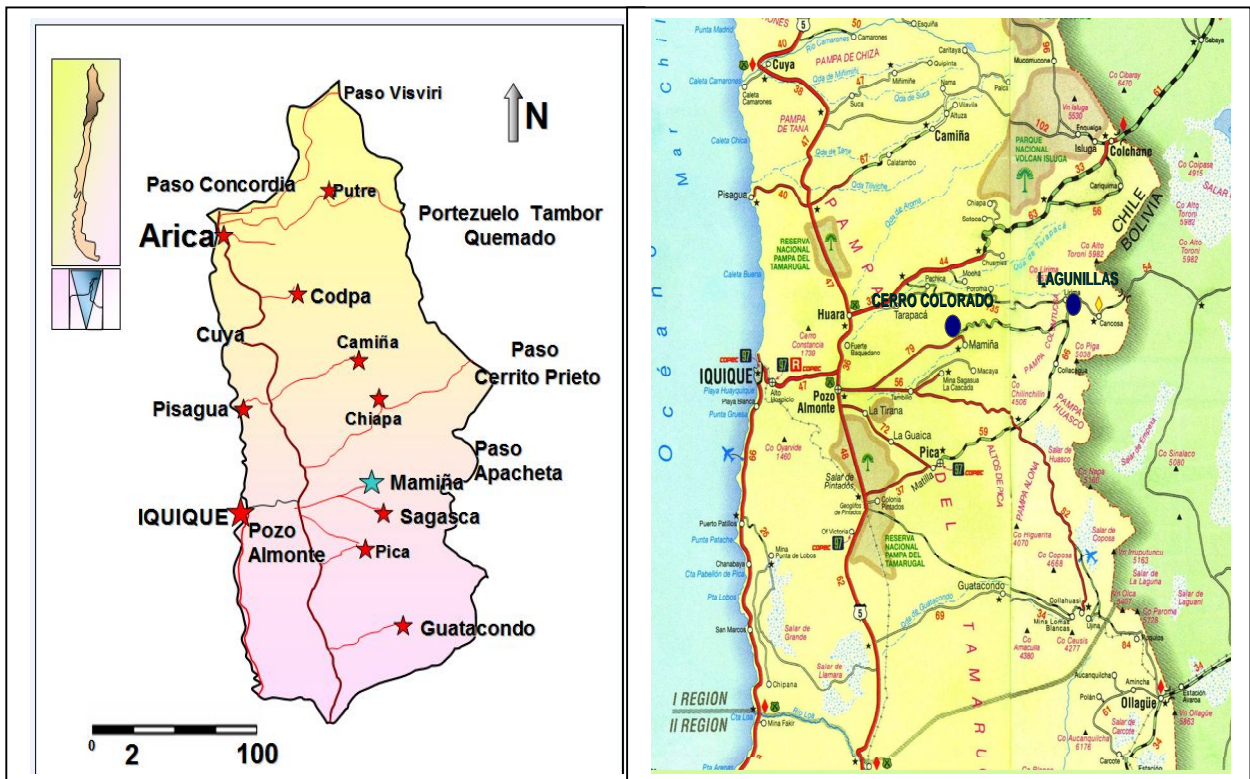
Objetivos específicos

- Correlacionar los resultados de las pruebas metalúrgicas con los estudios mineralógicos para conocer la influencia y/o interacción de la ganga reactiva en el proceso de lixiviación a escala de laboratorio.
- Determinar las especies de ganga reactiva consideradas relevantes para el proceso metalúrgico de Cerro Colorado.
- Definir dominios de estas especies de ganga reactiva e incorporar estos dominios en el Modelo de Bloques extrapolando estos dominios con la información obtenida desde la base de datos de sondajes.

1.3 UBICACIÓN Y ACCESO

El yacimiento Cerro Colorado se encuentra emplazado dentro de la precordillera andina, a una cota media de 2540 ms.n.m., cota dada por el Cerro homónimo; a una distancia aproximada de 120 Km. al este de la ciudad de Iquique y 12 Km. al noroeste del poblado de Mamiña, en las coordenadas geográficas 20°02'41" S y 69°15'35" W.

Por la costa se accede desde la carretera panamericana, adentrándose 5 Km. hacia el este a través de la ruta pavimentada A-16, para finalmente ingresar en la misma dirección a la vía R-65, recorriéndola por unos 6



a b
Figura 1.1: a) Mapa de la Primera Región con sus principales rutas de tránsito. b) Mapa mostrando ubicación de Cerro Colorado y sus accesos.

1.4 TRABAJOS GEOLÓGICOS ANTERIORES

- Brügger (1918). Publicó un estudio de aguas subterráneas en la región de Pica, al sur de Cerro Colorado, entregando un croquis geológico del área.
- Brügger (1950). Realizó un estudio de la geología de la región de Tarapacá, haciendo mención y descripción de una cubierta volcanoclástica de edad cenozoica.
- Galli (1956, en Galli, 1968). Describió la aparición de fauna fósil marina, perteneciente al Carbonífero Superior en las cercanías de la Sierra Juan de Morales.
- Galli (1957). Definió formalmente las Formaciones geológicas Cerro Empexa y Altos de Pica, en la región de Pica.
- Galli y Dingman (1962, en Acuña, 2005). Dieron a conocer los resultados en su investigación sobre los recursos de agua subterráneas en el sector de Pica y sus alrededores.
- Thomas (1967). Confeccionó la carta geológica del cuadrángulo Mamiña, siendo el primero en identificar las unidades intrusivas y metamórficas, relacionándolo con el sistema estructural dominante del sector.
- Galli (1968). Publicó la carta geológica del cuadrángulo Juan de Morales, definiendo cuatro nuevas Formaciones, a saber: Quipisca, Juan de Morales, Diablo y Duplijza.
- Bouzari y Clark (2002). Publicaron una investigación centrada en la evolución y significado metalogénico de Cerro Colorado, haciendo hincapié en los estados de evolución del pórfido, desarrollando un modelo de mineralización, basado en datos de isotopía y geocronología en alunitas del yacimiento. Además, lo correlacionaron temporalmente con otros pórfidos del Norte de Chile y las fases tectónicas involucradas.
- Acuña (2005). Realizó su memoria de título, con análisis geológico y geoestadístico del yacimiento, basado en estudios de sondajes de diamantina, y construyó modelos tridimensionales que contribuyen a la estimación de los recursos del pórfido.
- Avendaño (2006). En el marco de su memoria de título de Geólogo, caracterizó la alteración argílica con difracción de rayos x (método de Rietveld).
- Bouzari y Clark (2006). Publicaron una investigación del mineral hipógeno de Cerro Colorado.

2 GEOMORFOLOGÍA

El yacimiento Cerro Colorado se ubica en la región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas, que comprenden las regiones de Tarapacá, Antofagasta y Atacama (Börgel, 1982).

2.1 REGIÓN SEPTENTRIONAL

Esta región es una zona morfológica muy variada, que en nuestro país se extiende al norte y este, desde las fronteras de Chile-Perú, Chile-Bolivia y Chile-Argentina, respectivamente; al Oeste por el Océano Pacífico y finalmente al Sur por el río Elqui, comprendiendo un área aproximada de 290.000 km² (figura 2.1).

Dentro de esta unidad se reconocen distintas unidades micro-regionales, que desde mar a cordillera son:

- a) Farellón Costero (Cliff o Acantilado).
- b) Planicie Litoral.
- c) Llanos de sedimentación continental en las desembocaduras al mar de ríos y quebradas.
- d) Cordilleras de la Costa y depresiones internas.
- e) Gran Pampa desértica, donde se emplaza el depósito Cerro Colorado. Faja alargada en sentido NS, es una depresión relativa sumergida entre los relieves costeros y la precordillera andina, que debido a su altura y modelado irregular le confieren las características de una meseta basculada. Esta no sólo presenta rasgos cambiantes en el sentido tectónico NS, sino morfológicos externos, motivo por el cual se ha subdividido en pampas, pampa del Tamarugal (ubicado Cerro Colorado), desierto de Atacama, pampa ondulada (austral) y finalmente transicional.

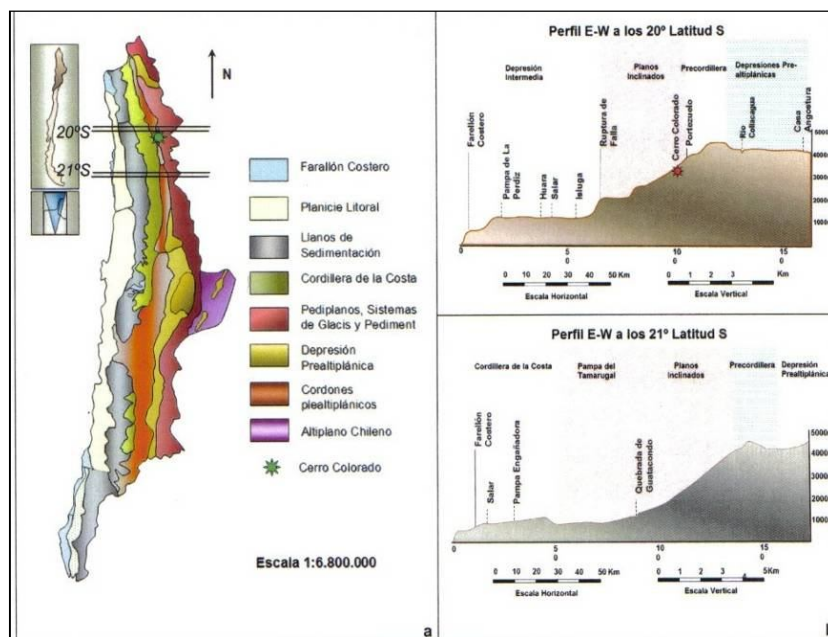


Figura 2.1: a) Mapa geomorfológico Primera agrupación Zonal. b) Perfiles geomorfológicos mostrando las principales unidades fisiográficas. Ambas figuras modificadas por Börgel (1982).

- f) Precordillera Andina. Macizo de gran unidad estructural con mayor desarrollo en el sector más sur de esta unidad zonal.
- g) Gran Fosa de los Salares Pre-Altiplánicos.
- h) Cordillera Prealtiplánica.

- i) Altiplano Chileno. Como se observa en la figura 2.1, las unidades morfológicas no sufren gran variación en el sentido NS (longitudinalidad), excepto por accidentes tectónicos que localmente basculan el relieve. Mayor variación se observa en el sentido EW debido a los cambios altimétricos. Estos cambios se inician en los acantilados costeros, pasando por los planos inclinados hasta el altiplano con cumbres que sobrepasan los 3.000 ms.n.m. tal diferencia altimétrica tiene relación principalmente con dislocaciones productos del tectonismo imperante en la Formación de esos terrenos.

2.2 GEOMORFOLOGÍA ZONAL

En la zona en que se ubica el yacimiento Cerro Colorado (figura 2.2), son claramente identificables los pediplanos y sistemas de glacis. Estos rasgos, se extienden en sentido NS, por aproximadamente 990 Km, y se inscriben entre las cotas 1500 a 3000 ms.n.m., siendo interrumpido por un accidente orográfico, la Precordillera de Domeyko. Esta unidad morfográfica está limitada por el norte por la Sierra de Guailillas y por el Sur con la Sierra Humito, al Norte de Copiapó, desapareciendo entre los 24° y 26°S (Börgel, 1982).

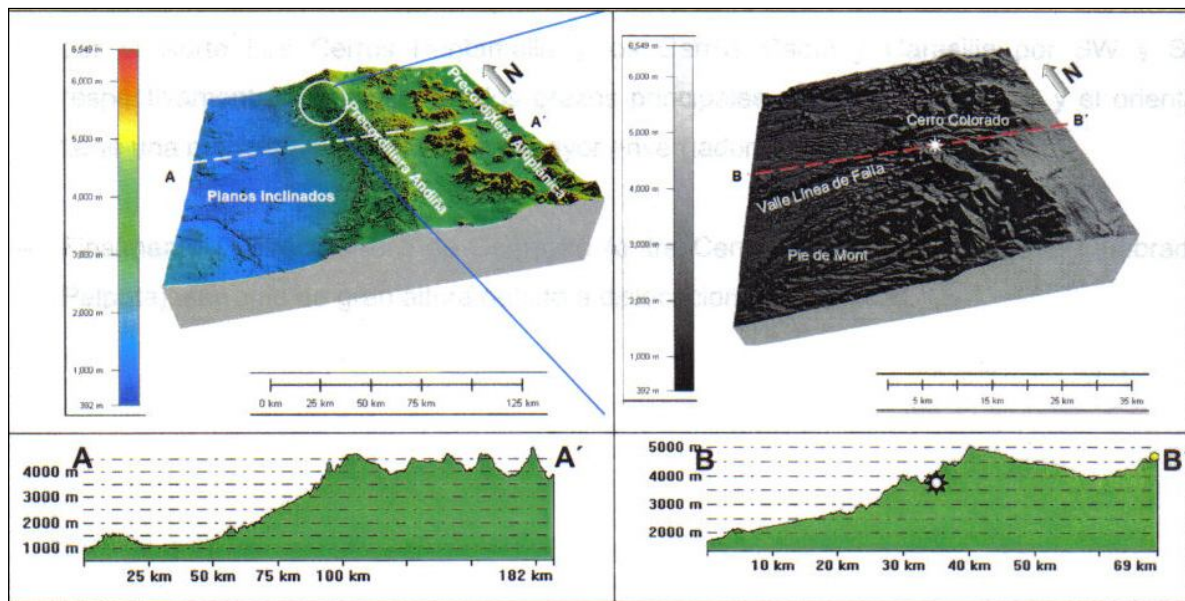


Figura 2.2: Parte superior: Elevación topográfica del área comprendida entre los 20° y 20.5° S (izquierda), y un acercamiento del área de ubicación del yacimiento (derecha). Parte inferior, perfiles de imágenes anteriores, circundante a Cerro Colorado. Avendaño (2006).

Estos planos inclinados según Börgel (1982), pueden ser divididos en función de su altitud, en dos sectores:

- i) Superior (2.500-3.000m). Corresponde a un plano inclinado que descansa sobre el zócalo, por lo tanto es clasificado como glacis rocoso.
- ii) Inferior (1.500-2.500m). Plano inclinado cubierto por arenas de diferente granulometría, que caen hacia las playas de sedimentación ubicadas en las pampas, operando como llano de base, por lo tanto sería un glacis detrítico.

Por otro lado, y más hacia el Este se observa un claro quiebre en el paisaje, dado por el inicio de la Precordillera andina, la que se extiende desde el volcán Tacora por el Norte, hasta el curso superior de la Quebrada Paipote por el Sur, siendo posible distinguir entre tres sectores:

-Precordillera del río Lauca (entre el volcán Tacora y Altos de Pica), que actúa como divisoria de aguas entre el sistema de drenaje oeste (pampas interiores) y un sistema endorreico con niveles de base ubicados en el Altiplano de Bolivia.

-Precordillera del río Loa superior (a ambos lados del curso del río Loa, siendo sus límites por Norte los Cerros Puntamalla y los Cerros Caqui y Carasilla por SW y SE respectivamente). Se divide en dos brazos principales, uno occidental bajo y el oriental alto, tiene una morfología más elevada y mayor envergadura basal.

-Finalmente la Precordillera de Domeyko (entre Cerro Limón verde hasta la quebrada Paipote), serranía de gran altura debido a dislocaciones tectónicas.

El yacimiento Cerro Colorado se encuentra inmerso dentro de las características geomorfológicas típica de la primera zona morfoestructural y se ubica dentro de las hojas Quipisca y Mamiña (escala 1:50.000 I.G.M), donde destacan los siguientes rasgos morfoestructurales. En el lado oriental, pediplanos con una inclinación SW de aproximadamente 5° y cuya base topográfica se da a los 1.228 ms.n.m, formando parte del borde occidental de la pampa del Tamarugal. Este relieve está marcado por la basculación en el sentido antes mencionado debido al tectonismo Cenozoico imperante, y se encuentra cubierto principalmente por sedimentos semi a no consolidados. Dentro de esta unidad fisiográfica las redes de drenaje se disponen en forma semiparalela con orientación W/SW y localmente divergente debido a la presencia de conos aluviales: Se observan dos sistemas principales. Por el norte los sistemas colectores son las quebradas de Parca y Munujna o Chojá, cuyas profundidades bajan hasta 1.500 y 2.000 ms.n.m, enmarcadas dentro de una topografía que se eleva sobre los 1.800 y 2.500 ms.n.m, respectivamente. Ambas quebradas se unen para formar el sistema colector principal, quebrada Quipisca (figura 2.3).

Por el sur, los afluentes principales son quebrada Juan de Morales que se disecta en tres quebradas llamadas Mamiña, Grande e Imagua, y quebrada Tambillo que a su vez se divide en dos ramas, Tambillo y Yabricoya.

Hacia el occidente, se desarrollan morfologías más altas, serranías en dirección NNE/SSW condicionados por su litología (intrusivos graníticos) y ligados a estructuras. Las principales representantes de este tipo de morfología son la Sierra de Tarapacá, Sierra Juan de Morales, la Sierra Cerro Violeta, el cordón Lallinco y el cordón Cunulpa. Sus alturas máximas están dadas por el Cerro Encañada (2.040 ms.n.m.), Cerro Duplijza (2.230 ms.n.m.), Cerro Violeta (2.520 ms.n.m.), Cerro San Félix (4.782 ms.n.m.), y Cerro Peñascos (4.269 ms.n.m.), respectivamente. Cabe destacar que el punto más elevado está formado por el Cerro Yabricoya o Columtuca, perteneciente al macizo montañoso Cunulpa-Yabricoya, cuya morfología está condicionada esencialmente a factores litológicos (erosión diferencial), aunque también se ven influenciados por modelados y depósitos glaciales, tales como circos y morrenas respectivamente.

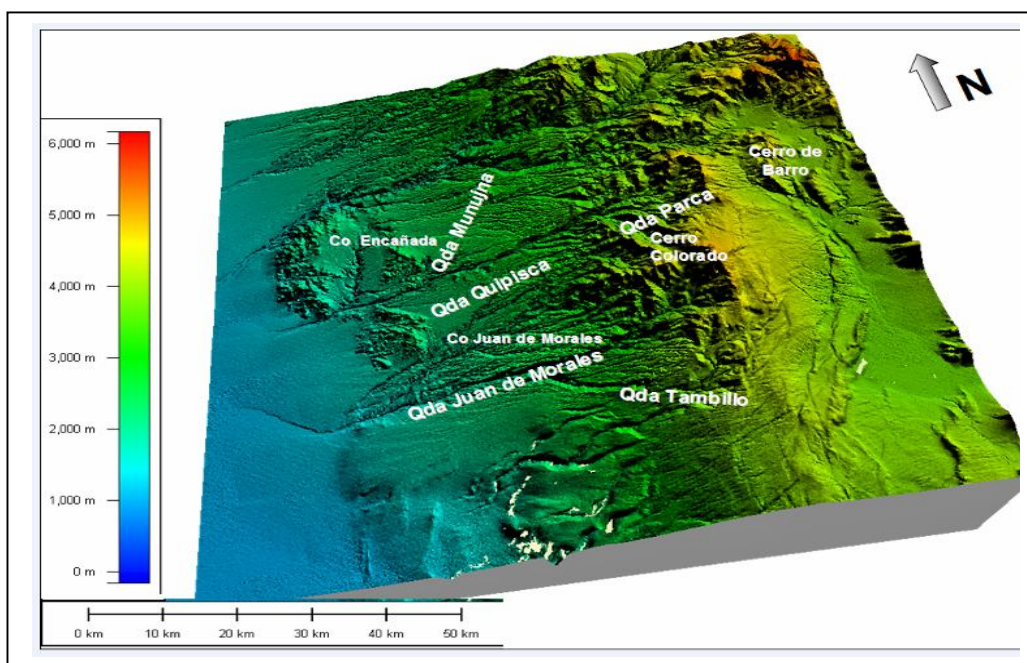


Figura 2.3: Elevación digital de los rasgos topográficos más relevantes de las cartas topográficas Quispica y Mamiña

2.3 CLIMA E HIDROGRAFÍA

Según Köppen (1936), los climas pueden ser clasificados según las exigencias climáticas de algunos tipos vegetacionales. El Norte de nuestro país se ve influenciado notablemente por la aridez y la presencia de zonas desérticas, y secas en invierno, debido al nivel de insolación y a la participación del cinturón de anticlinal.

El área de estudio se enmarca dentro de un clima seco marginal de altura, desértico con marcada oscilación térmica entre el día y la noche. La temperatura máxima promedio es de 24.4° C y la mínima de 12.5° C. Las precipitaciones estivales son un poco más frecuentes y la máxima promedio es de 0.9 mm.

El sistema hidrográfico (figura 2.4), como se mencionó en el análisis anterior cuenta con dos sistemas principales. El sistema norte, cuyo colector principal está dado por la quebrada de Quipisca (y sus estribaciones Parca y Munujna), y el sistema sur que lo conforma la quebrada Juan de Morales y sus ramales más orientales (Mamiña y Tambillo).

La disposición general de las redes de drenaje están supeditadas al tipo de litología que subyace (areniscas y gravas). En el lado oeste, se desarrollan redes subparalelas tendientes a una orientación NE/SW que caen hacia el oeste debido a la inclinación topográfica de las formaciones sedimentarias paleógenas (Altos de Pica). En contraposición con el lado este, donde se reconocen algunas redes divergentes debido a la presencia de pequeños conos aluviales en las laderas de las topografías más abruptas; además se identifica la presencia de redes en “peineta” sobre litologías intrusivas.

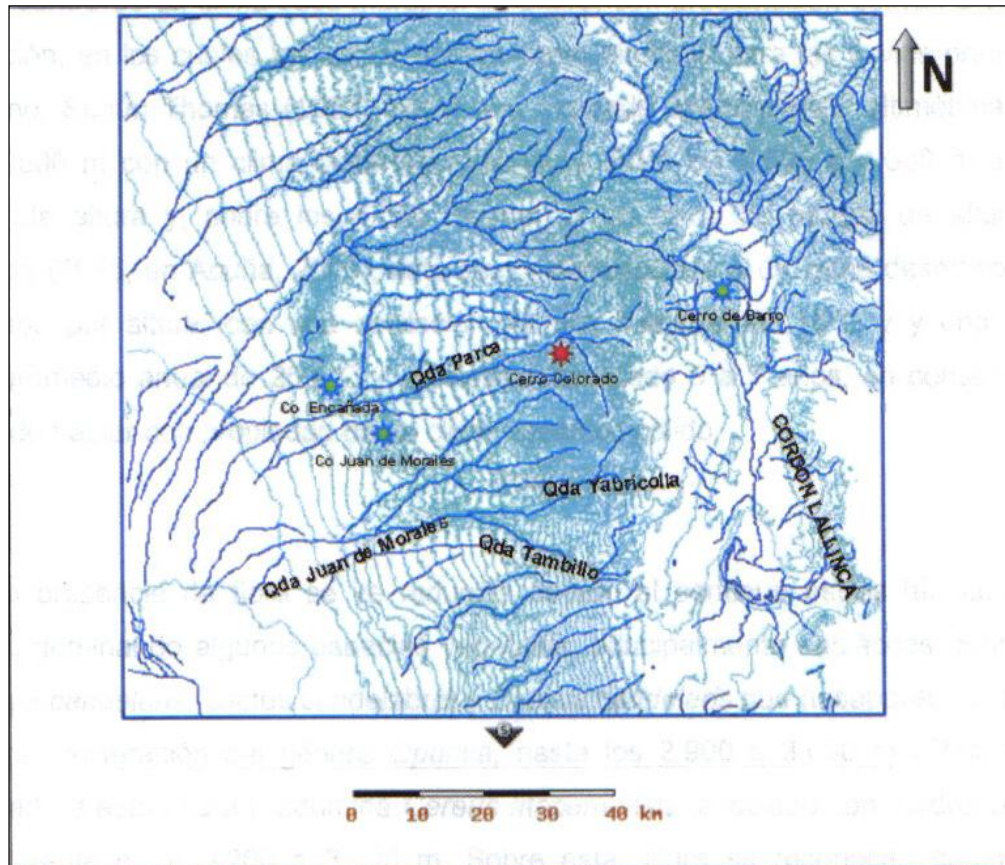


Figura 2.4: Red de drenaje con las principales toponimias.

Los recursos hídricos en el área son muy limitados; sin embargo, evaluando los gastos de las quebradas con los cursos de agua de la parte baja del cuadrángulo Mamiña, Thomas (1967) postula, que de existir acuíferos, deberían estar asociados a la Formación Altos de Pica. La escasez del recurso hídrico en el sector condiciona las operaciones mineras, particularmente en el yacimiento en cuestión, como limitante a algunos de sus procesos de recuperación como en la lixiviación de pilas.

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Cerro Colorado está ubicado en el flanco oeste de la cordillera de Los Andes, y más específicamente al oeste de la Cordillera Domeyko, la que contiene un cinturón de tendencia norte-sur con depósitos porfídicos de cobre, de edad Eocena a Oligocena (figura 3.2).

Una secuencia de tobas andesíticas cretácicas, lavas, y aglomerados de la Formación Cerro Empexa se distribuyen en los márgenes del área de Cerro Colorado. Múltiples fases de pórfidos tonalíticos, granitos, y cuarzo-monzoníticos fueron emplazadas en las rocas volcánicas durante el Cretácico y Terciario temprano (figura 3.1). La mineralización de cobre está relacionada con

intrusivos de micro brecha cuarzo-monzonita y tonalita que cubren la mayor parte de las fases mineras productivas.

Las andesitas e intrusivos están cubiertas por una secuencia localmente gruesa de ignimbritas del Plioceno y gravas de la Formación Altos de Pica las que no tienen ningún interés económico pues no presentan mineralización salvo pequeñas manifestaciones muy locales de minerales exóticos producto de transporte por capilaridad de soluciones a través de estructuras.

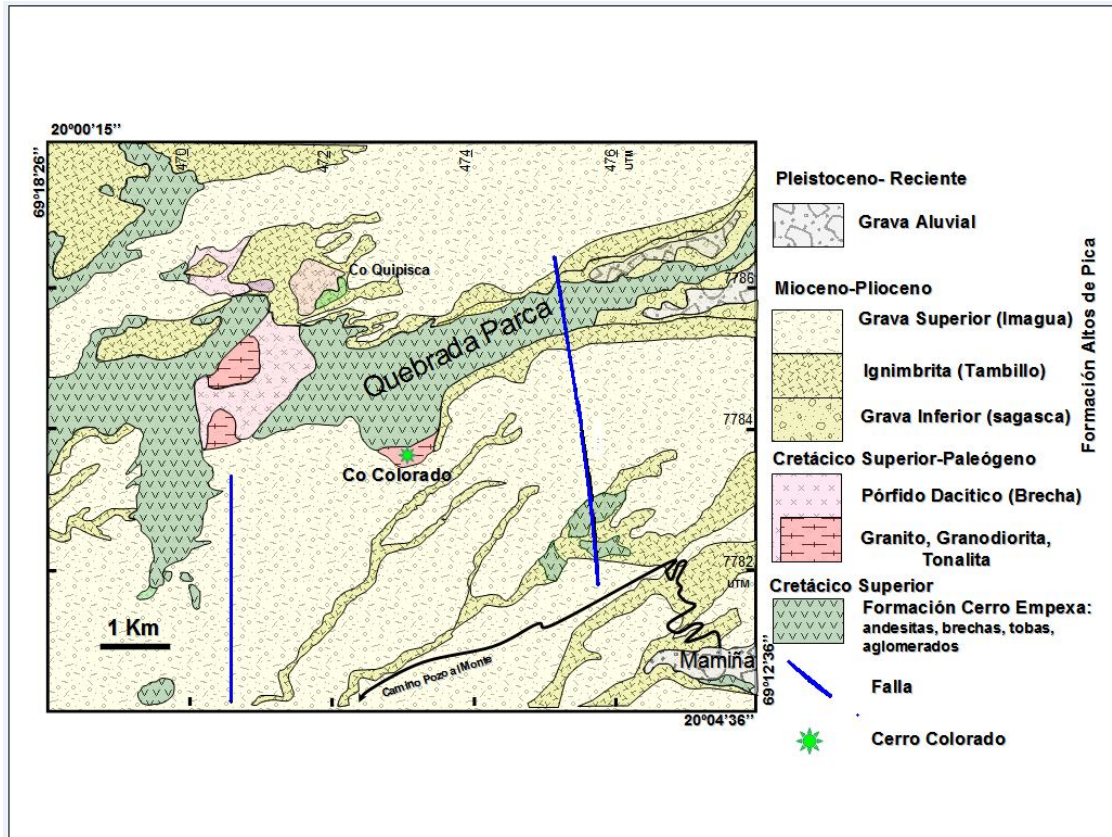


Figura 3.1: Mapa geológico regional simplificado del área de Cerro Colorado, mostrando un fallamiento con rumbo norte-sur rodeando la Sierra Juan de Morales. Un basamento Paleozoico y Mesozoico conformado por rocas volcánicas e intrusivas. Ignimbritas que afloran en los flancos de las quebradas y depósitos de gravas que forman la llamada Pampa del Tamarugal, cubriendo a las secuencias anteriores. (Thomas, 1967; Galli, 1968).

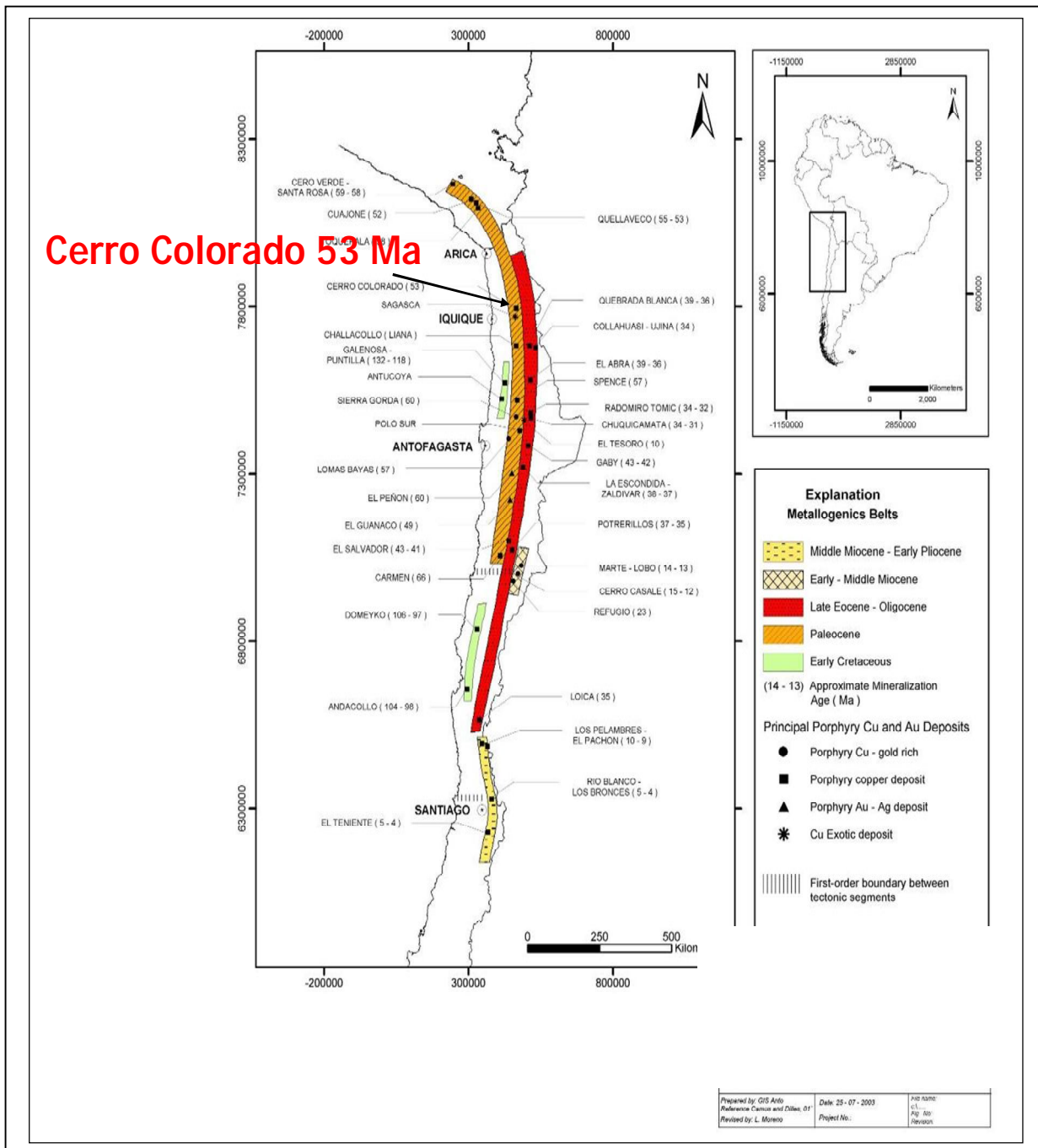


Figura 3.2: Localización de Cerro Colorado y otros depósitos y prospectos cupríferos de edad Cenozoica, en los dos cinturones de pórfidos mayores del norte de Chile y sur del Perú. (Camus, 2001).

3.2 GEOLOGÍA DISTRITAL

3.2.1 ROCAS ESTRATIFICADAS

3.2.1.1 PALEOZOICO

a. Formación Quipisca (Carbonífero Superior)

Inicialmente descrita por Galli (1956, en Galli, 1957), y denominada por este mismo autor en 1968, define como Formación Quipisca a un grupo de rocas piroclásticas (tobas riolíticas y dacitas rojas), que afloran principalmente en quebrada Parca-Quipisca inmediatamente al norte de CMCC. Su base no ha sido determinada, sin embargo sobreyace en discordancia angular (Galli, 1968) y en sectores en contacto por falla (Acuña, 2005), a capas que contienen fósiles del Carbonífero Superior. Su techo en contacto por falla y por discordancia angular, lo conforman las rocas del Carbonífero superior de la Formación Juan de Morales.

De potencia no determinada, arealmente se distribuyen en una franja de 4 Km. desde la quebrada Juan de Morales hacia el norte, con un ancho aproximado que no supera los 800m.

b. Formación Juan de Morales (Carbonífero Superior)

Descrito e identificado por Galli (1956, en Galli, 1968), es definido en las cercanías del lugar homónimo aproximadamente a 7 Km. al SW de CMCC. Se define como una secuencia sedimentaria de conglomerados y areniscas rojizas, calizas y lutitas grises, con niveles fosilíferos, cuyo espesor mínimo es de 140 m. Se distribuye localmente en una pequeña área de 4.5 Km. de largo y 450 m de ancho en dirección NNW.

Se encuentra relacionada estratigráficamente tanto en discordancia angular como en contacto por falla con la secuencia infrayacente (Formación Quipisca), y en contacto por falla con la sobreyacente (Formación Diablo).

c. Formación Diablo (Permo-Triásico)

Mencionada inicialmente por Galli (1956, en Galli, 1968), y en las cercanías de la quebrada Diablo aproximadamente a 10 Km. al SW de CMCC esta secuencia sedimentaria se encuentra compuesta por conglomerados y areniscas de colores gris rojizo, y lutitas, cuyo espesor no supera los 250 m en su localidad tipo. Sus principales afloramientos en el área, se ubican en las cercanías de la Sierra Juan de Morales y tiene una extensión de 6 Km. de largo por 1 Km. de ancho en dirección NNW.

3.2.1.2 MESOZOICO

a. Formación Duplijza (Caloviana-Oxfordiana)

Definida por Galli (1968), como una secuencia sedimentaria marina compuesta principalmente de calizas y en forma subordinada areniscas calcáreas en tonalidades grises claras, medias y ocre. Su localidad tipo se ubica a 12 Km. al norte del Cerro homónimo y a unos 10 Km. de CMCC, aflorando en una franja elongada de dirección NNW, con una superficie inferior a 1 Km. de

ancho y 6 Km. de largo, donde la potencia observada bordea los 90 m. Aunque no se considera el máximo, debido a que se encuentra limitada, en su sección tipo, por fallas tanto en la base como en el techo.

Infrayace en contacto por falla a la Formación Chacarilla, de edad Oxfordiana, y sobreyace en iguales condiciones estratigráficas a la Formación Cerro Empexa de edad Cretácica Superior.

b. Formación Chacarilla (Jurásica Superior-Oxfordiana)

Galli y Dingman (1962, en Acuña, 2005), definen en la quebrada homónima (20 Km al S de CMCC) como Formación Chacarilla a una unidad estratificada compuesta de fangolitas, lutitas y areniscas rojo grisáceas, con algunos conglomerados y lavas traquíticas de colores grises rojizas y verdosas. De espesor indeterminado, su base se desconoce y el techo lo conforma una discordancia angular que lo separa de la Formación Cerro Empexa. En el área de estudio, esta secuencia se encuentra circunscrita a dos pequeños afloramientos ubicados tanto en la quebrada, como en la vertiente sur de la Sierra Juan de Morales, siendo su superficie inferior a 1.5 km².

c. Formación Cerro Empexa (Berrasiano-Santoniano?)

Galli y Dingman (1956, en Galli, 1968), la definen como una secuencia volcánica, volcanoclástica y sedimentaria de origen continental. La unidad volcánica está compuesta principalmente de andesitas, de textura porfídica y masa fundamental hialopilitica y pilotaxítica. También se describen en forma subordinada latita, granófiro, toba andesítica y traquitas (figura 3.3).

Para esta unidad se estimó un espesor mínimo aproximado de 250 m (medido en las cercanías del Cerro Violeta al SW de CMCC, Cuadrángulo Juan de Morales) y sus relaciones estratigráficas en base y techo son de discordancia angular con la Formación Chacarilla (Oxfordiano) y la Formación Altos de Pica respectivamente.

3.2.1.3 CENOZOICO

a. Formación Altos de Pica (Plio-Pleistocena)

Galli (1956, en Galli 1968), la define en las cercanías de la localidad de Altos de Pica, como una secuencia sedimentaria de disposición homoclinal, constituida por tres miembros, a saber: Sagasca (inferior), Tambillo (medio), Imagua (superior) y cuyo espesor estimado es aproximadamente de 450 m. Tanto en las cartas Juan de Morales como Mamiña se encuentra ampliamente distribuido, principalmente en zonas topográficamente deprimidas (figura 3.3). Sobreyace en discordancia angular a la Formación Cerro Empexa; Chacarilla, Duplijza, Diablo y Quipisca; e infrayace a través de un plano de denudación a los sedimentos holocenos (figura 3.3). Los miembros inferior y superior, cuyos espesores determinados son 75 m y 300 m respectivamente, están constituidos por conglomerados y areniscas cuyos colores varían en tonos grises rojizos. Por su parte el miembro Tambillo, de 75 m de potencia, se encuentra compuesto por tobas y tobas soldadas, mayoritariamente en tonos gris anaranjados. Su ambiente de depositación se encuentra relacionado a nubes ardientes o flujos de ceniza que fueron depositados en un medio árido (Acuña, 2005). Thomas (1967) hace referencia a que este miembro, es el principal representante de la Formación Altos de Pica en el cuadrángulo Mamiña.

En cuanto a sus relaciones de contacto, sobreyace en discordancia angular a la Formación Cerro Empexa, Chacarilla, Duplijza, Diablo, y Quipisca; e infrayace a través de un plano de denudación a los sedimentos holocenos.

b. Depósitos Holocenos

Constituidos de material aluvial y eólicos procedentes de la erosión del orógeno cordillerano, se distribuye principalmente en el área de Juan de Morales, sobre el fondo de las quebradas y en los sistemas de conos aluviales que drenan hacia el WSW. Se unen para formar un pie de monte en la vertiente occidental de la Sierra Juan de Morales. Los materiales eólicos son arenas que provienen de la pampa del Tamarugal y se disponen en mantos, dunas o, como menciona Galli (1968), barjanes ubicados en los sistemas de drenaje de las quebradas Juan de Morales, Sagasca y Tambillo.

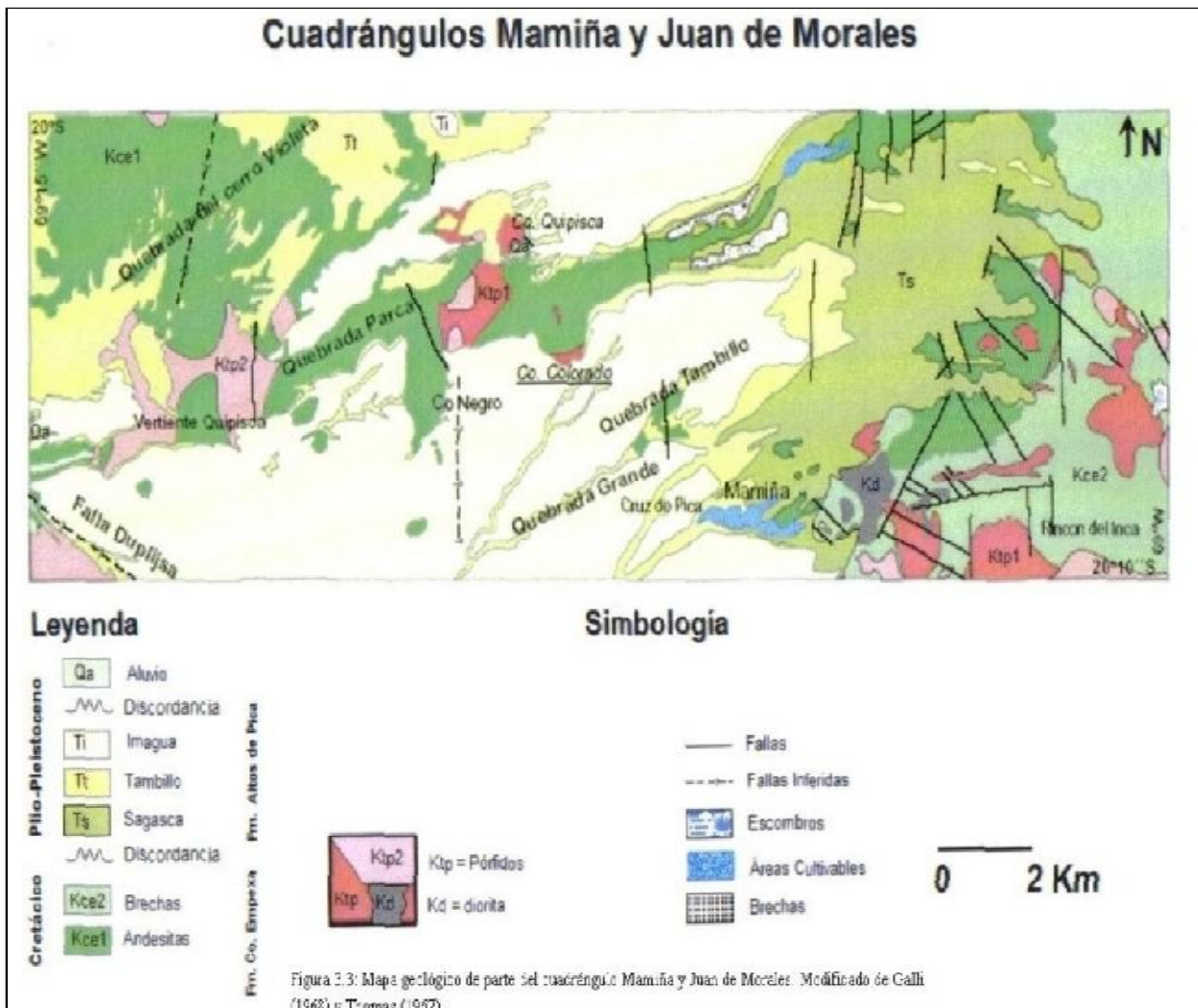


Figura 3.3: Mapa geológico del cuadrángulo Mamiña y Juan de Morales. Modificado de Galli (1968) y Thomas (1967)

3.2.2 ROCAS INTRUSIVAS

Unidad de gran distribución que se dispone en dos franjas principales, cuyas orientaciones NS y NNE, están íntimamente ligadas a los sistemas estructurales predominantes del sector. Se encuentran emplazadas en rocas paleozoicas, mesozoicas y en parte cenozoicas del sector (exceptuando la Formación Altos de Pica). Esta unidad, según Thomas (1967), puede ser dividida en dos ciclos intrusivos derivado de fases magmáticas de diferente composición.

El primero emplazado durante el Cretácico superior, involucra a rocas graníticas, granodioríticas, tonalíticas, monzoníticas, cuarzomonzoníticas, monzodioríticas, dioríticas, está relacionado a actividad tectónica de fallas mayores (Bogdanic, 1993 en Acuña, 2005). Este ciclo intrusivo originó grandes masas plutónicas, tales como el macizo Cunulpa-Yabricoya, perteneciente al cuadrángulo Mamiña, o las Sierras Juan de Morales, Tarapacá y el Cerro Violeta, pertenecientes al cuadrángulo Juan de Morales. Estas rocas presentan mayoritariamente colores grises claros, textura granular de grano medio a fino y porfídica (cuerpos hipabisales), que varían de composición entre granito, granodiorita, adamelita, tonalita (Galli, 1957), y dioritas (Acuña, 2005), siendo las de tipo granítico mayoritariamente pórfidos tonalíticos (Cerro Duplijza); pórfido feldespático (Cerro Quipisca), pórfido dacítico o traquítico (Cerro Colorado); pórfido cuarcífero (Cerro Quipisca y Cerro Colorado).

Dataciones radiométricas de plomo alfa, de una muestra de microadamelita porfídica de la pendiente occidental del cerro Juan de Morales (Ruiz *et al.*, 1960, en Galli, 1968), entrega una edad de 95+/- 10 M.a. Estudios radiométricos posteriores realizados a cuerpos intrusivos del área, indican edades entre 108 a 78 M.a. (Rogers, 1985, en Acuña, 2005). Por lo tanto el rango estratigráfico puede ser aún más acotado para este ciclo intrusivo (Albiano-Campaniano).

El segundo ciclo, de edad Paleógena, se encuentra asociado a estructuras de rumbo NW. Representa a las fases magmáticas residuales (stock) que rodean o cortan a los cuerpos batolíticos principales y tendrían relación con la alteración hidrotermal que dio origen a la mineralización cuprífera. Según Acuña (2005), este ciclo puede ser subdividido en dos estadios, uno Paleoceno-Eoceno de composición muy variada (diorita a granito), y el otro Oligoceno inferior (cuarzolítico).

3.2.3 ROCAS METAMÓRFICAS

Debido al emplazamiento de las masas plutónicas, se produce en la zona inmediatamente adyacente a ellas, un metamorfismo de contacto. Thomas (1967), reconoce metandesitas en la Sierra Tarapacá y en el “roof pendant” ubicado en las cercanías del cerro Juan de Morales. Hace alusión a la existencia de roca córnea que derivaría de las rocas carbonáticas de la Formación Duplijza.

3.2.4 ESTRUCTURAS

Dos son las discordancias angulares reconocidas entre las tres formaciones volcano-sedimentarias; se disponen entre la Formación jurásica Chacarilla y la Formación cretácica Cerro Empexa; y entre ellas y la Formación cenozoica Altos de Pica (Galli, 1968; Thomas, 1967), la

que a su vez se dispone en forma homoclinal sobre ambas secuencias sedimentarias. Thomas (1967), reconoce discordancias intraformacionales locales en las secuencias sedimentarias, asumiendo que se trata de desarmonías entre capas plegadas debido a la diferencia en la competencia de la roca.

La Formación Chacarilla, comparativamente es la que presenta el mayor grado de plegamiento, en dirección NS debido a un esfuerzo en sentido EW, en que los ejes de los sinclinales de cubetas amplias son subhorizontales (anticlinal Quilpare). Los anticlinales son de cresta agudas, simétricos a volcados (Acuña, 2005).

La Formación Cerro Empexa se encuentra suavemente plegada y contiene estructuras con orientación menos definida en miembros superiores, en contraposición a sus miembros inferiores, en las cuales este grado de plegamiento aumenta notablemente. Por lo tanto es posible extrapolar que los eventos tectónicos de mayor relevancia tanto en el modelado como en la disposición de estas secuencias ocurren durante el cretácico.

Por su parte, la Formación Altos de Pica no se encuentra afectada por plegamiento, pero sí por algunos lineamientos.

Galli (1968) y Thomas (1968), hacen referencia a dos sistemas de fallas principales (figura 3.4), uno con sensible orientación NS, que habría controlado sectorialmente el afloramiento de los batolitos ubicados en el sector noroccidental del cuadrángulo Mamiña (Cerro del Barro). El otro de dirección NW, estaría inmerso dentro de un sistema de bloques, entre el cual es identificable la presencia de fallas de gran ángulo como Longacho, Cerro Violeta, Duplijza, Diablo, Juan de Morales e Imagua.

El sistema estructural condiciona en el sector sur y este de las cartas Mamiña y Juan de Morales el grado de plegamiento de las formaciones meso y cenozoicas, volviéndolo más complejo.

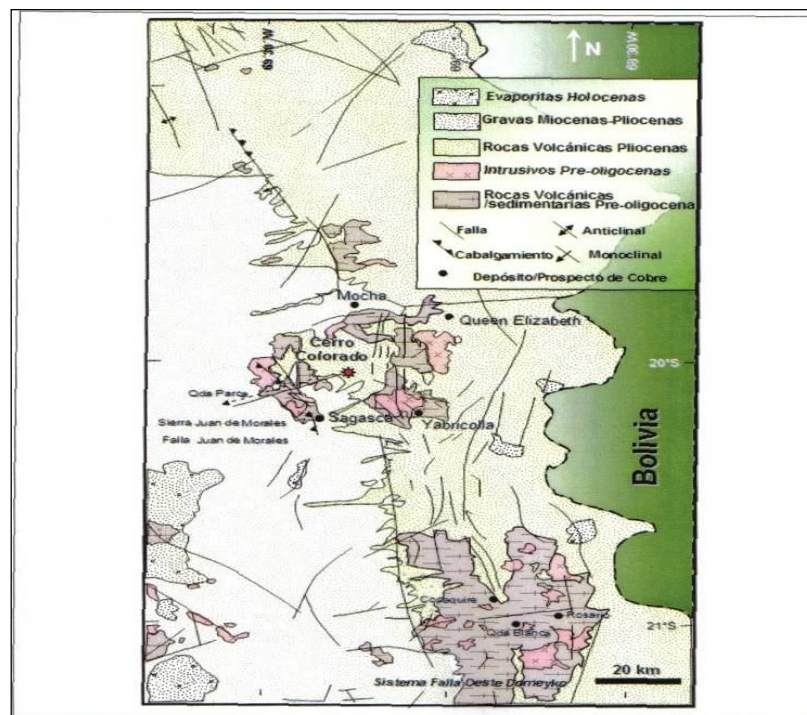


Figura 3.4: Sistema estructural del área comprendida entre los 19° y 21°S. Tomado de Bouzari y Clark (2002).

3.3 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO CERRO COLORADO

3.3.1 LITOLOGÍA

El sistema de mapeo y registro actual (“logueo”) contempla los códigos litológicos de Gravas (depósitos holocenos), Ignimbritas (miembro Tambillo), Pórfido, Brechas (terciario) y Andesitas (Cerro Empexa).

Todas las rocas intrusivas están representadas como una sola unidad en todas las plantas y secciones. Las siguientes descripciones están tomadas de Cepeda, *et al.*, (1982). La ocurrencia de estas unidades es consistente con la distribución de unidades de pórfido, brechas y andesitas según la definición del mapeo y logueo.

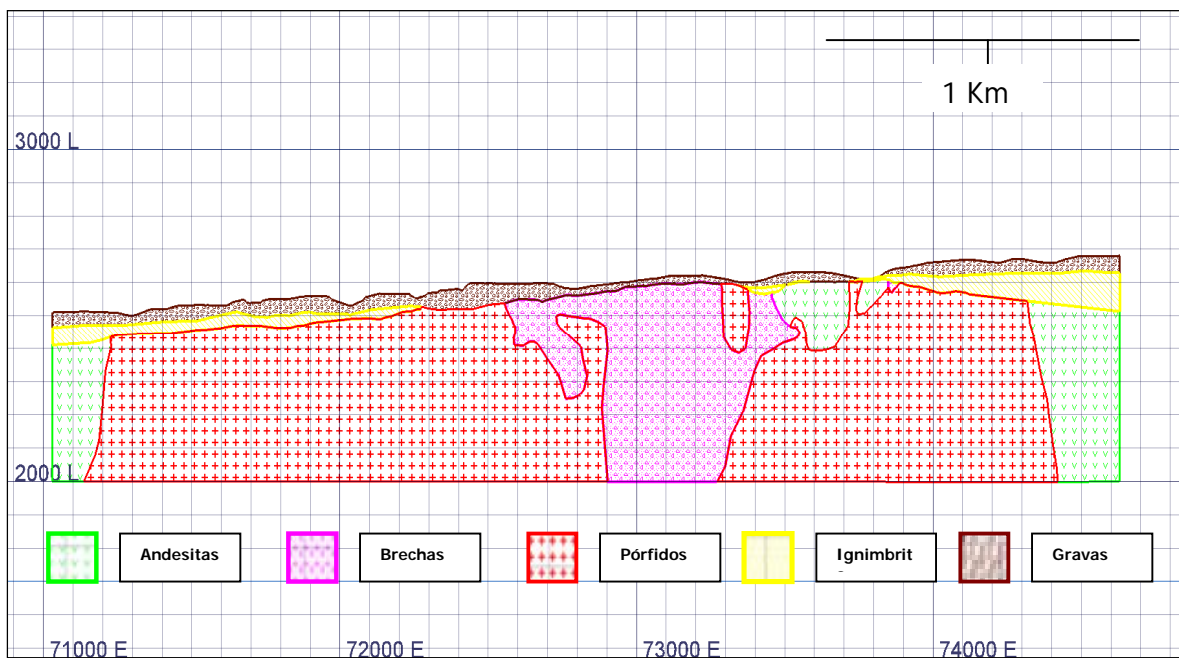


Figura 3.5: Sección en coordenadas locales 83330N, mirando al norte mostrando, las diferentes litologías presentes (pertenecientes a las formaciones y unidades ya descritas) en Yacimiento Cerro Colorado.

a Formación Cerro Empexa

Los depósitos de la Formación Cerro Empexa contemplan tobas de lapilli y líticas, lavas andesíticas porfídicas y gruesas, lavas brechosas y aglomerados. Una sección de las andesitas expuestas en la Quebrada de Parca, al norte del depósito, muestra lavas y aglomerados cerca de la base, por debajo de las tobas de Lapilli. Las rocas volcánicas tienen una inclinación menor hacia el sur. Las tobas de lapilli contienen abundantes fragmentos de vidrio y líticas. Las lavas son porfídicas y contienen de 2 a 30% de feldespatos. Los aglomerados y lavas brechosas contienen fragmentos de andesitas afaníticas a porfídicas en una matriz de ceniza afanítica. Las tobas de Lapilli son más comunes en la parte superior en el sector este del depósito, pero la lixiviación supérgena y alteración arcillosa han destruido mayormente la textura de las rocas del sector.

Dicha secuencia volcánica está levemente plegada a una escala regional (Thomas, 1967; Galli, 1968). El mapeo no publicado hecho por A. Cepeda, G.M. Ditson, y D.G. Mato (1982) delimitó

una secuencia dacítica fluidal inferior con rumbo N35°W e inclinación 35°SW, pero la mayor parte de los estratos expuestos a ambos flancos de la Quebrada Parca tienen rumbo N40°W e inclinación 15°SW. Así, en una sección este-oeste en el depósito, la secuencia volcánica debiera tener un manto aparente promedio de 10°W.

b Formación Altos de Pica y Coluvio

La Formación de Altos de Pica en la zona consiste en sedimentos post-mineral de edad Pliocena e ignimbritas (tobas y cenizas), cubren las andesitas y el pórfido mineralizado. La sección inferior de la Formación Altos de Pica contiene un conglomerado rojo derivado de la erosión de las micro-brechas cuarzo-monzoníticas de Cerro Colorado. La porción superior es una ignimbrita rosada, con un fracturamiento que permite la generación de bloques de gran dimensión (por sobre 1 m³), está cubierta por clastos coluviales y depósitos de conglomerados de edad moderna.

El espesor total de la ignimbrita, el conglomerado, y el coluvio varía desde 30 m en el sector Este, a más de 100 m en el sector Oeste. El espesor promedio de la cubierta post-mineral es cercano a los 60 m. (Figura 3.5).

c Rocas Intrusivas

Una brecha cuarzo-monzonita, una micro-brecha de cuarzo-monzonita, y un pórfido tonalítico forman cuerpos complejos que intruyen a las andesitas (figura 3.5). La forma y extensión de estas unidades cambian según el sector. Sobre una altura de 2.600 m, la brecha cuarzo-monzonita y la micro-brecha se presentan como grandes cuerpos con tendencia este-oeste en el sector oeste, pero con tendencia noreste en el sector este.

Pequeños apófisis (50-100 m de diámetro) de pórfido tonalítico envuelven los márgenes externos de la micro-brecha. Cuerpos brechosos en los sectores este y oeste se unen por debajo de la cota 2.550 m formando un gran cuerpo con elongación noreste, siempre rodeado de apófisis de pórfido tonalítico. El número y extensión de los intrusivos de pórfido tonalítico se incrementa con la profundidad, eventualmente uniéndose por debajo de la cota 2.450 m. para formar un gran stock, rodeado de apófisis de pórfido, entremezclados con cuerpos de micro-brecha cuarzo-monzonítica. La mineralización en el sector Este está centrada en el flanco sur de la micro-brecha cuarzo-monzonítica, donde existen numerosos apófisis de pórfido tonalítico instruyendo a las andesitas. La mineralización en el sector Oeste está centrada en la mitad sur del cuerpo de pórfido tonalítico con tendencia este-oeste, donde masas con abundante brecha cuarzo-monzonítica están presentes.

i) Pórfido Tonalítico

Hay dos tipos de tonalitas presentes según Cepeda, *et al.* (1982). El pórfido cuarzo-tonalita contiene fenocristales de cuarzo grandes (2-3 mm), correspondiente aproximadamente a un 5% de la roca. También existen fenocristales de plagioclasa subhedral, hornblenda, y ocasionalmente de ortoclasa. La biotita está presente en una matriz de cuarzo-plagioclasa. La alteración fílica ha transformado los minerales máficos a sericita y clorita. El pórfido de cuarzo tonalita ha sido identificado en sondajes de diamantina en el sector noroeste del depósito, y en las galerías en el sector centro-este del depósito.

El pórfido tonalítico con feldespato ha sido mapeado en labores subterráneas de exploración y en los sondajes en el centro de la brecha de cuarzo-monzonita que conforma el Cerro Colorado.

Este pórfido contiene de 10 al 30% de fenocristales de plagioclasa y ortoclasa de 2 a 5 mm en tamaño, localizados en una masa afanítica. Fenocristales de hornblenda y biotita están presentes ocasionalmente. La biotita y la hornblenda han sido reemplazadas por clorita en la zona de alteración hipógena fílica. La hornblenda ha sido reemplazada por biotita en la zona de alteración hipógena potásica.

La brecha porfídica de tonalita se evidencia en sondajes del extremo sudeste del depósito (Cepeda, *et al.*, 1982). Se puede distinguir de la micro-brecha por su composición tonalítica y fragmentos de brecha de mayor tamaño.

ii) Cuarzo-Monzonita y Micro-brecha Cuarzo-Monzonítica

La micro-brecha cuarzo-monzonítica se deriva de una brechización hidrotermal intensa de un cuerpo original de cuarzo-monzonita. Las dos unidades son casi indistinguibles debido a la gradación desde las áreas no brechizadas a las fuertemente brechizadas. Una fuerte alteración hidrotermal y brechización enmascara los minerales y la textura original de la roca. Una matriz silíceo contiene un mosaico de fenocristales de cuarzo y sericita y arcillas derivadas de los feldespatos. Los ojos de cuarzo son de aproximadamente 2 mm de diámetro y conforman aproximadamente 1 a 2% de la roca. Los minerales máficos son raros. La micro-brecha consiste en fragmentos angulares a sub-redondeados de roca rica en cuarzo, localizada en matrices de cuarzo finamente brechizado, sericita, y arcilla. Los fragmentos de brecha varían de 2 mm a más de 2 cm en dimensión transversal. Localmente se encuentran fragmentos de andesita y pórfido tonalítico.

Algunos “diques de guijarros” (pebble dikes) han sido identificados en la galería de exploración y varios sondajes de diamantina en el sector este del depósito. Los diques contienen fragmentos redondeados de cuarzo-monzonita en una matriz finamente molida que contiene abundantes óxidos de Fe, además de sulfuros. Cepeda, *et al.* (1982) interpretan los diques como emplazamientos tardíos de la brechización hidrotermal de la tonalita y cuarzo-monzonita original.

La presencia de fragmentos de pórfido tonalítico en la micro-brecha cuarzo-monzonítica sugiere que la cuarzo-monzonita fue emplazada después del pórfido tonalítico. Cepeda, *et al.* (1982) creen que la intensa alteración hidrotermal y brechización de la cuarzo-monzonita resultó en la deposición de la mineralización de Cu. La mineralización ocurre principalmente en andesita, pórfido tonalítico, y dentro de pequeños cuerpos de brecha. Los márgenes de los cuerpos brechosos de mayor tamaño pueden estar enriquecidos. Los centros silíceos de las unidades de brecha presentan generalmente mineralización menor.

3.3.2 ALTERACIÓN

Se han identificado cuatro fases de alteración principales, según Cepeda, *et al.* (1982). Zonas de alteración potásica, fílica, y propilítica que están asociadas temporalmente con la mineralización de cobre; una silicificación de la micro-brecha cuarzo-monzonítica y de los márgenes de los cuerpos intrusivos. Esta puede haber sido anterior a la mineralización de cobre, y haberse formado después del emplazamiento de los plutones de cuarzo-monzonita, y durante las etapas iniciales de la alteración y brechización hidrotermal. Alternativamente la silicificación puede haber ocurrido durante el colapso final de la celda hidrotermal cuando los fluidos hidrotermales se mezclaron con las aguas de meteorización.

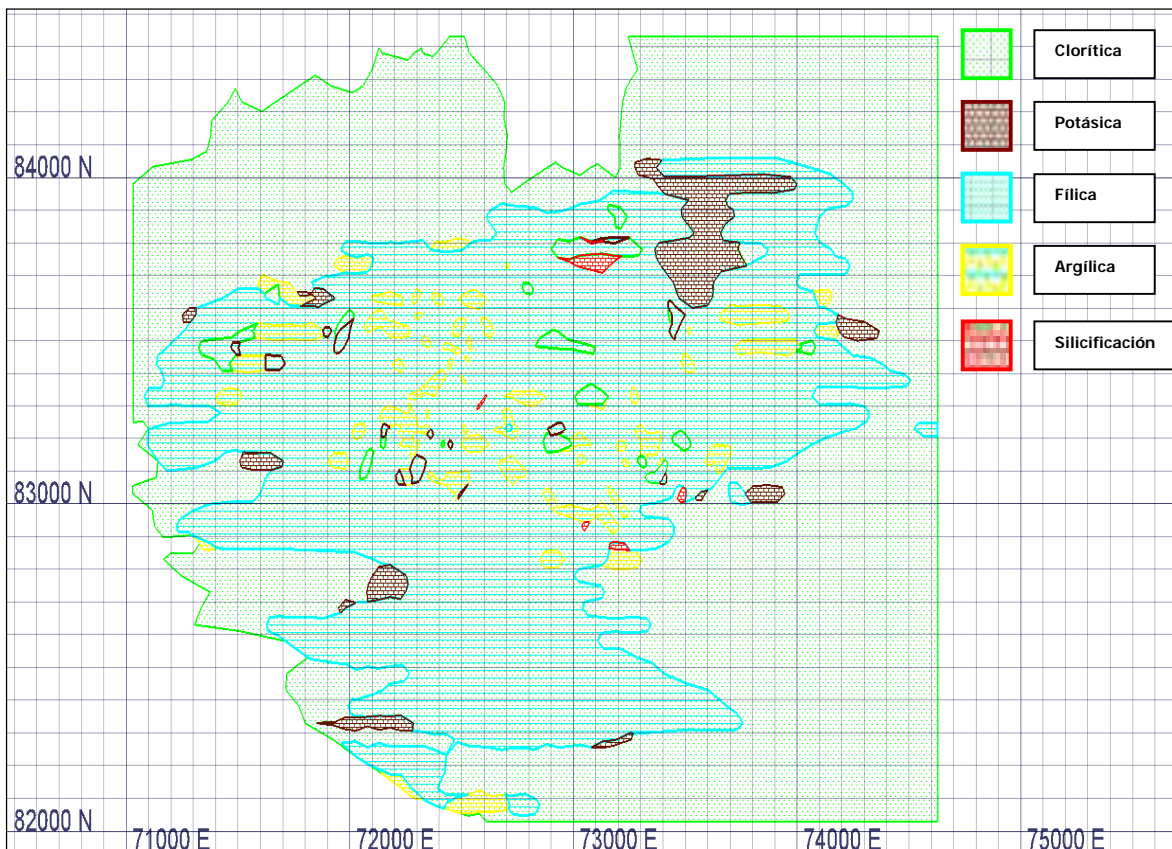


Figura 3.6: Sección horizontal a cota 2400 ms.n.m, mostrando las distintas alteraciones presentes en Yacimiento Cerro Colorado.

a Alteración Clorítica-Filica/Verde

Se han identificados distintos tipos de alteración clorítica-filica/verde en secciones delgadas obtenidas de los sondajes. Las fases de esta alteración están sobre-impuestas con alteración de arcillas asociada con la lixiviación supérgena. Se requiere un trabajo mayor en secciones delgadas para poder definir adecuadamente dichas zonas de alteración. Sin embargo de los mapeos de sondajes se observa una clara asociación de clorita conviviendo con alteración cuarzo sericítica en proporciones variables. Cuando se está en presencia de dicha asociación el contenido de cobre disminuye en forma consistente lo que ha llevado a separar esta unidad, además el macizo mejora notablemente desde el punto de vista geomecánico.

b Alteración Potásica

En todo el sector sondeado se encuentran remanentes de la alteración potásica. Los minerales hipógenos potásicos se encuentran generalmente por debajo de la cota 2450 m, donde la lixiviación supérgena es menos evidente. La ortoclasa reemplaza la plagioclasa, y la biotita reemplaza la hornblenda en la alteración cuarzo-monzonita y la tonalita. Biotita fina diseminada reemplaza a la masa máfica en las andesitas. Comparando el Sector Este con el Oeste, la alteración potásica es más evidente en la cuarzo-monzonita, la micro-brecha cuarzo-monzonítica, y el pórfido tonalítico. Esto es posiblemente porque en el sector Este se desarrolló un centro de

alteración potásica mayor, o porque la alteración potásica en el Oeste puede estar oscurecida por alteración arcillosa supérgena posterior.

c Alteración Fílica

La andesita, el pórfido de cuarzo-monzonita, la micro-brecha, y la tonalita se han alterado a sericita/moscovita, con cuarzo y pirita en la zona fílica. La alteración fílica consiste en la sericitización de los feldespatos, el crecimiento de cristales de cuarzo en la masa, y la depositación de abundante pirita. Los minerales máficos se alteran a clorita. La alteración fílica está presente sobre alteración potásica anterior, y a su vez está sobre-impuesta por la formación de caolinita y alunita durante la lixiviación posterior supérgena. Esta alteración está presente en todos los sectores sondeados, pero principalmente en la parte central del depósito.

d Alteración Propilítica

La alteración propilítica se evidencia en afloramientos en la Quebrada de Parca y en algunos de los sondajes en las márgenes del depósito. Las andesitas son las rocas más comúnmente afectadas, la que se cloritiza fuertemente y contiene epidota diseminada y en vetillas.

e Silicificación

La masa de la micro-brecha cuarzo-monzonítica está, localmente, fuertemente silicificada. También se evidencia la silicificación de la andesita a lo largo de los contactos con el pórfido tonalítico y la alteración cuarzo-monzonita. Las unidades silicificadas pueden estar poco o muy mineralizadas.

f Alteración Argílica Avanzada

La alteración de feldespatos y la masa rocosa a caolinita, alunita, pirofilita, diáspora, y dictita puede ser un evento hipógeno tardío. Se debe entender más la temperatura de Formación de las distintas arcillas antes de poder separar la alteración argílica avanzada hipógena de la supérgena.

3.3.3 GÉNESIS ALTERACIÓN SUPÉRGENA

La alteración supérgena se formó durante la lixiviación de rocas ricas en sulfuros. El ácido generado por la interacción de aguas subterráneas y sulfuros, lixivió el cobre de los sulfuros y los re-depositó como minerales oxidados de cobre sobre el nivel freático, y como sulfuros supérgenos debajo del mismo. Estas soluciones ácidas también convirtieron las plagioclasas, ortoclasas y la sericita en caolinita, alunita, ópalo, pirofilita, y montmorillonita. La roca resultante es relativamente suave, y presenta vetillas con espacios vacíos (“vuggy”) de cuarzo, caolinita, alunita, limonita, y jarosita.

La alteración arcillosa supérgena más intensa debiera ocurrir donde la alteración fílica, rica en pirita, se desarrolló mejor. Esto se confirma por la abundancia de las zonas de alteración arcillosa en al área de mayor espesor al este del depósito.

Los análisis PIMA del espectro mineral en muestras de diamantina y de sondajes de aire reverso demuestran que la siguiente alteración de las fases minerales hipógenos ocurre en la zona supérgena:

- La sericita de la zona de enriquecimiento se altera a illita.
- La illita en la zona de enriquecimiento se altera a caolinita donde existieron las condiciones ácidas más fuertes.
- La illita, caolinita y alunita están presentes en zonas de transición donde la lixiviación no fue completa.
- La caolinita y la alunita están presentes donde existieron condiciones fuertemente ácidas y oxidantes. La caolinita fue probablemente derivada de la alteración arcillosa de los feldespatos.
- La biotita en las zonas potásica hipógenas se altera a clorita.
- La smectita y nontronita se forman a partir de minerales máficos y plagioclasas en andesitas.
- La pirofilita, la diáspora, y la dictita aparecen con la alteración arcillosa avanzada en la zona lixiviada.

3.3.4 MINERALIZACIÓN

La mineralización de cobre ocurre en una serie de capas sub-horizontales de minerales de óxidos y sulfuros supérgenos. La mineralización ocurre principalmente en pórfidos y marginalmente en andesita (roca de caja) con una tendencia este-oeste a noreste, donde las andesitas fueron instruidas por una serie de micro-brechas cuarzo-monzonítica, pórfidos tonalíticos, y pórfidos cuarzo-monzoníticos.

La mineralización de cobre se extiende al menos 2.300 m en la dirección suroeste-noreste, y de 1.000 m a 2.000 m en la dirección norte-sur. Con la excepción de minerales oxidados de cobre expuestos en el costado sur de la Quebrada de Parca, el depósito está cubierto por gravas e ignimbritas, post-mineral de la Formación Altos de Pica.

En su sección en planta más representativa (cota 2400, figura 3.7), vemos una extensión de los cuerpos mineralizados que abarca un área de 3 Km. en el este-oeste y 2 Km. En la norte-sur.

A diferencia con el modelo geológico de largo plazo anterior (2003), producto de las nuevas campañas de sondajes con fines de evaluar nuevos recursos fuera del actual pit final, se observa una mayor continuidad de los cuerpos de óxidos hacia el sur-oeste.

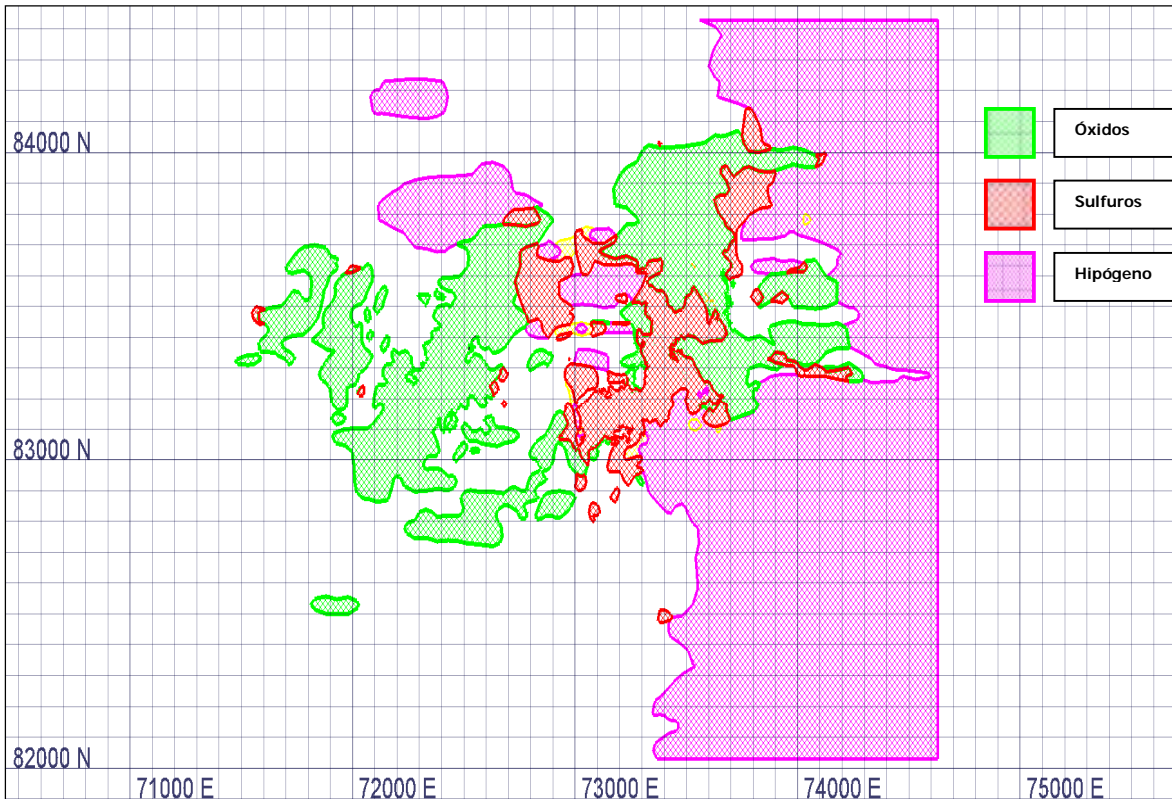


Figura 3.7: Vista en planta nivel 2400, mostrando los distintos tipos de mineralización presentes en Yacimiento Cerro Colorado.

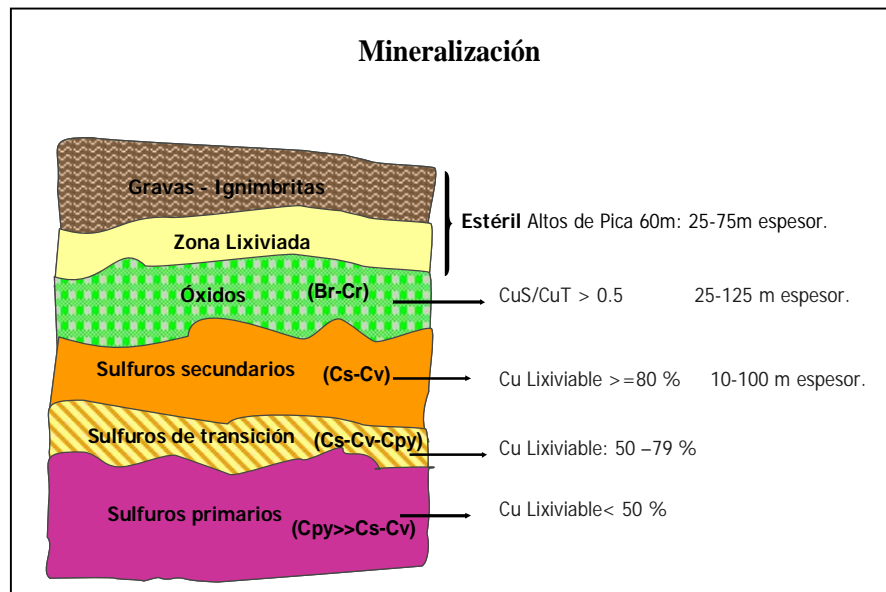


Figura 3.8: Definición de los diferentes tipos de mineralización presentes en Yacimiento Cerro Colorado.

a Mineralización Hipógena

La mineralización hipógena está representada por pirita, acompañada por calcopirita, bornita, y molibdenita. Los sulfuros se depositaron en todas las rocas como disseminados o en vetas y vetillas con cuarzo-feldespato-biotita.

La mineralización hipógena original está preservada por debajo de los sulfuros supérgenos o en vetillas en la zona de transición entre los sulfuros supérgenos y el hipógeno original. La ley de cobre promedio del hipógeno original es aproximadamente de 0.20% CuT a 0.30% CuT. La molibdenita está presente con cuarzo principalmente en vetas y vetillas. La ley promedio de MoS_2 en el sulfuro supérgeno es aproximadamente 0.025%. El molibdeno no es recuperado en la planta de lixiviación y extracción por solvente.

La transición de los sulfuros supérgenos donde predomina la calcosina a la calcopirita y bornita del hipógeno está bien mapeada en aproximadamente el 90% de los sondeos. Existen algunos sondeos de exploración que no llegan a la base de la mineralización supérgena. La zona de transición (la unidad MSH, mezcla de sulfuros supérgenos e hipógenos), se ha definido utilizando mapeo de sondeos y análisis químico secuencial de cobre. En algunos casos, los análisis secuenciales empiezan y terminan en un intervalo demasiado corto para poder definir adecuadamente el espesor de la zona MSH.

b Mineralización Supérgena

La alteración y mineralización supérgena ocurre en 5 zonas distintas, generalmente ubicadas desde arriba hacia abajo como:

- Una zona lixiviada (LIX) en la cual la lixiviación ha extraído toda la mineralización de cobre.
- Mineralización supérgena que consiste exclusivamente de óxidos de cobre.
- Una zona de transición de óxidos mezclada con minerales de sulfuros supérgenos.
- Una zona de minerales de sulfuros de cobre supérgenos, con presencia mayoritaria de calcosina, y covelina en menor grado.
- Una zona de transición de sulfuros de cobre supérgenos y sulfuros de cobre hipógenos.

La mineralización supérgena de óxidos y sulfuros ocurre en capas múltiples, sub-horizontales con algunas zonas mineralizadas sub-verticales, y que se extienden aproximadamente 2.700 m este-oeste y 2.000 m norte-sur. La parte superior de la zona de óxidos más grande está a una cota promedio de 2.500 m, aproximadamente 50 a 200 m por debajo de la superficie. Existen numerosos cuerpos de mineralización de óxidos más pequeños y discontinuos por encima de esta cota. La zona lixiviada por encima de los óxidos tiene entre 25 y 75m de espesor.

c Lixiviado

La zona lixiviada contiene cantidades variables de hematina (hasta un 30%) y menor cantidad de limonita y jarosita. Los óxidos de hierro están presentes como disseminados y relleno de fracturas que representan los sulfuros que estaban presentes originalmente. El pórfido tonalítico, el pórfido cuarzo-monzonítico, y la andesita se alteran a caolinita, smectita, y alunita. La micro-brecha cuarzo-monzonita está normalmente presente como una brecha silíceas con una matriz porosa y lixiviada, con abundantes óxidos de Fe.

d Óxidos Supérgenos

La zona de mineralización de óxidos está definida como un material cuya relación de cobre soluble (CuS) a cobre total (CuT) es mayor o igual a 0.5 (figura 3.8). La crisocola es el mineral dominante pero también se puede encontrar brocantita, libethenita, malaquita, pseudo-malaquita, para-atacamita, cuprita, y tenorita (Cepeda, *et al.*, 1982).

e Mixtos Óxidos-Sulfuros

La mineralización mixta óxido-sulfuro se define como un material cuya relación de CuS a CuT está entre 0.3 y 0.5 (figura 3.8). Los minerales en esta zona son principalmente una combinación de crisocola y calcosina, que pueden estar presentes en vetas y vetillas, o como diseminados en la masa rocosa. Esta unidad tiene poca presencia espacial en el yacimiento, y en el modelo geológico, fue asimilada a la unidad de óxido.

d Sulfuros Supérgenos

El sulfuro supérgeno se define como el material para el cual la razón de cobre secuencial (soluble en ácidos sulfúrico y cianhídrico) a cobre total es igual o mayor a 0.8 (figura 3.8). En estas condiciones, la razón CuS/CuT es menor a 0.3. La calcosina y en mucho menor grado la covelina reemplazan completamente, u ocurren como revestimientos de, la pirita, calcopirita, y bornita hipógenas. Ocasionalmente se puede encontrar calcosina pulvurulenta.

e Transición Sulfuro-Hipógeno

La zona de transición de sulfuro supérgeno a hipógeno se define como el material para el cual la razón de cobre secuencial (soluble en ácidos sulfúrico y cianhídrico) a cobre total está entre 0.5 y 0.8 (figura 3.8). El cobre está presente en calcosina, covelina, calcopirita, y bornita. La calcosina y la covelina se localizan preferentemente en vetas y fracturas, pero también pueden estar como minerales diseminados.

Una sección representativa de la mineralización de Cerro Colorado se puede ver en la siguiente figura (Figura 3.9).

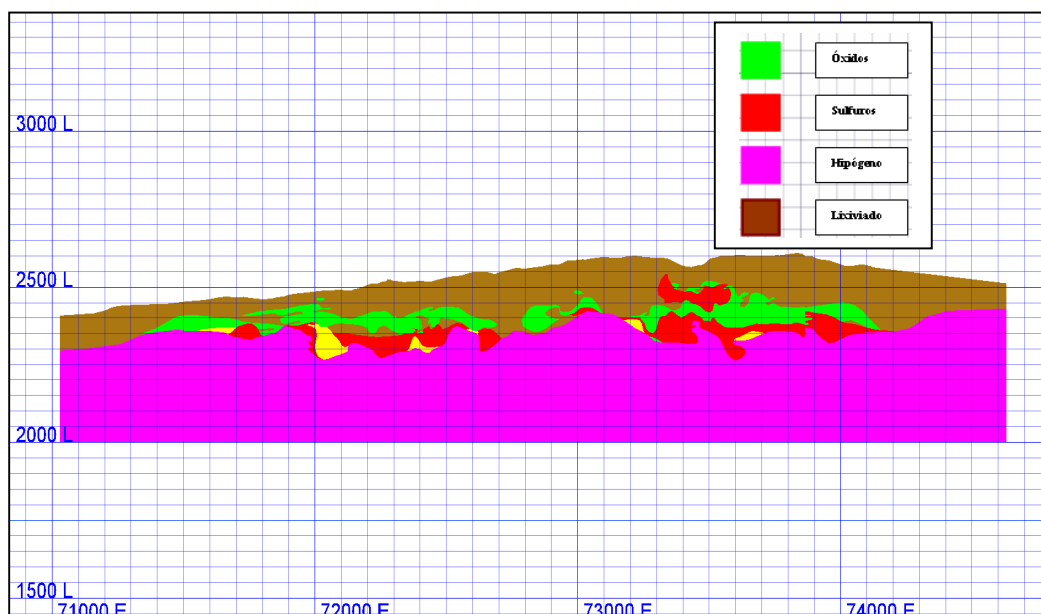


Figura 3.9: Sección en coordenadas locales 83330N mirando al norte, mostrando la mineralización en Yacimiento Cerro Colorado.

3.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

No existen estudios estructurales de detalle en Cerro Colorado. La geometría de los cuerpos mineralizados sugiere que estructuras o zonas de estructuras de alto ángulo pueden estar presentes. CMCC debe de manera urgente desarrollar un modelo estructural para lograr un mejor entendimiento de la mineralización y así permitir una mejora adicional en los modelos de recursos.

Cepeda, *et al.*, (1982) identificaron numerosas fallas con tendencia NW (post-mineral) con mapeo de superficie, y en las galerías de exploración. El rumbo de estas fallas es generalmente N60W a N70W, y tienen una inclinación de unos 70° al este.

La elongación general en la dirección NE de la mineralización del sector Este sugiere que pueden existir fallas pre-mineral, a lo largo de las cuáles se emplazaron los intrusivos y la mineralización. En el rajo actual se observan numerosas zonas de alto fracturamiento, y también algunas fallas importantes (NW y NE). También existen contactos abruptos entre zonas de lixiviado, óxidos, y sulfuros, lo que sugiere que estructuras pueden haber controlado la formación de estas unidades.

Para la definición de tendencias se ocupó como base de trabajo toda la información estructural existente a la fecha (mapeo clásico de sondajes, técnicas de televisor acústico, mapeo de cara de bancos, interpretación estructural regional y el modelo de las unidades geotécnicas básicas, Diaz *et al.* 2006).

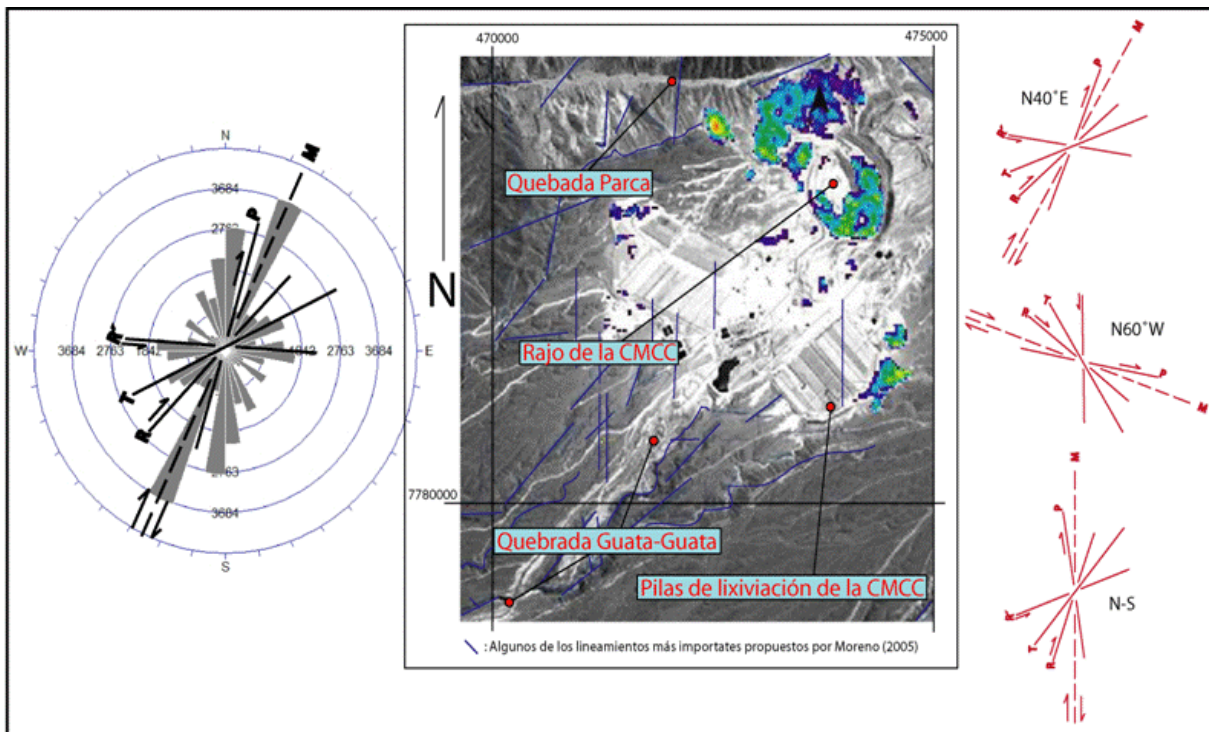


Figura 3.10: Direcciones principales de estructuras presentes en el área del Yacimiento Cerro Colorado (Díaz *et al.*, 2006)

Con el propósito de validar las direcciones estructurales predominantes preparadas para la mina, se procedió a revisar el marco geológico del entorno del yacimiento (Moreno, 2005) y compararlo con la proyección estereográfica de todos los patrones estructurales mapeados en los distintos bancos de CMCC.

El siguiente paso, consistió en conciliar la información de mapeos de superficie, mapeo de sondajes y logeo geofísico de testigos de pozo, de tal manera de revisar el grado de consistencia de la información.

El análisis de estas interpretaciones produjo las siguientes observaciones:

Se puede afirmar que en el área de la mina Cerro Colorado, existen esencialmente tres patrones de lineamientos principales; un patrón más evidente NE (N40°E aprox.), un segundo sistema con tendencia NW (N60°W aprox., localmente E-W), y uno N-S, de menor expresión en cuanto a la extensión de los lineamientos (Díaz, 2006).

En el pórfido se detectó que de acuerdo al criterio Riedel el plano de cizalle principal a partir de las estructuras secundarias, (figura 3.10), tiene un sistema estructural común N20°E, que estaría asociado a un sistema mayor principal reconocido por Moreno (2005).

En el caso del pórfido se detectó, de acuerdo a información entregada por el mapeo geofísico y de televiever, la existencia de fallas con tendencia NS, que se asocian a sistemas estructurales

subordinados, que a su vez valida los datos levantados desde el Face mapping preparado para la fase 8 y fase7.

4 METODOLOGÍA

4.1 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO DE LA GANGA

4.1.1 SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la adecuada selección de las muestras que fueron utilizadas en el estudio de caracterización metalúrgica de la ganga, se utilizó la información de un estudio mineralógico de la mena y ganga, el cual aportó la información mineralógica integral de 350 muestras estudiadas de las distintas fases de producción del yacimiento.

Se escogieron cuatro muestras representativas de las fases de explotación del yacimiento para la realización del estudio del comportamiento de la ganga en pruebas de lixiviación. Estas cuatro muestras fueron elegidas de manera de lograr un contraste en los resultados metalúrgicos y obtener resultados concluyentes en cada una de las pruebas realizadas con las muestras.

Las muestras se denominaron: M1, M2, M3 y M4.

4.1.2 PROTOCOLO DE LIXIVIACIÓN

Homogeneización de la muestra y chancado de mineral

Para generar la homogeneización de las muestras y posterior clasificación por tamaños, las muestras M1 y M4 fueron trituradas en una chancadora de mandíbula a 99% -1". Las muestras M2 y M3, por presentar mayor grado de desagregación no fue necesario someterlas a chancado. La granulometría se ajustó a la del proceso industrial de Cerro Colorado (87% -1/2" y 14% -malla 100), a través de una serie de harneros y tamices. Se prepararon triplicados de cada muestra para las posteriores pruebas en columnas y se obtuvo una muestra de cabeza para análisis (500 grs.).

Aglomeración y curado ácido

La aglomeración se realizó mediante la adición de ácido sulfúrico al 95 % y refino, con una tasa de curado de 20 y 60 Kg/ton de mineral respectivamente. Se aplicaron en forma de aerosol sobre la superficie del mineral extendido en una carpeta, con el fin de establecer el máximo contacto con el ácido. Se homogeneizó mediante un roleo, simulando la acción de un tambor aglomerador.

Carga de mineral en columnas

La carga se realizó en forma homogénea en el volumen interior de la columna, con el fin de minimizar la formación de capas freáticas producto de la ubicación preferencial de finos en ciertos sectores de la columna. El mineral aglomerado se dejó reposar por cinco días.

Lixiviación en columnas de laboratorio

La lixiviación se realizó con una solución de refino con 8,8 g/l de ácido sulfúrico. Una vez depositado el mineral en las columnas de lixiviación, éstas fueron regadas durante 7 días, con un flujo de 1 lt/hr*m², de acuerdo a la experiencia previa conocida.

Lavado del mineral lixiviado

Terminada la etapa de lixiviación, el mineral fue lavado con agua (3 veces con 1 lt c/u) a fin de poder cuantificar el atrapamiento mecánico producido durante la lixiviación.

Toma de muestras

Para realizar los análisis se tomaron las siguientes muestras:

- Muestra sólida de cabeza (500grs)
- Muestra sólida de mineral curado (50 grs / por columna)
- Muestras líquida de PLS, 3 muestras día 1 y 2; 1 muestra días 3, 4, 5, 6 y 7 (100 ml)
- Muestra sólida de mineral lixiviado (50 grs / por columna)
- Muestra líquida de lavados 1, 2 y 3 (100 ml)

En el Anexo 1 se presenta una tabla resumen del protocolo de lixiviación.

4.2 DETERMINACIÓN DE LA GANGA REACTIVA

La determinación de la ganga reactiva que afecta en forma relevante el proceso metalúrgico se hace a través de gráficos de correlación entre las mineralogías determinadas en cada muestra, con los estudios mineralógicos y difracción de rayos X, y los comportamientos metalúrgicos obtenidos de las distintas pruebas ejecutadas. Así, con este análisis quedan definidas aquellas especies de ganga reactivas que serán modeladas.

4.3 MODELAMIENTO DE LA GANGA REACTIVA

Se construye un modelo temático descriptivo de los dominios de mineralogía de ganga reactiva del yacimiento utilizando como herramienta de modelamiento el software Vulcan.

4.3.1 DEFINICIÓN DE DOMINIOS MINERALÓGICOS

La definición de los dominios mineralógicos, basados en las especies de ganga reactiva que se determinaron en la etapa anterior, se realiza con la información obtenida desde la base de datos de sondajes, que proporciona información de las distintas especies mineralógicas y sus intensidades, las que han sido registradas a través de mapeos geológicos (“logueos”). Además, existe la caracterización mineralógica con difracción de rayos X de la ganga de las distintas fases de producción del yacimiento Cerro Colorado, sobre muestras representativas de cada una de estas fases, que permite precisar y validar la definición de los dominios.

4.3.2 ETAPA DE MODELAMIENTO

Para realizar este modelo se define un volumen o cubo modelable dividido en 12 plantas espaciadas cada 20 metros entre ellas y 10 metros de influencia. Este espaciamiento fue determinado en base a la altura de banco. Utilizando el software Vulcan, en cada planta se realiza la interpretación en *layers* de los distintos dominios definidos a través de la construcción de polígonos que representan cada uno de estos dominios. A cada polígono interpretado se le asigna un *feature* específico con el nombre de la unidad, su simbología y color.

Posteriormente, con los juegos de plantas se construyen los sólidos 3D por *wireframe* de cada uno de los dominios de ganga reactiva interpretados, convirtiendo de esta forma a cada dominio mineralógico en un volumen.

4.3.3 INCORPORACIÓN DE VARIABLES EN MODELO DE BLOQUES

Cada dominio mineralógico está representado por un volumen o sólido 3D. Desde cada uno de estos volúmenes, y utilizando el software Vulcan, se realiza la asignación directa al modelo de bloques del dominio que representa. Esto se hace realizando el *flageo* o “pintado” del bloque con la variable del dominio correspondiente que coincide espacialmente.

Así, cada bloque del modelo tendrá incorporada una variable que representa a un dominio de ganga reactiva determinado, asociado a un comportamiento metalúrgico específico.

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO DE LA GANGA

5.1.1 DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA

Observación macroscópica

Aspecto general de las muestras en dos tamaños, ¾” y 4 mallas Tyler. Se observa la diferencia de color y el tipo de clasto, desde muy redondeado en M3 hasta muy anguloso en M4. La mayor dureza la presenta M4 seguida de M1 y la muestra más blanda es la muestra M3.

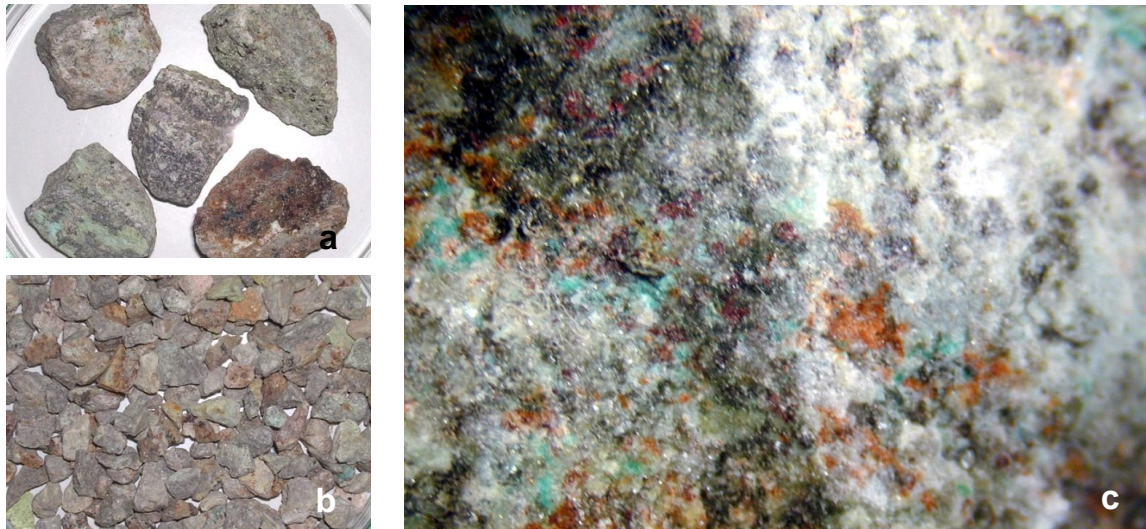


Figura 5.1: M1. (a) tamaño $\frac{3}{4}$ " y (b) 4# Tyler muestran clastos angulosos, (C) diseminación fina de crisocola. Goethita en sectores irregulares de la muestra. Abundante biotita secundaria. Lupa 3x10.

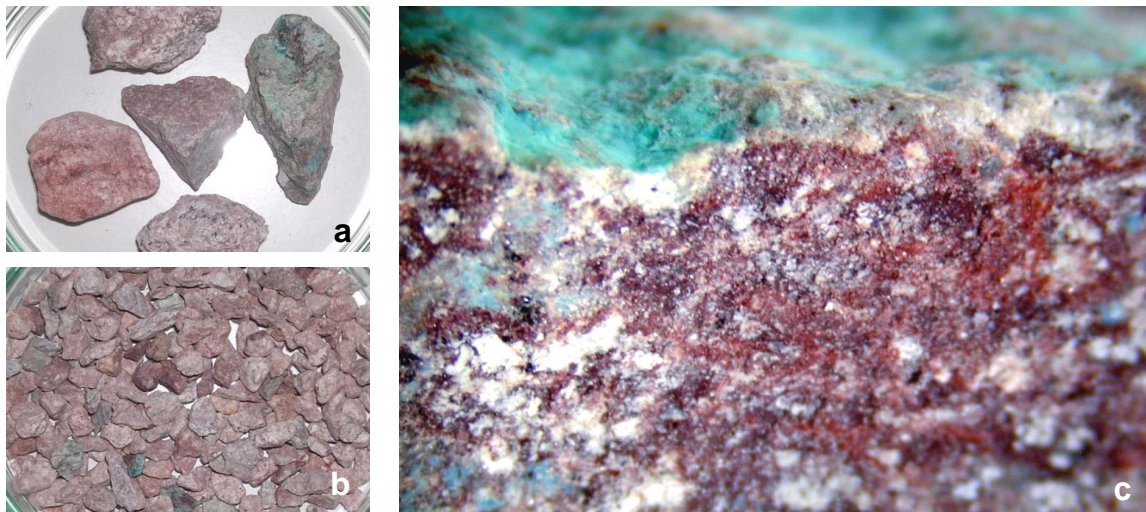


Figura 5.2: M2. (a) tamaño $\frac{3}{4}$ " y (b) 4# Tyler muestran clastos redondeados, (C) Fuerte alteración cuarzo-sericitica y en sectores irregulares alteración limonítica (goethita). Vetillas con crisocola cortan la muestra. Lupa 3x10.

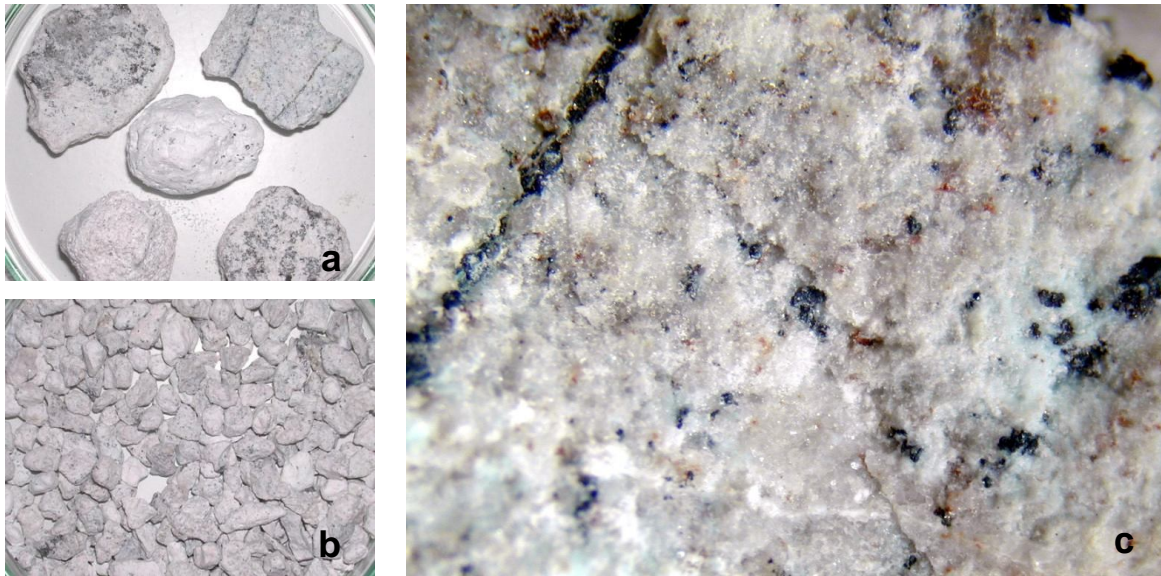


Figura 5.3: M3. (a) tamaño $\frac{3}{4}$ " y (b) 4# Tyler muestran clastos redondeados, (C) Fuerte alteración de tipo cuarzo-sericítico a la que se sobreimpone una alteración argílica, con destrucción de feldspatos y minerales ferromagnesianos. Vetillas visibles de covelina y diseminación gruesa de covelina. Lupa 4x10.

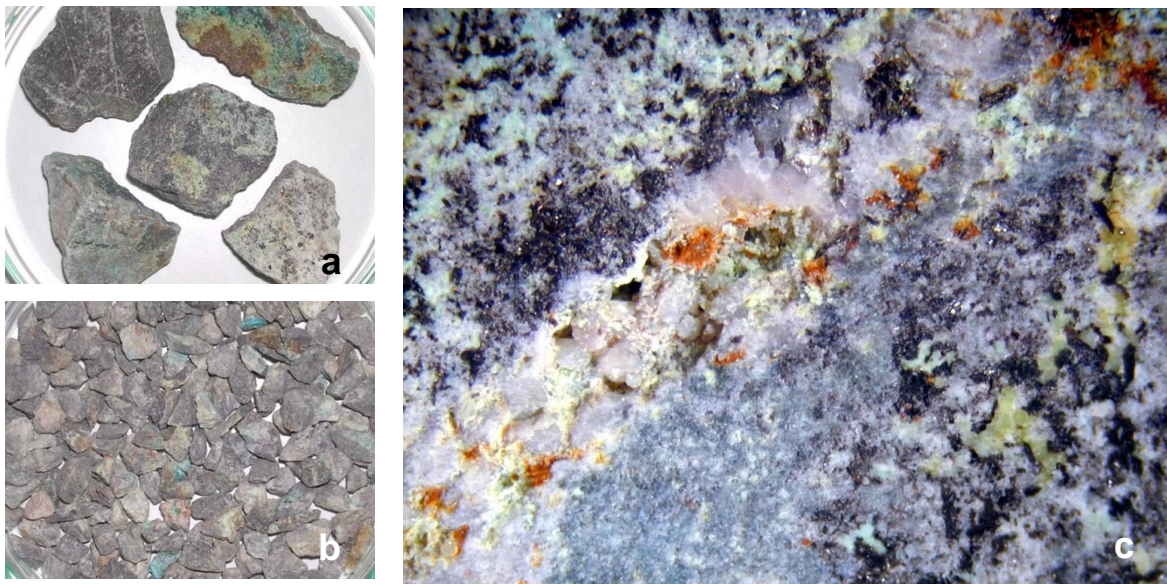


Figura 5.4: M4. (a) tamaño $\frac{3}{4}$ " y (b) 4# Tyler muestran clastos muy angulosos, (C) Sector mostrando vetilla de cuarzo con arcillas verdosa y goethita. En las cajas abundante biotita secundaria en agregados cumulares (mineral negro) y arcillas verdosas impregnadas con cobre. Lupa 3x10.

Observación microscópica

Las figuras 5.5 a 5.8 muestran las micrografías de las muestras estudiadas.

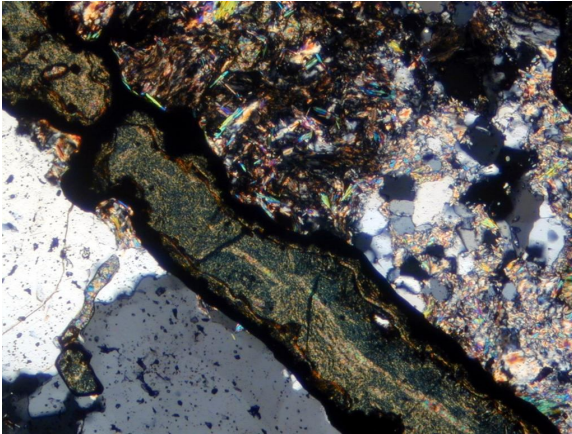


Figura 5.5: M1. Vetilla de cuarzo con crisocola en el contacto con la roca de caja alterada a cuarzo-sericita. Luz transmitida, Nic X (5x10).

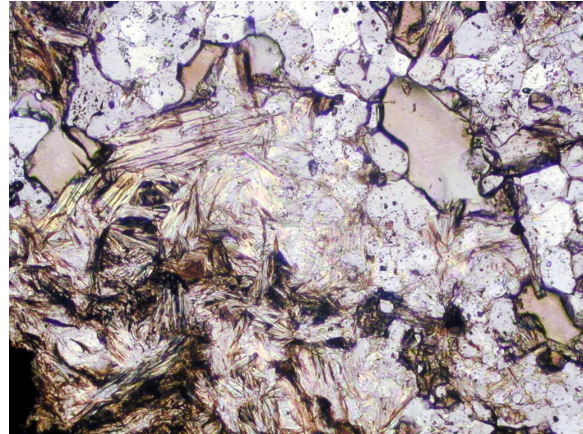


Figura 5.6: M2. Detalle de la alteración cuarzo-sericita-muscovita-clorita. Nic // luz transmitida, 10x10.

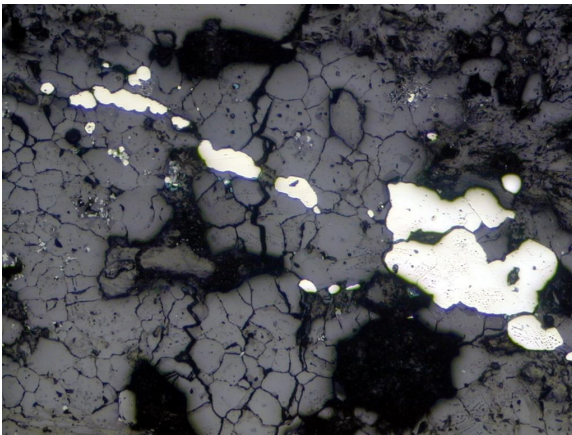


Figura 5.7: M3. Vetillas de pirita y cuarzo. Luz reflejada, Nic //, (5x10).



Figura 5.8: M4. Vetilla de crisocola parda con fases de Cobre Negro. Luz transmitida. Nic. // (5x10).

La tabla 5.1, resume las principales características de las descripciones mineralógicas en las muestras estudiadas.

Tabla 5.1: Resumen descripciones mineralógicas.

Muestra	Macroscópica		Petrográfica calcográfica		
	Mena	Alteración	Vetillas / Fracturas	Mena	Alteración
M1	crisocola (5%), goethita (10%).	Alteración pervasiva. biotita (máficos). cuarzo - sericita en plagioclasa y feldespatos k.	Numerosas vetillas gruesas de cuarzo secundario, que muestran en su interior vetillas de limonita-goethita y trazas de pirita. Otras vetillas que cortan las anteriores, muestran crisocola parda y zonas con material argílico.	crisocola (5%), goethita (2%), limonita (2%), rutilo (1%), calcopirita y pirita (trazas).	sericita (30%), biotita (20%), cuarzo (20%), minerales de arcilla (20%).
M2	goethita (15%), crisocola (4%), en vetillas.	Alteración pervasiva. cuarzo - sericita en plagioclasas, feldespatos k y masa fundamental, halos de cuarzo en torno a vetillas.	Frecuentes microfracturas y microvetillas paralelas entre sí, algunas con relleno de limonitas y material argílico pardo rojizo asociado con cuarzo secundario.	rutilo (2%), goethita (1%). Sin crisocola en el corte.	cuarzo (40%), sericita (25%), minerales de arcilla (10%), muscovita (10%), limonita (8%), clorita (4%).
M3	pirita (4%), covelina (3%), goethita (2-3%).	Alteración pervasiva. arcilla (máficos), arcilla; cuarzo - sericita en plagioclasas, feldespatos k y masa fundamental.	Numerosas venillas rellenas con pirita, minerales de arcilla y cuarzo sacariodal cortan la muestra en un sistema de orientación subparalelo. Un sistema más joven corta y desplaza al anterior, está relleno con minerales de arcilla, cuarzo y escasa pirita, parcialmente reemplazada en los bordes de los granos por calcosina-digenita. También se observan en este sistema granos pequeños de digenita.	pirita (6%), digenita (2%), rutilo y goethita (trazas).	sericita (40%), cuarzo (30%), muscovita (12%), minerales de arcilla (10%).
M4	goethita (5%), cu en minerales de arcilla (3%), cobres negros (2%) crisocola (1%).	Alteración pervasiva. cuarzo - sericita y feldespatos k en plagioclasas, cuarzo - sericita en feldespatos k, halos de cuarzo en torno a vetillas	Numerosas fracturas y vetillas cortan la muestra. Las vetillas (50-100 μm) están rellenas con biotita y cuarzo. Otras de mayor espesor (800 μm) están rellenas con cuarzo grueso, feldespato-k, gránulos de calcopirita, pirita y algo de goethita en los intersticios.	rutilo (3%), goethita (2%), calcopirita (1%), cobres negros (1%), crisocola (1%).	biotita (20%), cuarzo (20%), feldespato k (20%), sericita (20%), minerales de arcilla (12%).

5.1.2 ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis por difracción de rayos X de la roca total y de la fracción inferior a 2 micrones se realizó como una herramienta complementaria a los análisis ópticos y químicos. Estos análisis se realizaron tanto a la muestra de cabeza como de ripio, con el fin de detectar cambios mineralógicos no detectables microscópicamente. Los difractogramas de roca total y de la fracción inferior a 2 micrones de cada muestra se presentan en Anexo A.

El análisis por difracción de rayos X de la roca total reralizado en las muestras de cabeza y determinó que no se observan cambios sistemáticos en las intensidades de cabeza y ripio de las muestras y tampoco se detectaron fases neoformadas (ver Anexo A).

El análisis de la fracción inferior a 2 μ m mediante DRX permite clasificar las distintas gangas de las muestras estudiadas según una ponderación de las especies mayoritariamente presentes:

M1: Esmectita – Mica (Esmectita \approx Mica >>> Clorita)
M2: Mica – Caolin (Mica >>> Caolinita >>> Pirofilita)
M3: Caolinita (Caolinita >>>> Mica >>> Paragonita)
M4: Esmectita (Esmectita >>>> Mica >> Clorita)

5.1.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Cobre Total, Cobre Soluble y Hierro en mineral de cabeza

La tabla 5.2 presenta el análisis por Cu y Fe del mineral de cabeza.

Tabla 5.2: Análisis químico por Cu y Fe en la cabeza de las muestras.

Muestras	Fe (%)	Cu _T (%)	Cu _S (%)	Cu _T / Cu _S
M1	2,99	1,19	0,99	0,83
M2	1,59	0,77	0,75	0,97
M3	1,89	0,78	0,20	0,25
M4	2,31	0,53	0,49	0,92

Las muestras M1, M2 y M4 presentan alta solubilidad de Cu, representada por la razón Cu_T / Cu_S. Esto concuerda con la mineralización oxidada descrita por los análisis mineralógicos; así también la muestra M3, con una baja razón, se identifica perfectamente con una mena de carácter sulfurada.

La razón de solubilidad de las muestras, será de vital importancia para analizar las cinéticas de recuperación de estas.

Análisis químico del refino

El análisis de Cu, Fe y concentración de ácido del refino, tabla 5.3, se usó para realizar los balances de masa y determinar la recuperación de cada especie metálica y el consumo de ácido.

Tabla 5.3: Análisis químico de la solución de refino.

Fe (g/l)	Cu (g/l)	H ₂ SO ₄ (g/l)
3,99	0,36	8,8

5.1.4 PRUEBAS DE REACCIÓN Y TEST DE DUREZA

La prueba se efectúa inundando con solución de refino en una cápsula Petri, una muestra de clastos representativos de la mineralogía de 3/4" aproximadamente y otra de 4# Tyler. Los clastos de 3/4" se someten individualmente a una presión instantánea de 0,1 Kg/cm² a las 24 hrs de agregada la solución para observar su posible desintegración.



M1 sin inundar



M1 inundada (tiempo cero)



M1 inundada 24 horas y presión.

Figura 5.9: Muestra M1 de granulometría 3/4" inundada con refino.



M1 sin inundar.



M1 inundada (tiempo cero)



M1 inundada 24 horas y presión.

Figura 5.10: Muestra M1 de granulometría 4# inundada con refino.

Las imágenes de las pruebas muestran que no hay disgregación, aun cuando se aplique presión. La muestra M1 debió ser chancada para lograr su clasificación por tamaños debido a que presenta clastos de 4" aproximadamente de elevada dureza y cantos vivos.

El test de la raya en muestra macroscópica la describe como:

- Muestra difícil de rayar con punta de acero.
- Presenta zonas mineralizadas con crisocola de fácil rayado.



M2 sin inundar

M2 inundada (tiempo cero)

M2 inundada 24 horas y presión.

Figura 5.11: Muestra M2 de granulometría 3/4" inundada con refino.



M2 sin inundar

M2 inundada (tiempo cero)

M2 inundada 24 horas y presión.

Figura 5.12: Muestra M2 de granulometría 4# inundada con refino.

En las pruebas de reacción se observa una alta disgregación, claramente identificada en la fracción 3/4".

La muestra M2 no fue necesario chancarla por presentar una granulometría adecuada para su clasificación, como consecuencia de su baja dureza; los clastos son más bien redondeados.

El test de la raya en muestra macroscópica la describe como:

- Fácil rayado con punta de acero.



Figura 5.13: Muestra M3 de granulometría 3/4" inundada con refino.

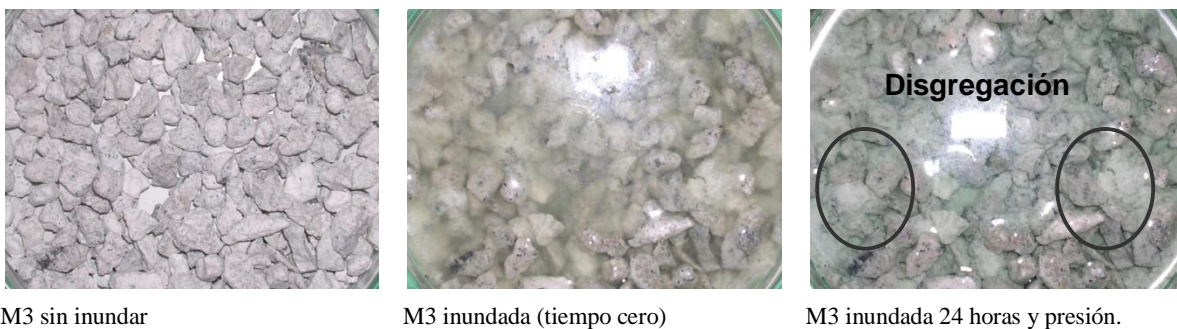


Figura 5.14: Muestra M3 de granulometría 4# inundada con refino.

Se observan clastos más redondeados, de baja dureza, lo cual contribuye a una alta disgregación, tal como se observa en las pruebas de reacción de las fracciones 3/4" y 4# Tyler. La muestra M3 presentaba una granulometría que permite su clasificación directa.

El test de la raya en muestra macroscópica la describe como:

- Se raya con relativa facilidad con punta de acero.



Figura 5.15: Muestra M4 de granulometría 3/4" inundada con refino.



Figura 5.16: Muestra M4 de granulometría 4# inundada con refino.

No se observa disgregación producto de su inundación, en ninguna de las fracciones. La muestra M4 debió ser reducida de tamaño en una chancadora para ajustar su granulometría; se presenta con una elevada dureza y clastos de cantos vivos.

El test de la raya en muestra macroscópica la describe como:

- Difícil de rayar con punta de acero.
- Muestra vetillas de fácil rayado.

Los resultados de esta prueba indican que las muestras M3 y M2 presentan los mayores porcentajes de disgregación en húmedo, si bien la muestra M2 presenta una mayor disgregación en la fracción 3/4". En la fracción 4# Tyler (mayor población) la muestra M3 resulta con un mayor grado de disgregación en relación a la M2. Por otro lado las muestras M1 y M4 no presentan disgregación alguna.

Las pruebas físicas tanto en seco (test de raya), como en húmedo (pruebas de reacción), permiten comparar la influencia de la mineralización de ganga (Figura 5.17).

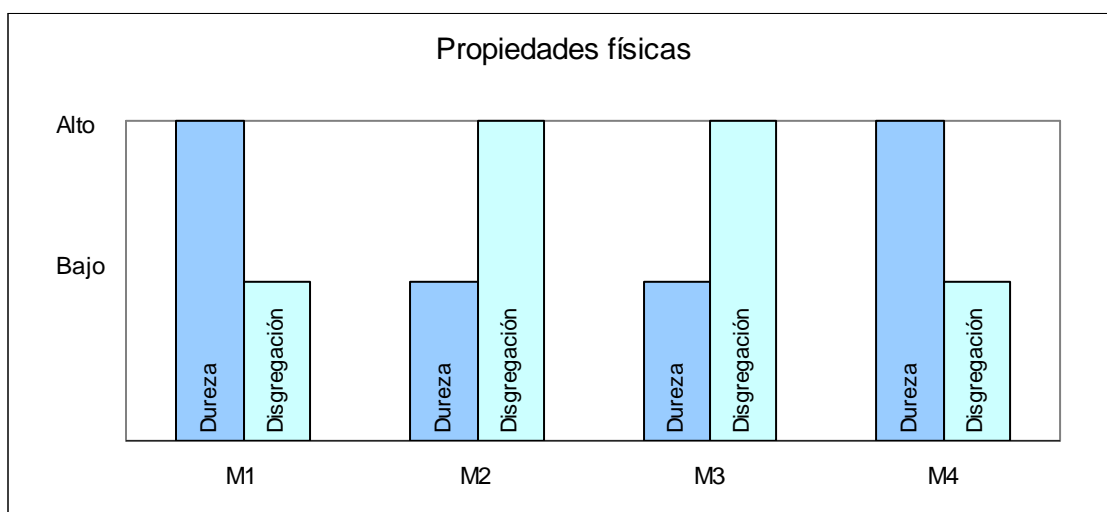


Figura 5.17: Propiedades físicas en las muestras.

Según el test de la raya, las pruebas de reacción y la relación textural (relleno de vetillas) se puede afirmar que las muestras M1 y M4 presentan buena calidad física (resistencia mecánica o dureza) a pesar de la mineralogía predominante de ganga, fuertemente esmectítica, en la fracción

< a 2 μ m. En tanto la presencia de caolín en las muestras M2 y M3 es indicadora de disgregación en húmedo; mientras más alto el nivel de caolín, mayor es la disgregación.

De acuerdo a lo observado en las pruebas de reacción con refinó y el test de la raya, las muestras se ordenan de mayor a menor disgregación como sigue:

$$M3 > M2 \gg M1 \approx M4$$

5.1.5 PRUEBAS DE CONSUMO DE ÁCIDO

Se realizó una prueba del consumo de ácido en las fracciones utilizadas en la clasificación por tamaños del mineral de cabeza. El consumo de las muestras se obtuvo de la ponderación (% en peso) de cada granulometría en la muestra y el consumo de ácido de ella.

Estimación del consumo de ácido por la ganga reactiva

Si consideramos el Cu lixiviado en cada muestra y lo asociamos a la especie mineral predominante en ella, se puede ponderar el consumo teórico de ácido por el mineral de mena; restando al consumo de ácido real, el ácido retenido y el consumo teórico, se puede estimar el consumo de ácido de la ganga reactiva (ver Anexo G). La tabla 5.4 y figura 5.18 muestran los resultados de este cálculo.

Tabla 5.4: Consumo de ácido de la ganga reactiva.

Muestra	Mineralización principal de Cu	Consumo de ácido (Kg /Ton)			
		total	retenido	teórico	ganga reactiva
M1	Crisocola	27,2	1,0	12,8	13,4
M2	Crisocola	19,8	1,5	8,6	9,7
M3	Covelina	14,8	1,5	5,9	7,4
M4	Crisocola	23,9	0,9	6,8	16,2

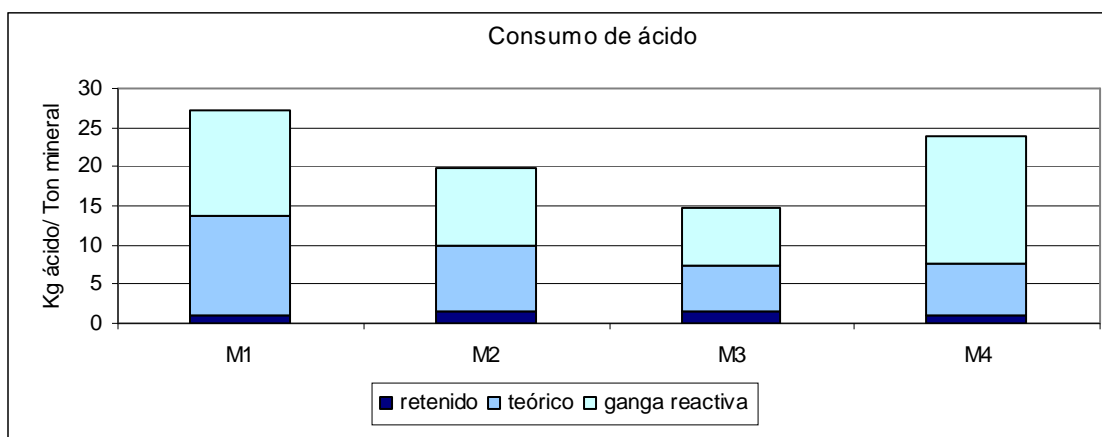


Figura 5.18: Distribución del consumo de ácido.

En la figura 5.19 se puede observar que las muestras M1 y M4 con alto contenido de esmectita, presencia de mica (biotita) y menor contenido de clorita, presentan mayor consumo de ácido por la ganga reactiva que las muestras M2 y M3. Para el caso de la muestra M4 el alto consumo de ácido por la ganga se explica por la ocurrencia de marcadas vetillas con biotita que facilitan el acceso del ácido a esta fase consumidora.

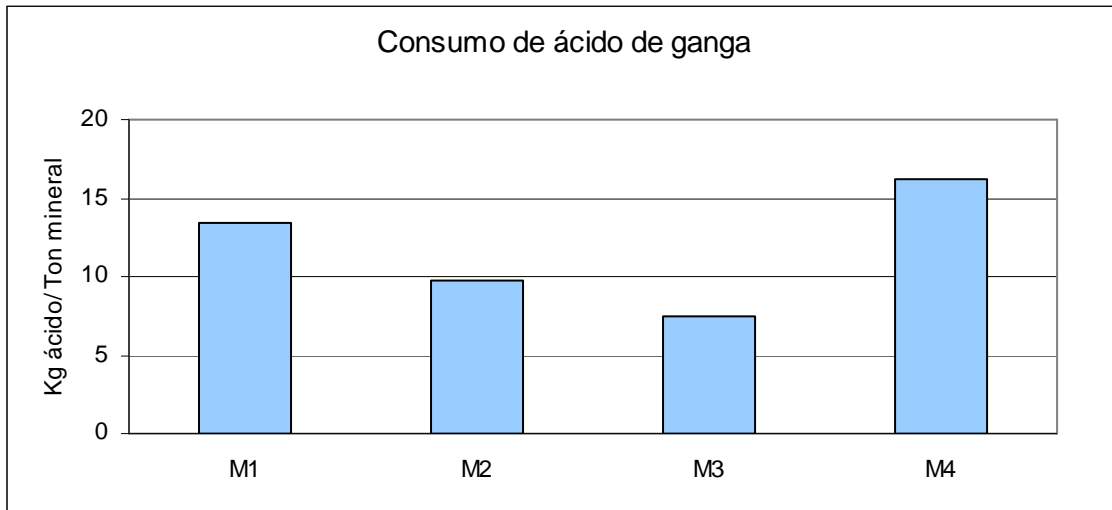


Figura 5.19: Consumo de ácido de la ganga reactiva.

5.1.6 PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Se realizaron pruebas de conductividad hidráulica en cada muestra, con el objetivo de contrastar su comportamiento.

Para las experiencias se usó la fracción - 4# Tyler, de la granulometría de Cerro Colorado, por presentar una mejor relación tamaño de partícula vs radio de las columnas de laboratorio.

En la figura 5.20 se pueden observar los resultados de las constantes de conductividad hidráulica, K (cm/seg), de cada muestra y su variación en 24 hrs, correlacionada con una ecuación logarítmica.

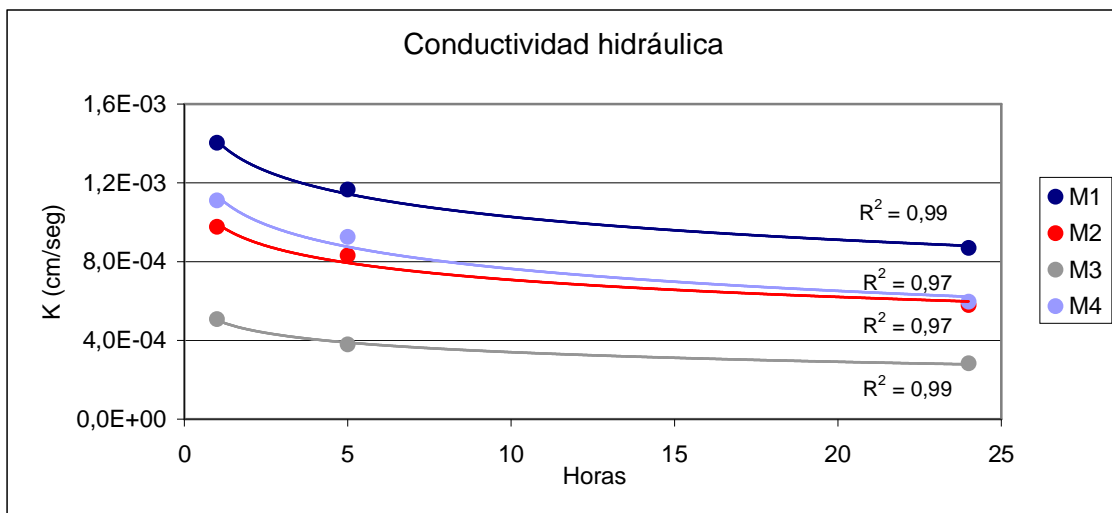


Figura 5.20: Conductividad hidráulica de las muestras en estudio.

Los valores de las constantes de conductividad hidráulica, indican que las muestras M3 y M2 son las que presentan menor permeabilidad.

Si se relacionan los resultados de conductividad hidráulica (realizados en la fracción - 4# Tyler a 24 hrs. de iniciada su saturación en columna) con la mineralización de ganga, la muestra M3 (fuertemente caolinítica) presenta la menor conductividad, en contraste con la muestra M1 de mayor conductividad.

De lo anterior se concluye que a mayor contenido de caolin existe mayor probabilidad de tener una baja conductividad hidráulica.

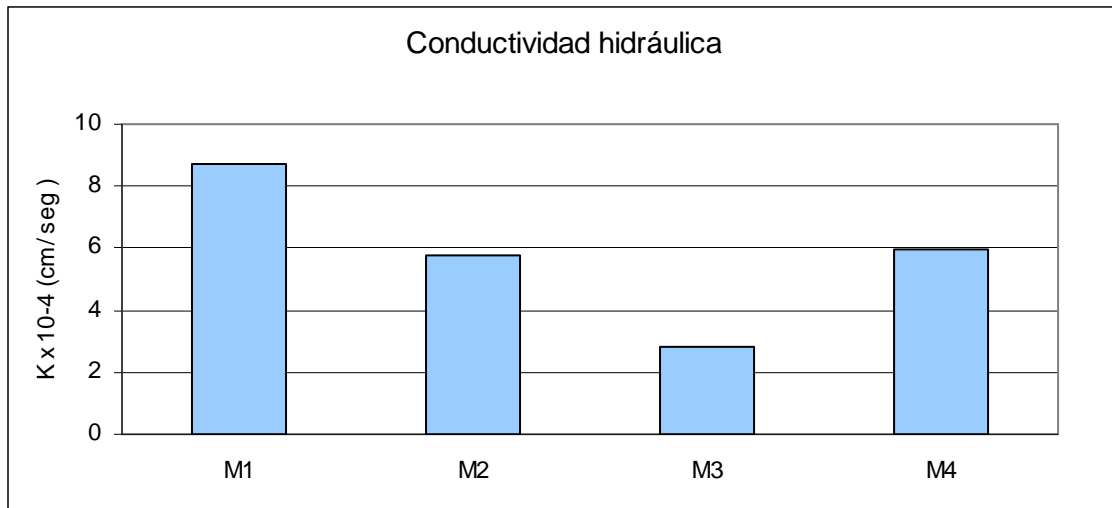


Figura 5.21: Mineralización de ganga su efecto en la conductividad hidráulica.

El análisis de esta prueba desde el punto de vista mineralógico indica que M3 y M2 (ambos portadores de caolín en mayor y menor concentración) tienen una baja conductividad hidráulica debido a la fácil delaminación de este filosilicato. Las muestras M1 y M4 no contienen caolín, lo cual mejora su conductividad hidráulica. Aunque M4 contiene más esmectita en la fracción inferior a 2 μm que M1, la presencia de un vetillo de cuarzo grueso imparte a esta roca una resistencia mecánica superior a M1 que así mitiga el potencial efecto de sello de la esmectita.

5.1.7 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN

El detalle de las pruebas de lixiviación en columnas se presenta en el Anexo B.

El estudio determinó la cinética de recuperación de Cu y Fe, así como el consumo de ácido (ver anexo), para verificar la eficiencia del proceso en un plazo de siete días.

Cinética de lixiviación de Cu

La figura 5.22 presenta las curvas de la cinética de lixiviación de cobre de las 4 muestras estudiadas. Se observan las recuperaciones alcanzadas y la reproducibilidad de las pruebas representada por sus datos en triplicado.

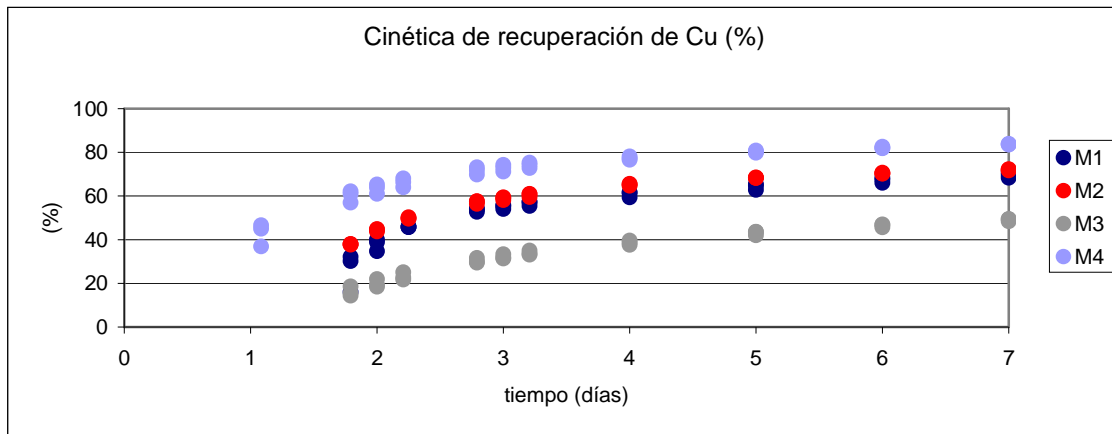


Figura 5.22: Cinética de recuperación de Cu de las 3 experiencias realizadas para cada una de las 4 muestras estudiadas.

La tabla 5.5 presenta las recuperaciones promedio (triplicados) por lixiviación. Se puede observar la mayor recuperación de las muestras con importantes contenidos de mineralización oxidada, M1-M2-M4, en comparación con la muestra M3 que representa una cinética más lenta por su mineralización sulfurada. La recuperación por lavado es más importante en M3, en relación a M1, M2 y M4. La muestra M4 representa la mejor cinética de lixiviación; tiene una calidad física buena, tiende a repeler el agua y mantener la altura de la columna.

Tabla 5.5: Recuperaciones promedio en porcentaje.

Muestra	Lixiviación (%)	Lavado (%)	Total (%)
M1	69,80	6,38	76,17
M2	72,10	4,42	76,52
M3	49,20	10,16	59,36
M4	83,71	5,17	88,88

A modo de comparar el comportamiento de las distintas muestras, la figura 5.23 muestra la masa de Cu recuperada por tonelada de mineral lixiviado en los siete días que duró la prueba.

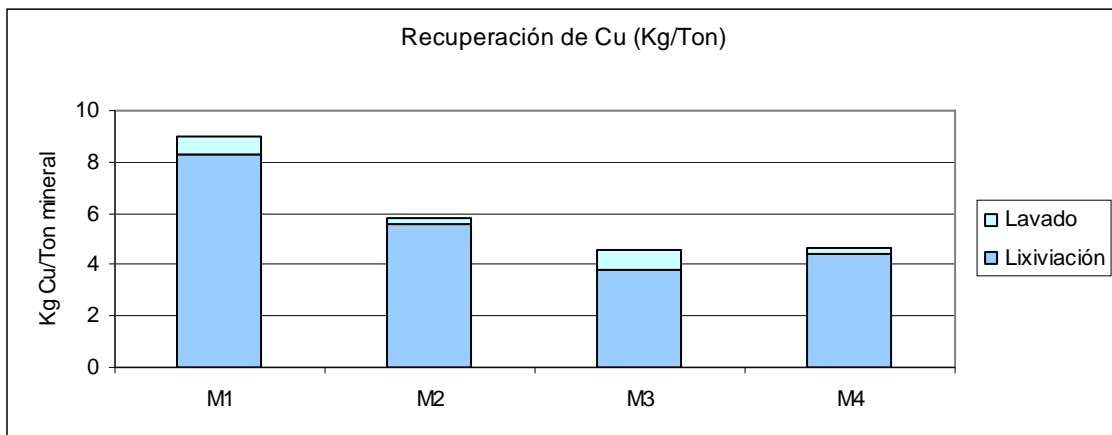


Figura 5.23: Recuperación de Cu en Kg/Ton.

La mayor recuperación, por masa, la presenta la muestra M1, básicamente debido a su alto contenido de Cu soluble (0,99%) y la menor, la muestra sulfurada M3, la cual no alcanza a llegar a los 4 Kg/Ton, por lixiviación.

En la tabla 5.6 se muestran las recuperaciones promedio en Kg/Ton para las etapas de lixiviación y lavado.

Tabla 5.6: Recuperaciones promedio en Kg/Ton.

Muestra	Lixiviación (Kg/Ton)	Lavado (Kg/Ton)	Total (Kg/Ton)
M1	8,31	0,65	8,96
M2	5,55	0,27	5,82
M3	3,81	0,74	4,55
M4	4,44	0,20	4,64

La tabla 5.7 presenta una comparación de las recuperaciones en función del cobre total y del cobre soluble, la cual permitió observar la disolución (en 7 días) de una fracción del cobre insoluble en la muestra M3.

Tabla 5.7: Porcentaje de recuperación mediante Cu total y Cu soluble.

Muestra	% Recuperación	
	Cu _T	Cu _S
M1	69,80	83,90
M2	72,10	74,52
M3	49,20	195,55
M4	83,71	90,55

La figura 5.24 muestra la lixiviación del Cu de solubilidad menor (“insoluble”) de la muestra M3.

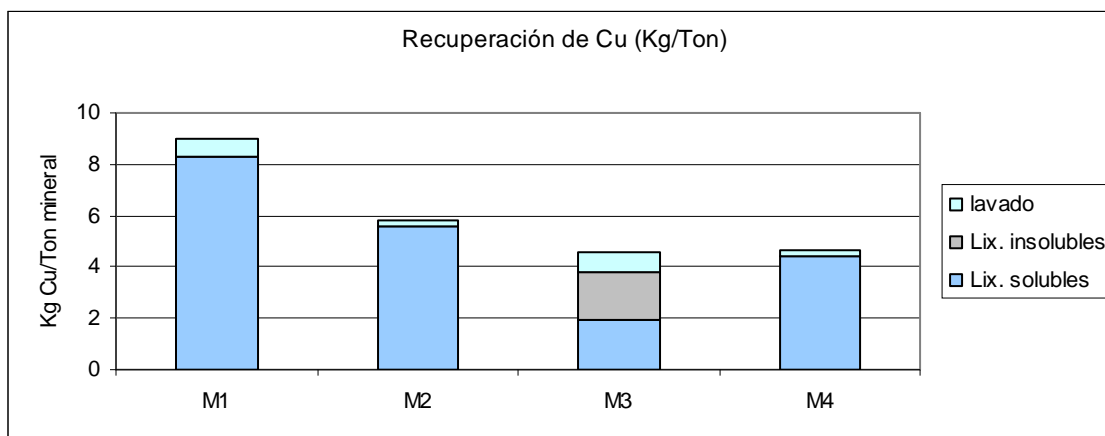


Figura 5.24: Lixiviación de Cu soluble e “insoluble”

Cinética de lixiviación de Fe

En la figura 5.25 se muestra la baja recuperación de Fe durante los siete días de lixiviación. La muestra M4 alcanza un 6% aproximadamente.

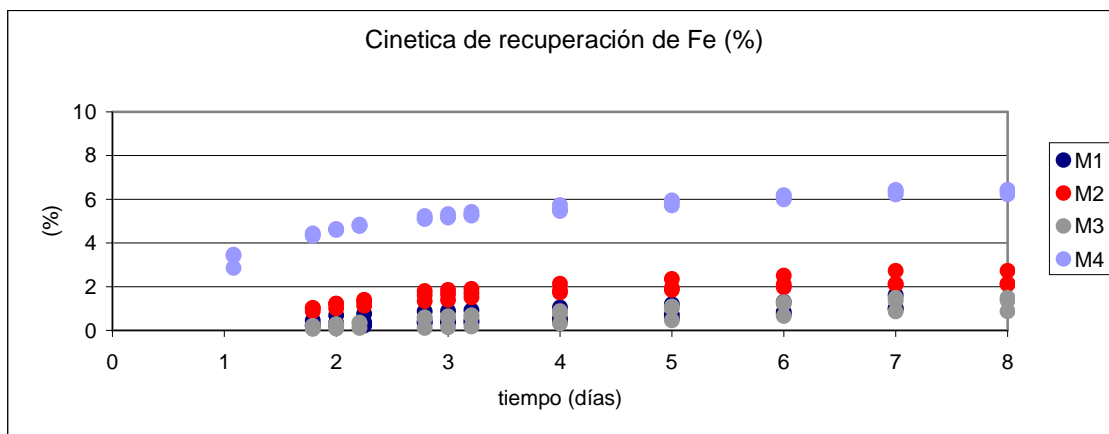


Figura 5.25: Cinética de recuperación de Fe.

La tabla 5.8 muestra las recuperaciones promedio (%) de las etapas de lixiviación y lavado, donde un importante aporte del lavado se debe al Fe remanente aportado por el refino. La muestra M4 presenta un aporte mayor que estaría justificado por la presencia de vetillas ricas en biotita muy fina. Se deb tomar en cuenta que en la etapa de lavado (solo agua) no se descuenta el Fe como ocurre en la lixiviación (aporte del refino).

Tabla 5.8: Recuperaciones de Fe promedio en porcentaje.

Muestra	Lixiviación (%)	Lavado (%)	Total (%)
M1	1,21	1,36	2,57
M2	2,32	3,81	6,14
M3	1,25	3,56	4,81
M4	6,35	1,79	8,13

Para comparar las masas de Fe recuperadas se presenta la tabla 5.9 y figura 5.26 (en Kg/Ton) donde se observa los bajos niveles de recuperación por lixiviación en comparación al lavado, debido fundamentalmente al refino atrapado en la columna una vez terminada la lixiviación.

Tabla 5.9: Recuperaciones promedio en Kg/Ton.

Muestra	Lixiviación (Kg/Ton)	Lavado (Kg/Ton)	Total (Kg/Ton)
M1	0,36	0,40	0,76
M2	0,37	0,60	0,97
M3	0,24	0,67	0,90
M4	1,47	0,39	1,86

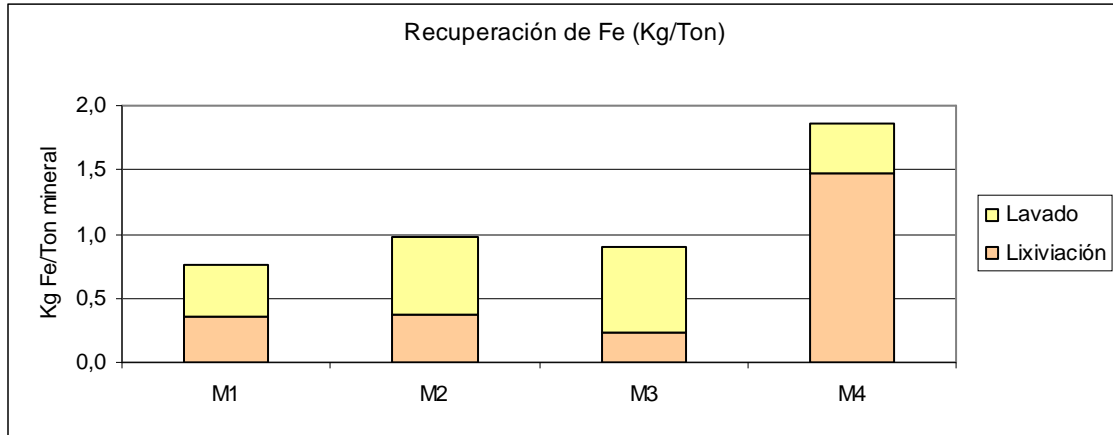


Figura 5.26: Recuperación de Fe en Kg/Ton.

5.1.8 ESTUDIO DE RIPIOS

Fración inferior a 2 μm

En la figura 5.27 se observa la relación entre la mineralogía de ganga presente en cada muestra y el porcentaje en peso de la fracción inferior a 2 μm de cabeza y rípios. Resalta el aumento de los rípios en las muestras M2 y M3, estas evidencian fuerte presencia de caolín, mineral de fácil disgregación lo que favorecería esta generación de finos.

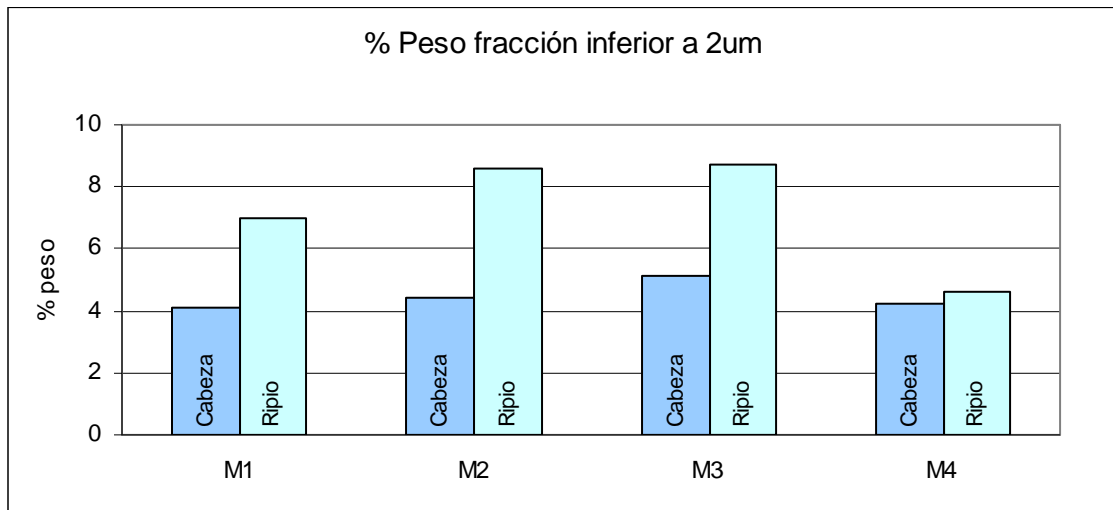


Figura 5.27: Influencia de la ganga en el % peso de la fracción inferior a 2 μm .

La muestra M3, preferentemente caolinítica presenta el peor comportamiento físico y la muestra M4 a pesar de ser una muestra con alto contenido de esmectita presenta un buen comportamiento físico, justificado por la fuerte presencia de vetillas de cuarzo y gran dureza.

Humedad en rípios

La retención de humedad de cada muestra, figura 5.28, se presenta como el principal responsable de la alta recuperación de Fe por lavado en M2 y M3.

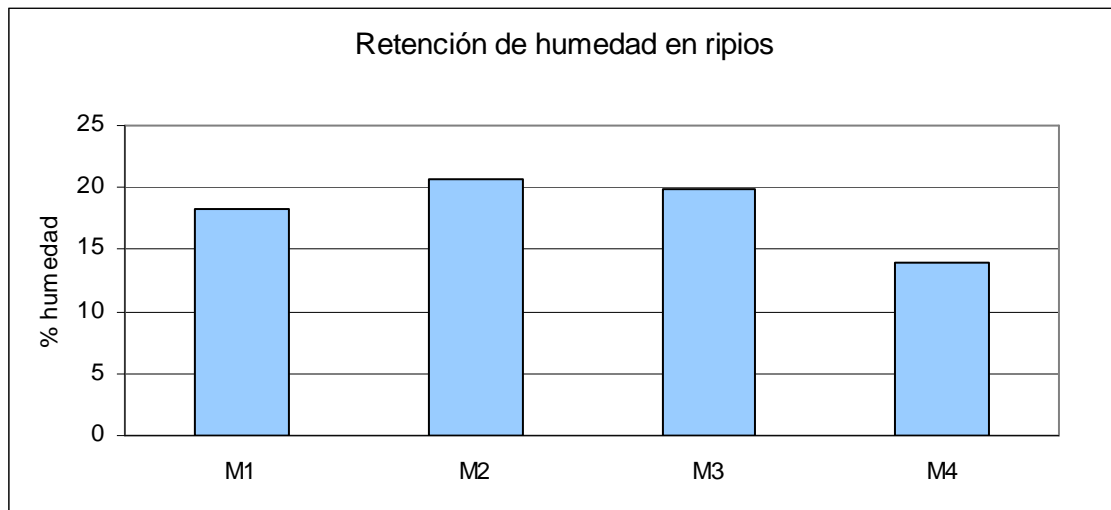


Figura 5.28: Humedad retenida en rípios.

La mayor retención de humedad de las muestras M2 y M3 se relaciona con su mayor disgregación en húmedo.

La muestra M4 se presenta como la de menor retención, observada desde el curado, ya que el mineral no se aglomera, sino solo se moja en la superficie, mostrando un cierto grado de hidrofobicidad, responsable de su baja retención de humedad y escasa a nula aglomeración.

Además, la alta recuperación de Fe en el lavado de los rípios, como se pudo observar en la figura 5.26, en las muestras M2 y M3, acusa la presencia de caolín y la gran generación de finos, lo cual aumenta el atrapamiento de soluciones una vez terminado el riego.

5.2 DETERMINACIÓN DE LA GANGA REACTIVA RELEVANTE

El estudio de la lixiviación de las 4 muestras de mineral de cabeza permitió relacionar la composición mineralógica de cada una de ellas con un comportamiento metalúrgico a escala de laboratorio. En este sentido, la caracterización física, química y mineralógica realizada, así como los ensayos metalúrgicos fueron adecuados y permiten determinar las mineralogías de gangas reactivas que son relevantes en el proceso hidrometalúrgico.

Los siguientes análisis permiten determinar las mineralogías de ganga reactiva relevantes:

- 1) Los resultados de las pruebas de reacción y dureza indican que esta condición física de una muestra está directamente relacionada con la mineralogía de la ganga. Las muestras que tienen una ganga caolinítica (M2 y M3) tienen baja dureza y se disgregan fácilmente

en contacto con refino; por el contrario, las muestras sin el carácter caolinítico de la ganga (M1 y M4) tienen alta dureza y no presentan disgregación en húmedo.

- 2) Las muestras que tienen ganga caolinítica presentan menor permeabilidad que las muestras sin este carácter de su ganga, esto se evidencia por los valores de las constantes de conductividad hidráulica y de la retención de humedad en el ripio, en cada caso. Esto se debe a la ocurrencia de un fenómeno llamado “delaminación” del caolín originado por el rompimiento de los enlaces débiles entre las capas de este filosilicato, en ambientes acuosos. La menor permeabilidad de la muestra M2 respecto a M3, ambas con gangas caoliníticas, indica que la cantidad de esta especie es clave para este fenómeno.
- 3) Las muestras que no presentan caolín (M1 y M4) tienen mejor conductividad hidráulica y a pesar del carácter esmectítico de la fracción inferior a 2 μm la presencia de vetillas de cuarzo les confiere buena resistencia mecánica. Esto significa que el carácter expansivo de las esmectitas se ve fuertemente inhibido debido a que éstas se encuentran ocluidas en la sílice, evitando la entrada de agua entre las láminas de su estructura y permitiendo mantener una conductividad hidráulica favorable.
- 4) La biotita finamente diseminada es la principal responsable del alto consumo de ácido en las muestras donde fue detectada (M1 y M4), esto es evidenciado por la mayor liberación de Fe en esta muestra durante la lixiviación. Por el contrario, en las muestras donde no hay ocurrencia de biotita (M2 y M3) no se ve un consumo de ácido de la ganga importante.

El análisis anterior permite determinar tres tipos de ganga reactiva consideradas relevantes para la planificación minero-metalúrgica:

- ✓ **Ganga caolinítica:** Su ocurrencia afecta negativamente la conductividad hidráulica y este efecto es directamente proporcional a la cantidad de caolinita presente.
- ✓ **Ganga esmectítica:** Si bien su ocurrencia no afecta negativamente la conductividad hidráulica, debido a que su carácter expansivo se ve inhibido por su encapsulamiento en la sílice, se recomienda definirlo como un dominio para mantener mediciones permanentes de su carácter de arcilla expandible.
- ✓ **Ganga biotítica:** Su ocurrencia aumenta el consumo de ácido, lo que la convierte en una variable crítica para los modelos de costos.

Lo anterior permite realizar una primera definición de dominios de ganga reactiva que deberán seguir caracterizándose con futuras pruebas de laboratorio, pero que requieren inevitablemente un escalamiento a nivel industrial para poder mejorar el carácter predictivo de su definición.

5.3 MODELAMIENTO DE LA MINERALOGÍA DE GANGA REACTIVA

La construcción del modelo temático descriptivo de la mineralogía de ganga reactiva se realizó utilizando el software Vulcan como herramienta de modelamiento.

5.3.1 DEFINICIÓN DE DOMINIOS DE GANGA REACTIVA RELEVANTE

La extrapolación de las gangas reactivas consideradas relevantes, según el comportamiento metalúrgico determinado, junto con la información de la base de datos de sondajes, y con el estudio de 350 muestras con DRX, permitieron la siguiente definición de dominios (Tabla 5.10).

Tabla 5.10: Dominios de ganga reactiva relevante.

NUMERO	UNIDAD GEOLOGICA DE ARCILLA	Condición	id
1	CAOLÍN FUERTE	kao=1	
2	CAOLÍN MODERADO	kao=2	
3	ESMECTITA FUERTE-MODERADO	sm=1 o sm=2	
4	EMECTITA DEBIL	kao=0 y sm=3	
5	BIOTITA FUERTE	bio=1	
6	BIOTITA MODERADO	bio=2	

5.3.2 MODELAMIENTO DE LOS DOMINIOS

Se definió un cubo modelable que fue dividido en 12 plantas, con un espaciamiento de 20 metros entre ellas y con una influencia de 10 metros cada una. En cada una de estas plantas se realizó la interpretación en *layers* de los distintos dominios definidos, a través de la construcción de polígonos que representaban cada uno de estos dominios (figura 5.29).

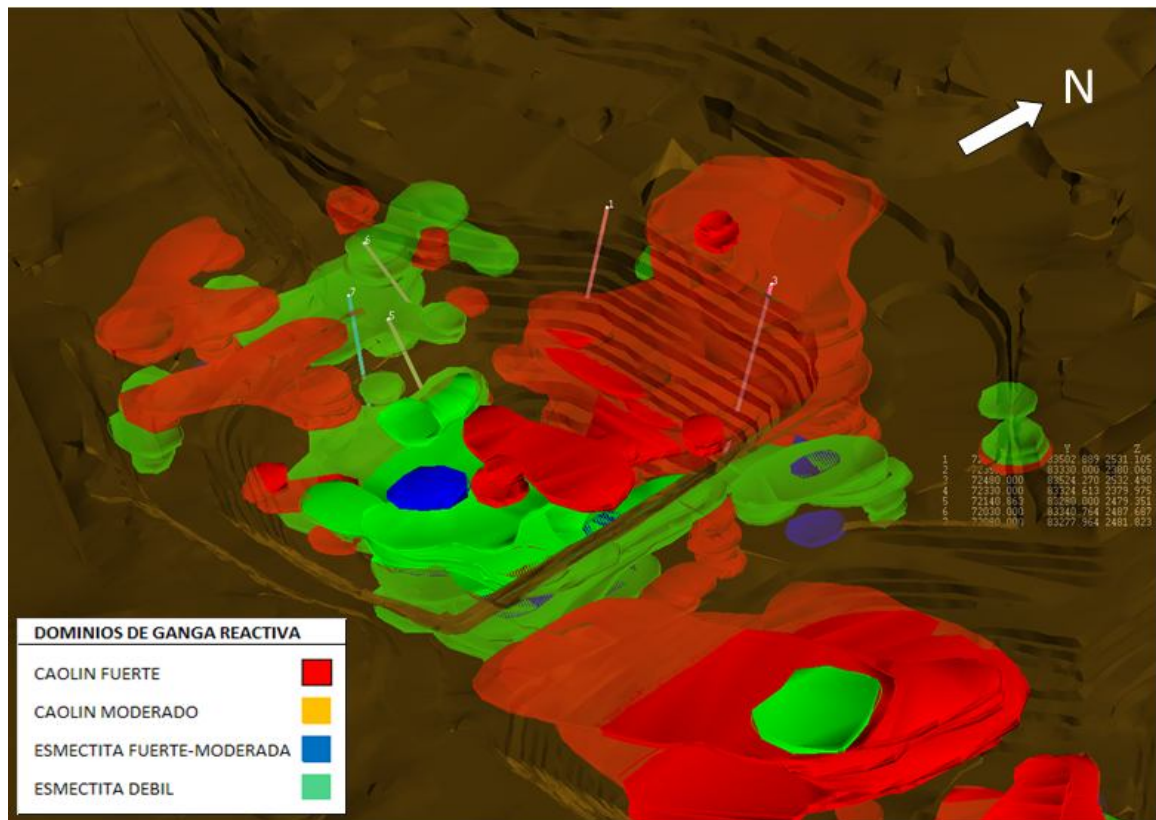


Figura 5.29: Interpretación con polígonos de dominios mineralógicos en diferentes plantas.

Posteriormente, con los juegos de plantas se construyeron los sólidos 3D por *wireframe* de cada uno de los dominios de ganga reactiva interpretados, convirtiendo de esta forma a cada dominio mineralógico en un volumen (figura 5.30).

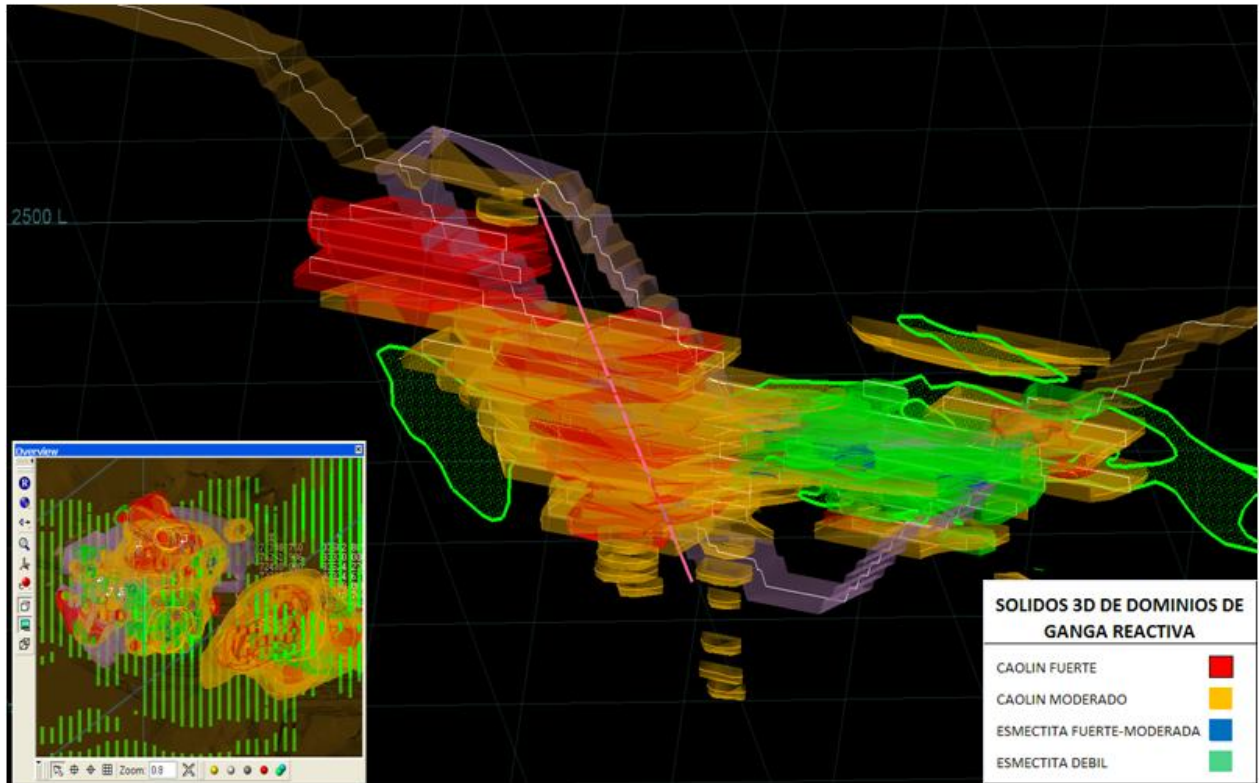


Figura 5.30: Sólidos 3D de dominios de ganga reactiva.

5.3.3 MODELO DE BLOQUES

Se realizó la asignación al modelo de bloques del dominio de ganga reactiva correspondiente, haciendo el *flageo* o “pintado” del bloque con la variable del volumen de cada dominio mineralógico que coincide espacialmente.

Con esto, el modelo de bloques tiene incorporado una variable que representa cada dominio de ganga reactiva, osea, una variable que refleja un comportamiento metalúrgico asociado a esta ganga.

Las siguientes figuras 5.31 y 5.32 muestran ejemplos de estos bloques del modelo, asociados a distintos dominios de ganga reactiva.

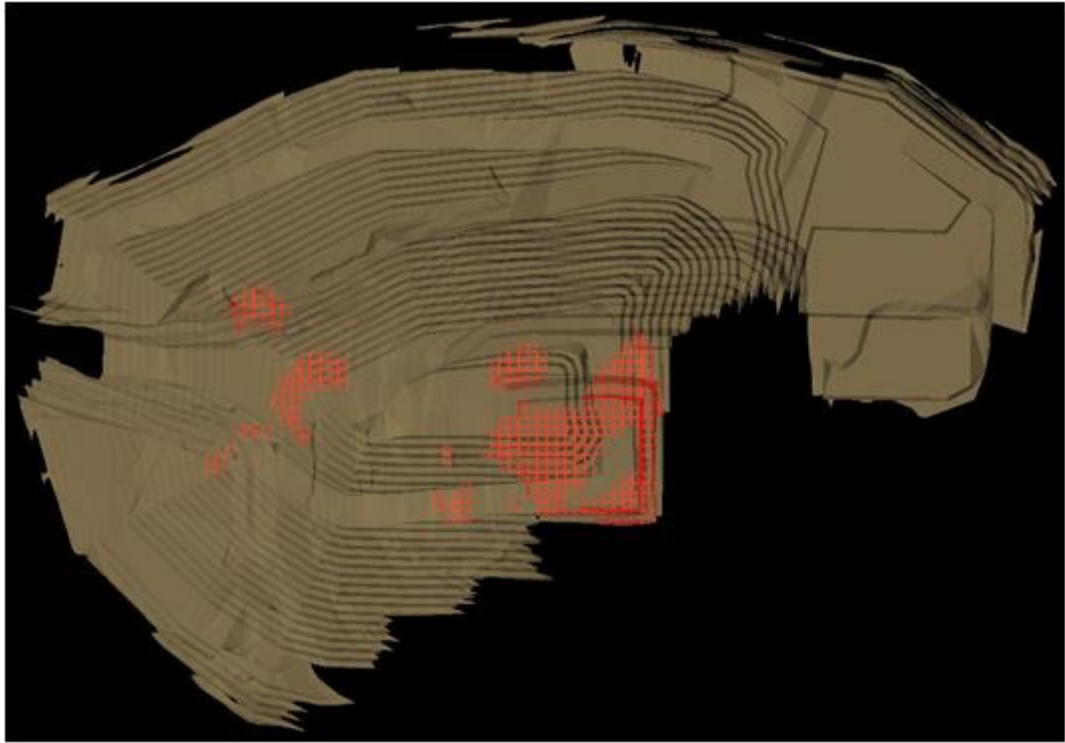


Figura 5.31: Modelo De Bloques levantado por la variable Caolín Fuerte.

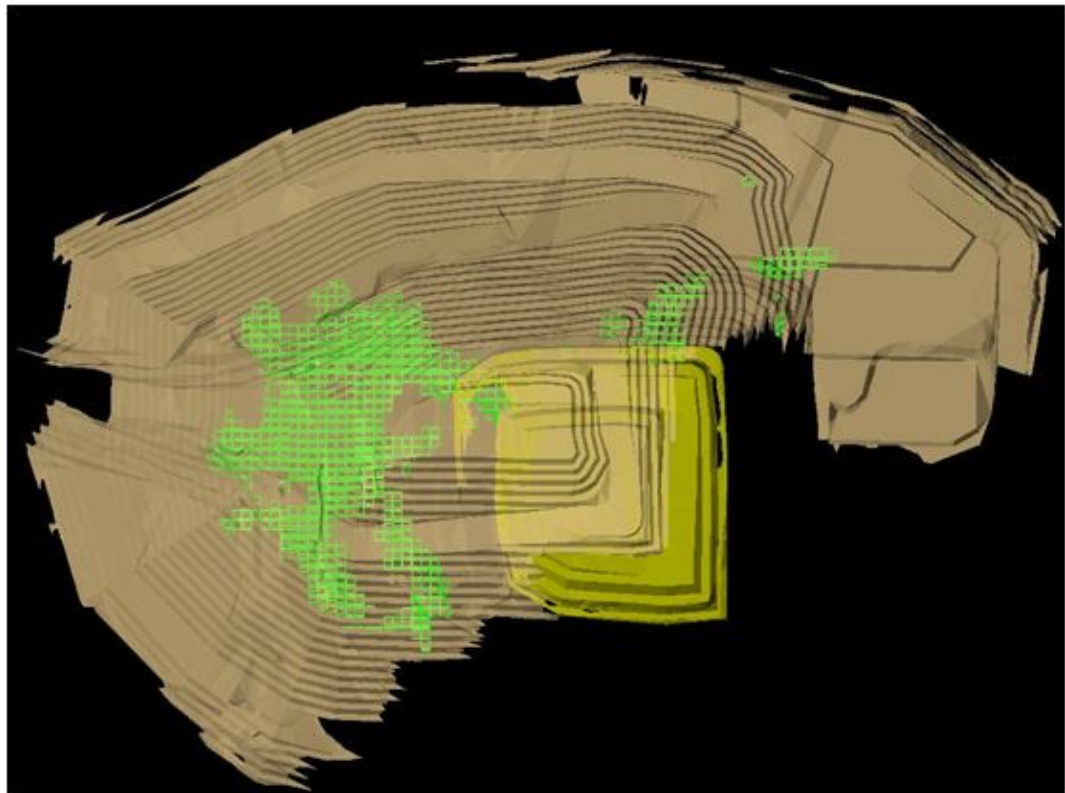


Figura 5.32: Modelo de Bloques levantado por la variable Esmectita Fuerte-Moderada.

6 CONCLUSIONES

- La correlación entre la composición mineralógica de la mena y el comportamiento en el proceso metalúrgico es posible porque las muestras seleccionadas representan fuertes cambios mineralógicos en cuanto a ganga reactiva se refiere, lo que permite enfocar y asociar los fenómenos en forma directa a las especies minerales predominantes.
- Las muestras que tienen una ganga caolinítica presentan menor permeabilidad. Esto se debe a la ocurrencia de un fenómeno llamado “delaminación” del caolín originado por el rompimiento de enlaces débiles entre las capas de este filosilicato en ambientes acuosos.
- Las muestras con ganga de carácter esmectítico están asociadas a la ocurrencia de vetillas de cuarzo que inhibe el carácter expansivo de ellas, debido a que estas esmectitas se encuentran ocluidas dentro de la sílice, evitando que ingresen moléculas de agua entre las láminas de su estructura y permitiendo, con esto, una conductividad hidráulica favorable.
- Las muestras con ocurrencia de biotita tienen un mayor consumo de ácido debido a la alta reactividad de esta mica. Esto queda evidenciado por la mayor liberación de fierro en estas muestras durante la lixiviación.
- Estos análisis de correlación permiten definir especies de ganga reactiva consideradas relevantes para el proceso; esto hace posible construir dominios de cada una de ellas con la información de la base de datos de sondajes y estudios mineralógicos previamente realizados. Estos dominios son incorporados en el modelo de bloques.
- Esta caracterización geo-metalúrgica del material, es decir, relacionar variables geológicas y resultados de ensayos metalúrgicos, son de carácter preliminar, debido a que es necesario el escalamiento al proceso, que permita estimar respuestas industriales de variables metalúrgicas y construir modelos predictivos para optimizar la planificación.
- El escalamiento al proceso a escala industrial debe hacerse realizando pruebas de escalas intermedias y reiterativas, para poder determinar factores que puedan ser incorporados en los futuros modelos predictivos.
- Los resultados de este trabajo no son extrapolables a otros depósitos o a futuras fases de producción en Cerro Colorado, debido a que la caracterización determinada puede variar. No se puede asegurar, por ejemplo, que el encapsulamiento de las esmectitas se mantenga y no genere problemas de conductividad hidráulica. Por lo tanto es altamente recomendable realizar futuras caracterizaciones a lo largo de la operación de Cerro Colorado y medir la variabilidad del comportamiento metalúrgico determinado con este trabajo.
- Una práctica que deberá implementarse para mejorar los futuros modelos predictivos es medir la cantidad de caolín presente en las muestras de sondajes y pozos de tronadura, e incorporar este dato en los modelos de bloques. Se deberá medir la cantidad crítica de caolín a partir de la cual genera problemas de percolabilidad de las soluciones, o la cantidad crítica de biotita sobre la cual el alto consumo de ácido afecta el modelo de costos.

7 REFERENCIAS

- Acuña, E. (2005). Geostatística aplicada al yacimiento Cerro Colorado, Provincia de Iquique. Región de Tarapacá. Chile. Memoria de Título Geólogo (inédito). Universidad de Concepción, 143p.
- Aedo, L. (2007). Predicción de resistencia a la carga puntual y RQD mediante kriging ordinario en la mina Cerro Colorado.
- Avendaño, J. (2006). Difracción de rayos-X cuantitativa (método de Rietveld) en la caracterización de alteración argílica en el yacimiento de Cu Cerro Colorado I Región, Chile.
- Bartlett, R. (1992). Solution mining, leaching and fluid recovery of materials. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Börgel, R. (1982). Geomorfología. In Geografía de Chile. Tomo II. Instituto Geográfico Militar: 182p. Santiago.
- Brook, (1985). International journal of rock mechanics and mining sciences, vol. 22, n°2, 61-70.p
- Bouzari, F.; Clark, A. (2002). Anatomy, evolution, and metallogenic significance of the supergene orebody of the Cerro Colorado porphyry copper deposit. I region, northern Chile. Economic Geology. 97(8):1701-1740.
- Brügger, J (1918). Informe sobre el agua subterránea de la Región de Pica. Boletín de la Sociedad Nacional de Minería. 3. 70 p. Santiago.
- Brügger, J (1950). Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar. 370p.
- Cepeda, A. *et al.* (1982). Geological Assessment of the Cerro Colorado, Chile.
- Camus, F. (2001). A Special Issue Devoted to Porphyry Copper Deposits of Northern Chile. Economic Geology; v. 96; no. 2; p. 233-237.
- Díaz *et al* (2006). Modelo Geotécnico de Mina Cerro Colorado, Informe inédito.
- Galli, C. (1957). Las Formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. Revista Minerale. 12(56): 14-26. Santiago.
- Galli, C. (1968). Carta Geológica de Chile 18: Cuadrángulo Juan de Morales. Provincia de Tarapacá. Escala 1:50.000. Instituto de investigaciones Geológicas de Chile. 53 p. Santiago.

- Galli y Dingman, R. (1962). Cuadrángulos Pica, ALCA, Matilla, y Chacarilla, con un estudio sobre recursos de agua subterránea, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, N°7-10, 125 p.
- Helle, S.; Kelm, U. (2005). Experimental leaching of atacamite, chrysocolla and malachite: Relationship between copper retention and cation exchange capacity, Hydrometallurgy 78, 180-186.
- Helle, S.; Kelm, U.; Pincheira, M. y Jerez, O. (2006). Informe del estudio de lixiviación de 4 muestras de mineral de Cerro Colorado con diferente tipo de ganga. Instituto GEA, Universidad de Concepción.
- Jerez, O. (2006). Efecto de la ganga reactiva en la lixiviación de mezclas de minerales sulfurados y oxidados de cobre. Compañía Minera Cerro Colorado. Memoria de título Ingeniero Metalúrgico (Inédito). Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica, Universidad de Concepción. 133p.
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate In Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C; Berlín, Alemania. 44p.
- Moreno (2005). Modelo Estructural Mina Cerro Colorado, Informe inédito.
- Meruane, G. (1999). Criterios de diseño del circuito de soluciones en la lixiviación bacteriana de sulfuros de cobre en pilas, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil Química, Universidad de Chile.
- Reghezza, A.; Osses, M.; Villagrán, S.; Barrientos, A.; González, M. (2004). Avances en la recuperación de cobre desde minerales oxidados con altos contenidos de arcillas. Seminario de Mineralogía Aplicada y Geometalurgia, Expomin 2004, Santiago.
- Ruiz, M.C. (2000). Hidrometalurgia, Apuntes, Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- Thomas, A. (1967). Carta Geológica de Chile 17: Cuadrángulo Mamiña. Provincia de Tarapacá: Escala 1:50.000 Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile. 49p. Santiago.

8 ANEXOS

ANEXO A: DIFRACTOGRAMAS

Difractogramas de roca total

Las siguientes figuras muestran los difractogramas de roca total de las 4 muestras de cabeza y ripio estudiadas.

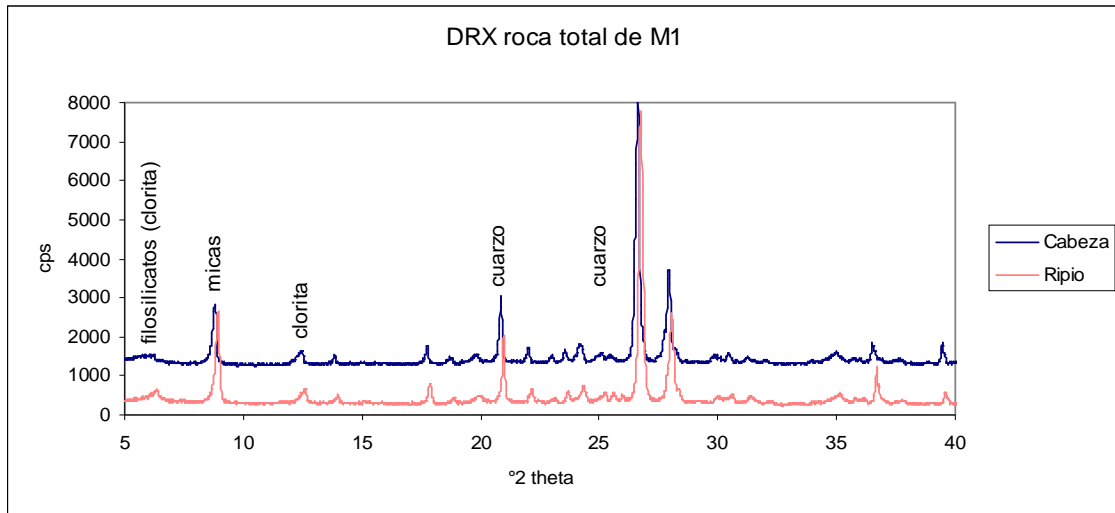


Figura 8.1: Difractogramas de roca total M1.

El estudio determinó que no se observan cambios sistemáticos entre las intensidades de cabeza y rípios de M1 y tampoco se detectan fases neoformadas.

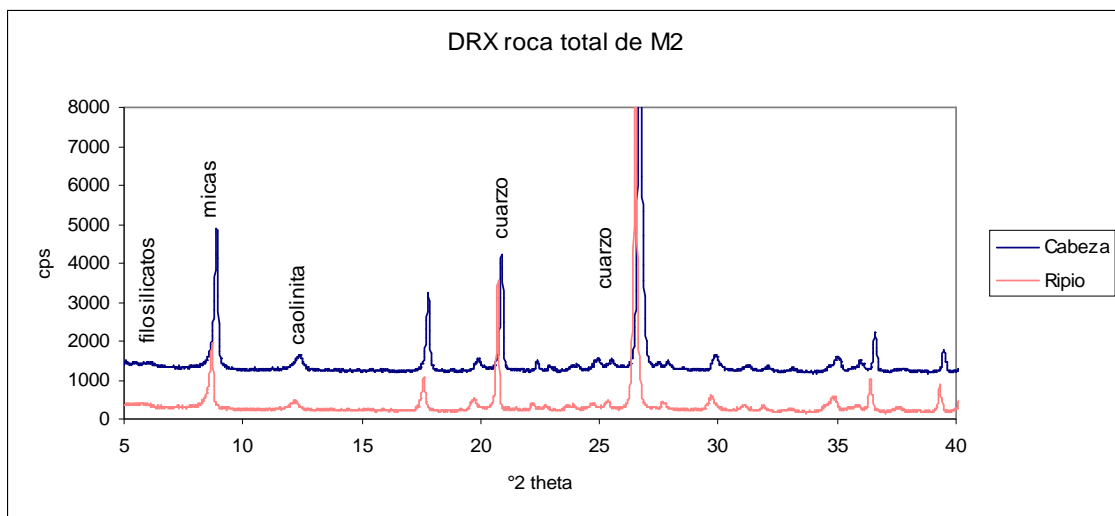


Figura 8.2: Difractogramas de roca total M2.

Según el estudio, en la muestra M2 se observa una reducción de las intensidades difractométricas tanto de mica como de cuarzo en el ripio en relación a la cabeza.

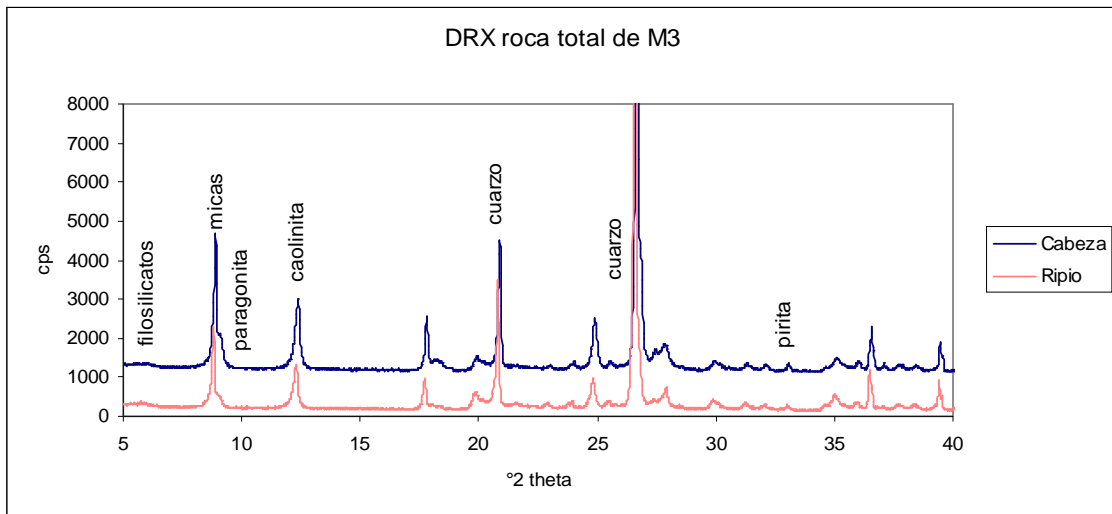


Figura 8.3: Difractogramas de roca total M3.

El estudio indica que en M3 no se observan cambios notables de intensidades entre cabeza y ripio.

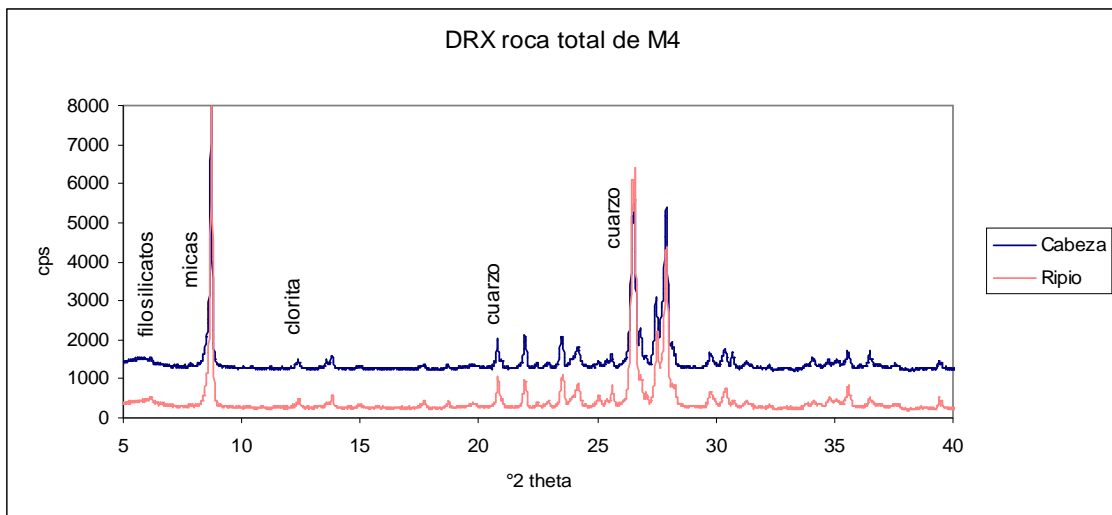


Figura 8.4: Difractogramas de roca total M4.

Difractogramas de la fracción inferior a 2µm

Las figuras 8.5 a 8.8 presentan los difractogramas de la fracción inferior a 2µm sometidos a los procedimientos (OR - EG - 375°C - 550°C) que permiten identificar y ponderar los filosilicatos presentes en cabezas y ripios de cada muestra.

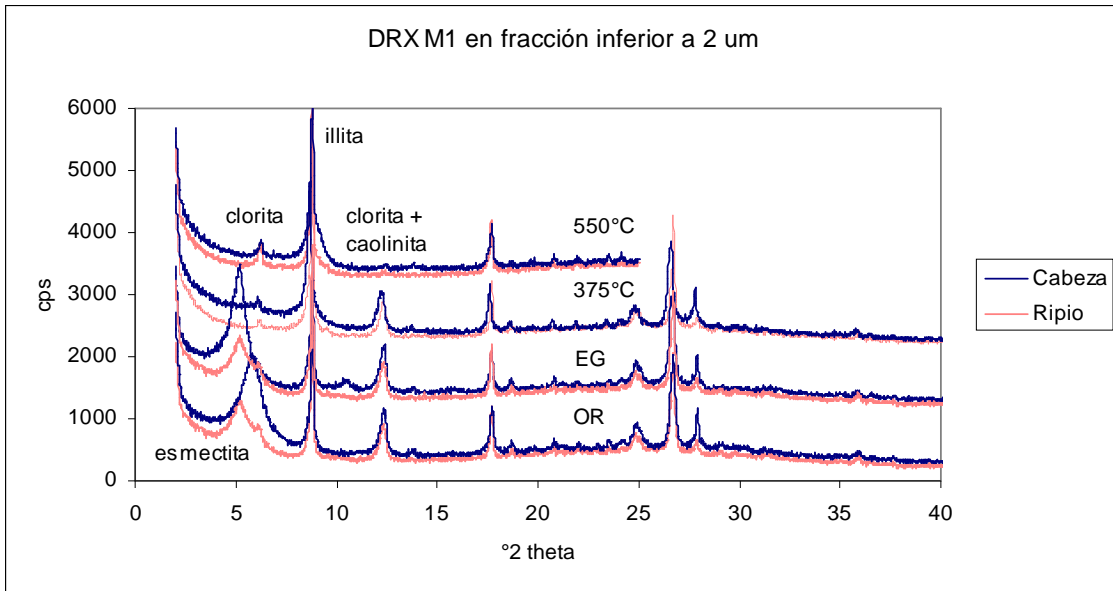


Figura 8.5: Difractogramas de fracción inferior a 2µm M1.

La comparación de los registros difractométricos de cabeza y ripio de la muestra M1, orientados y saturados con etilenglicol (EG) de las fracciones <2µm muestran una clara reducción de las intensidades basales de la esmectita; lo inverso ocurre para las intensidades basales de mica.

El estudio concluye que esto puede deberse (1) a la mayor liberación de la fracción <2µm en el ripio (4,1% Cabeza → 7,0% Ripio) y (2) a un ataque ácido diferencial de los distintos filosilicatos según ubicación textural. Por ej. fases intersticiales o ubicadas en fracturas tienen una mayor probabilidad de sufrir una destrucción ácida de su red cristalina comparado con fases al interior de un feldespato o clasto de poca permeabilidad donde el proceso de lixiviación puede liberar la fase pero no necesariamente la destruye.

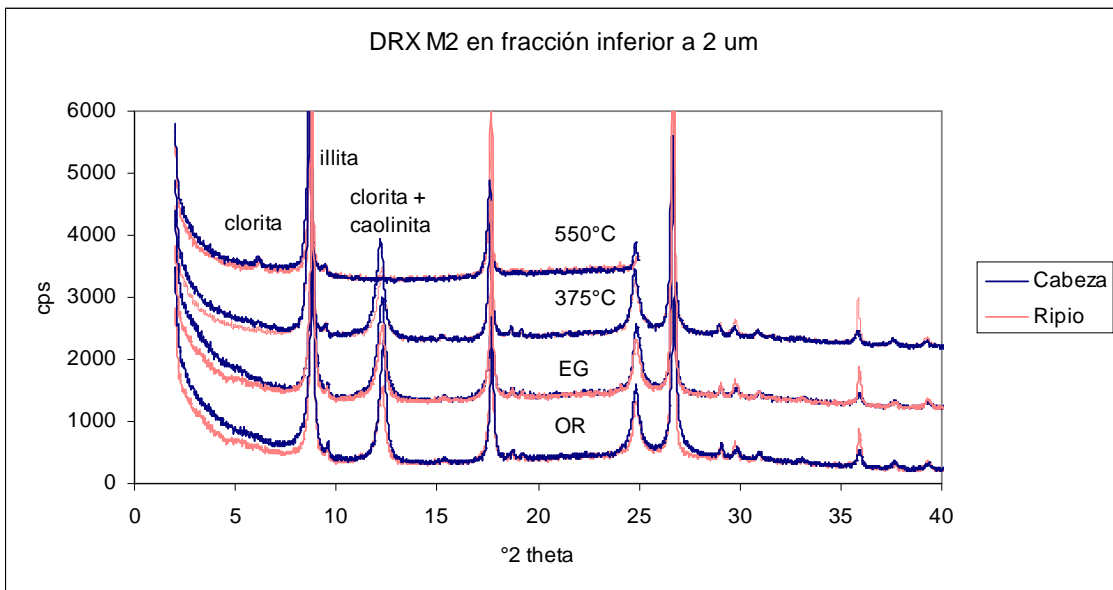


Figura 8.6: Difractogramas de fracción inferior a 2µm M2.

En la fracción inferior a 2 μm de M2 se invierte la tendencia observada en la roca total para la mica y la caolinita muestra una leve reducción de su intensidad basal en el ripio.

Según el estudio, este fenómeno puede deberse (1) a la mayor liberación de la fracción inferior a 2 μm en el ripio (4,4 % cabeza \rightarrow 8,6 % ripio) y (2) la destrucción selectiva del ácido según la textura de la roca (ataque más intenso al caolín de fácil delaminación y mayor liberación de mica sin destrucción de su red cristalina).

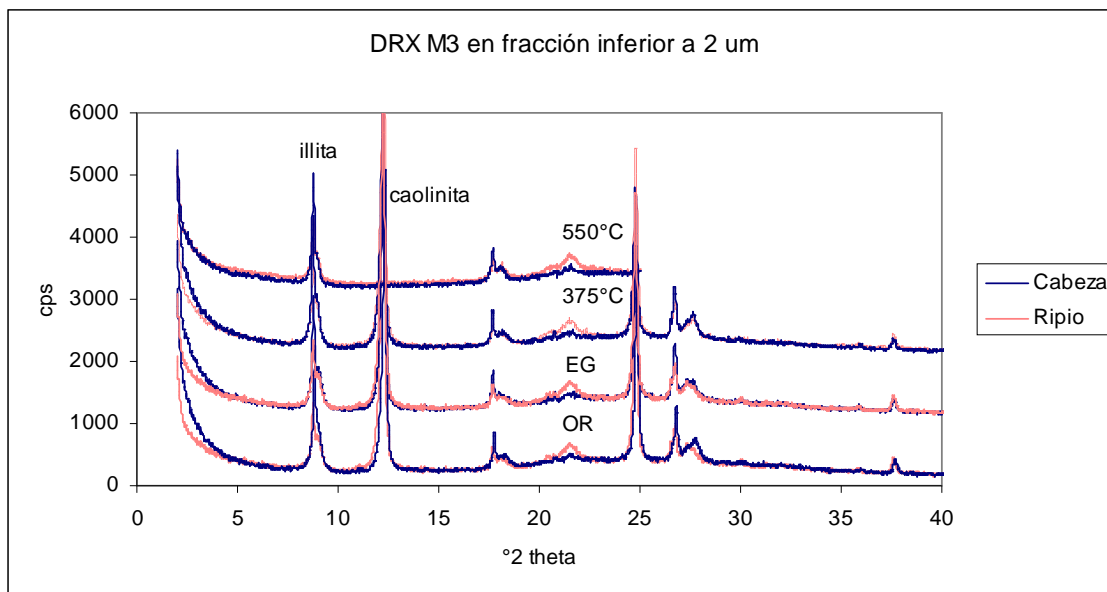


Figura 8.7: Difractogramas de fracción inferior a 2 μm M3.

En la fracción inferior a 2 μm de M3 queda de manifiesto un leve aumento en las intensidades basales de caolinita y una leve reducción en el caso de la mica. La paragonita no sufre cambios. El peso de la fracción inferior a 2 μm aumenta de un 5,1% en la cabeza a un 8,7% en el ripio.

Según el estudio, es posible que en esta muestra exista una compensación entre destrucción de filosilicatos y suministro de los mismos a través de una desintegración paulatina de la roca y liberación de finos inferior a 2 μm .

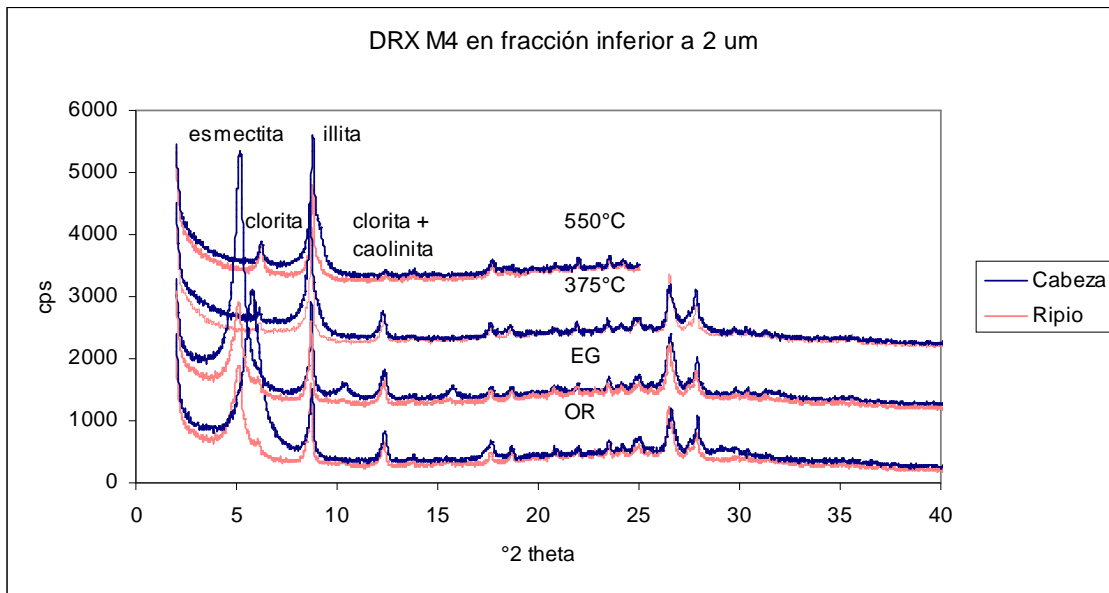


Figura 8.8: Difractogramas de fracción inferior a $2\mu\text{m}$ M4.

La comparación de los registros difractométricos orientados (OR) y saturados con etilenglicol (EG) de las fracción inferior a $2\mu\text{m}$ de M4 muestra una clara reducción de las intensidades basales de la esmeclita; clorita y mica no presentan cambios. El peso de la fracción inferior a $2\mu\text{m}$ no registra un cambio significativo (4,2% Cabeza \rightarrow 4,9% Ripio).

Tabla 8.1: Resumen de identificación y ponderación* de la fracción inferior a $2\mu\text{m}$ (cabezas).

Muestra	Esmectita	Clorita	Mica	Paragonita	Pirofilita	Caolinita	Otros (traza)
M1	2474	977	2212	---	---	Minoritario	Qz y Feld.
M2	---	Minoritario	3791	---	590	1972	Qz.
M3	---	---	1337	749	---	6150	Qz.
M4	4336	829	1916	---	---	Minoritario	Qz y Feld.

(*). Se registran las cps (cuentas por segundo) de los registros difractométricos de las intensidades basales (EG) de los filosilicatos.

ANEXO B: PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN

Tabla 8.2: Protocolo de lixiviación.

Ítem	Detalle	Unidad
Mineral por columna	5	Kg
Diámetro columna	20	cm
Granulometría	85% -1/2" y 14% - 100#	-
Acido en curado	20	Kg H ⁺ /Ton
Refino en curado	60	Kg H ⁺ /Ton
Reposo del mineral	5	días
Tiempo de lixiviación	7	días
Tasa de riego	1	l/hr*m ²
Acido en refino	8,8	g/l
Volumen agua de lavado	1	lt
N° de lavados	3	-
Triplicados columnas M1	M1A - M1B - M1C	-
Triplicados columnas M2	M2A - M2B - M2C	-
Triplicados columnas M3	M3A - M3B - M3C	-
Triplicados columnas M4	M4A - M4B - M4C	-

1) CURADO ÁCIDO Y AGLOMERADO

El curado se realizó mediante la adición de ácido sulfúrico y refino, aplicados como aerosol. La tabla 8.3 resume la dosis de ácido y refino agregados, la temperatura a la cual llega el mineral producto de la reacción exotérmica al aplicar la solución y la calidad visual del aglomerado (registrada en imágenes).

Tabla 8.3: Dosis, temperatura y calidad del aglomerado producto del curado.

Ítem	Unidad	Muestras			
		M1	M2	M3	M4
Dosis de ácido	(Kg/Ton)	20	20	20	20
Dosis de refinó	(Kg/Ton)	60	60	60	60
Temperatura de la muestra	(°C)	29 – 30	25 – 26	24 – 25	27 – 28
Calidad del aglomerado	-	Media	Buena	Buena	Mala

La figura 8.9 presenta la solubilización de Cu en el curado de 5 días y su aporte en relación al cobre soluble. Destaca la muestra M3, con solubilización de una fracción del cobre determinado como insoluble. El tipo de alteración de esta muestra no genera minerales con tendencia a disolverse, por lo tanto habrá más ácido disponible para atacar a los sulfuros.

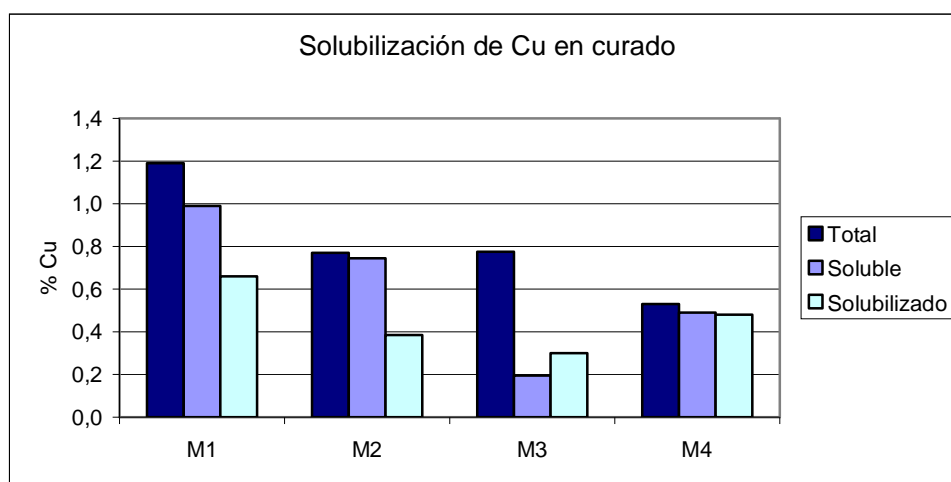


Figura 8.9: Solubilización de Cu en curado.

Registro de imágenes de las muestras curadas y ripios

Las figuras 8.10 a 8.17 presentan un registro de imágenes de las muestras curadas y ripios, tomadas en la superficie de las columnas, de modo de observar la calidad del aglomerado y la superficie final lixiviada. Se puede observar que el goteo de solución no produce zonas de mayor lavado superficial de mineral y la mayoría de los glómeros permanecen intactos hasta el término del proceso (7 días).



Figura 8.10: Curado muestra M1.



Figura 8.11: Ripios muestra M1.

En la muestra M1 se observa un aglomerado de mediana calidad y clastos más bien poligonales.



Figura 8.12: Curado muestra M2.



Figura 8.13: Ripios muestra M2.

La muestra M2 presenta clastos más redondeados y un aglomerado de buena calidad. Se puede observar la humedad retenida en la superficie transcurridas 24 hrs del término del riego.



Figura 8.14: Curado muestra M3.



Figura 8.15: Ripios muestra M3.

La muestra M3 presenta un buen aglomerado, el cual permanece hasta el final de la lixiviación (en superficie). En este caso también es posible apreciar la retención de humedad de la muestra.



Figura 8.16: Curado muestra M4.



Figura 8.17: Ripios muestra M4.

La muestra M4 presenta baja aglomeración. Un cierto grado de hidrofobicidad impide la humectación de la muestra y por ende la retención de humedad es baja, tal como se muestra más adelante.

2) LIXIVIACIÓN

El proceso de lixiviación se inicia al quinto día del curado ácido, utilizando un riego de $1 \text{ l/hr} \cdot \text{m}^2$ en forma continua y sin recirculación.

La percolación de las soluciones comienza cerca de las 40 hrs para el caso de las muestras M1, M2 y M3; la muestra M4 percola toda la columna aproximadamente a las 20 hrs, confirmando su baja retención de humedad lo que permite alcanzar una humedad dinámica en menor tiempo.

Iniciado el riego de las muestras comienza la disminución de la altura de la columna de mineral. El caso más notable es el de muestra M3, donde es posible registrar en imágenes, desde las primeras horas la disminución de altura; lógico por la presencia de caolín, figuras 8.18 a 8.21.

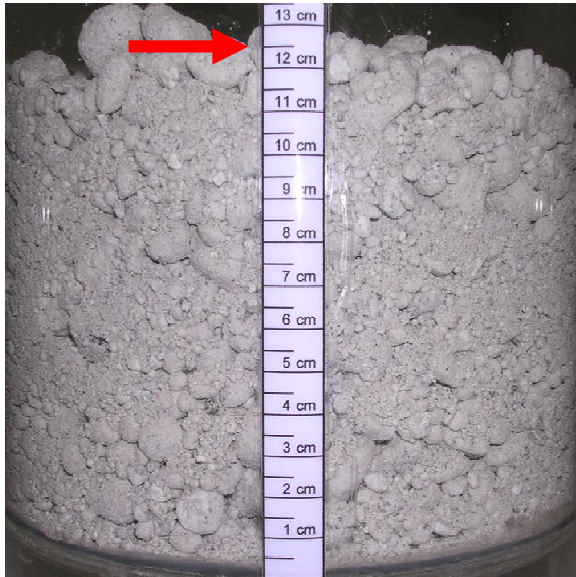


Figura 8.18: M3, inicio de lixiviación.



Figura 8.19: M3, 1 día de lixiviación.

En la figura 8.18 se observa al aglomerado inicial, antes de comenzar la lixiviación, luego en la figura 8.19, ya se observa la acumulación de PLS en la zona inferior de la columna, junto a la acumulación de finos, producto de la desagregación de los glómeros, además de la disgregación como se vio anteriormente con las pruebas de reacción, en donde la muestra M3 fue clasificada como la más disgregable.

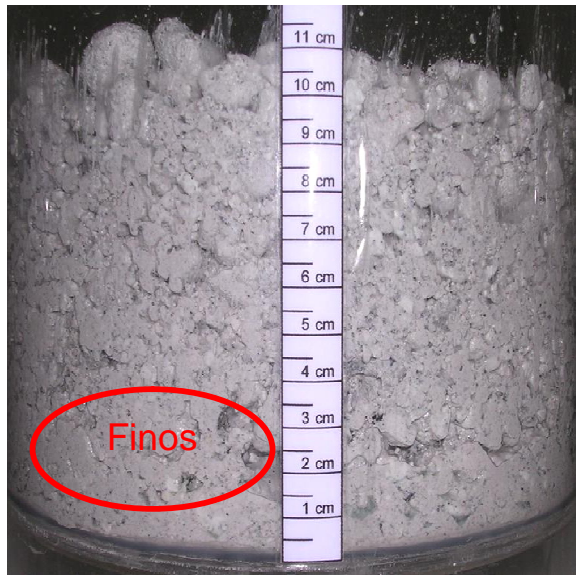


Figura 8.20: M3, 7 día de lixiviación.



Figura 8.21: M3, 7 día de lixiviación (imagen posterior de la columna).

En el otro extremo se presenta la muestra M4, esta mantiene el nivel de mineral casi sin variación hasta el final del proceso, justificada por la presencia de vetillas rellenas de cuarzo, biotita y feldespato K entre otros.



Figura 8.22: M4, inicio de la lixiviación.



Figura 8.23: M3, 7 día de lixiviación.

En las figuras 8.22 y 8.23 se observa el comportamiento de la muestra M4, en ella no se produce disgregación y los niveles freáticos en las pruebas de esta muestra se mantienen en cero durante todo el proceso.

Cinética de consumo de ácido

Se monitoreó el contenido de ácido de las soluciones de entrada y salida de cada columna. En la figura 8.24 se observa que en las muestras M2 y M3 el ácido agregado en el curado no es consumido totalmente y es aportado al PLS; lo contrario ocurre con las muestras M1 y M4, las cuales comienzan a consumir al ácido del refinado desde que comienzan a percolar, lo cual tiene relación con el tipo de alteración observada en M2 y M3 vs M1 y M4.

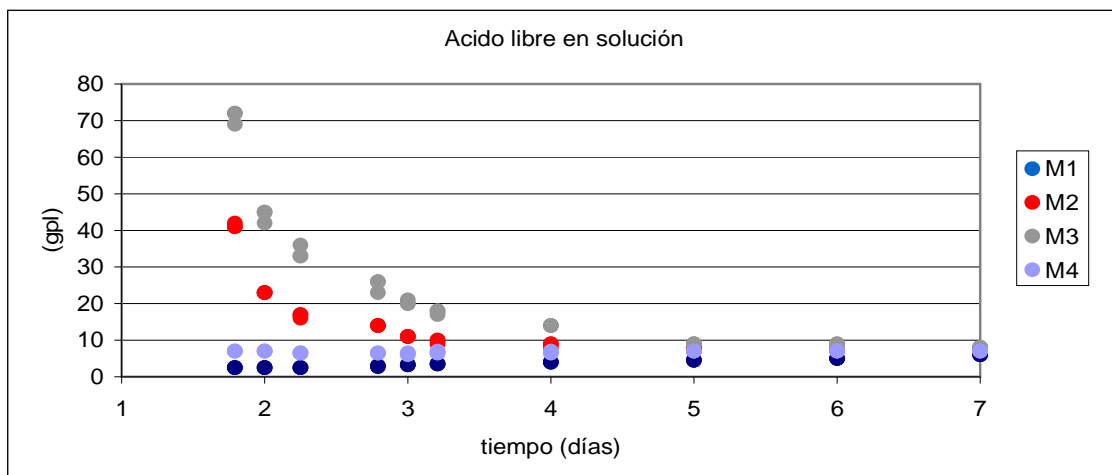


Figura 8.24: Concentración de ácido en el PLS.

Las figuras 8.25 y 8.26 muestran proyecciones del consumo de ácido (28 días y un año respectivamente) generadas a través de ecuaciones logarítmicas.

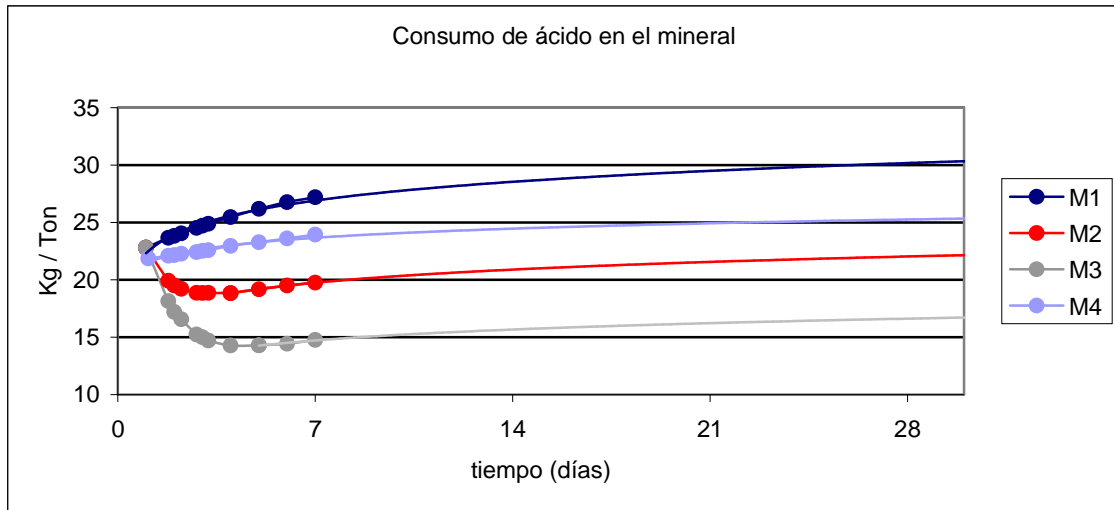


Figura 8.25: Consumo de ácido en las muestras.

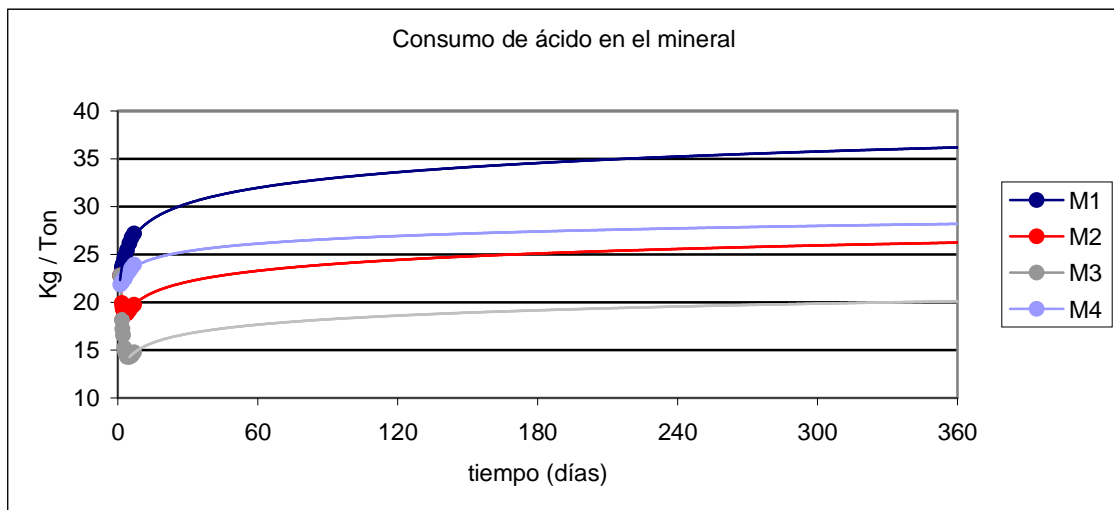


Figura 8.26: Proyección del consumo de ácido en las muestras.

La tabla 8.4 resume el consumo de ácido (Kg/Ton) de acuerdo a resultados obtenidos a través del consumo real por lixiviación y el consumo proyectado mediante el ajuste de ecuaciones logarítmicas. Se observa como la eficiencia del consumo de ácido disminuye producto del agotamiento de la mena; la dosis de ácido agregada es siempre la misma (refino).

Tabla 8.4: Tabla resumen consumo de ácido (Kg/Ton) por muestra.

Muestra	7 días (real)		30 días (proyección)		360 días (proyección)	
	Consumo (Kg H ⁺ /Ton)	Eficiencia (%)	Consumo (Kg H ⁺ /Ton)	Eficiencia (%)	Consumo (Kg H ⁺ /Ton)	Eficiencia (%)
M1	27,2	88,5%	30,3	50,9%	36,2	7,6%
M2	19,8	64,9%	22,1	37,2%	26,2	5,5%
M3	14,8	48,4%	16,7	28,1%	20,1	4,2%
M4	23,9	77,8%	25,3	42,5%	28,2	5,9%

3) CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

Los historiales de cada una de las columnas: inundaciones, niveles de mineral y flujos se presentan en este anexo.

Caracterización hidrodinámica de la muestra M1.

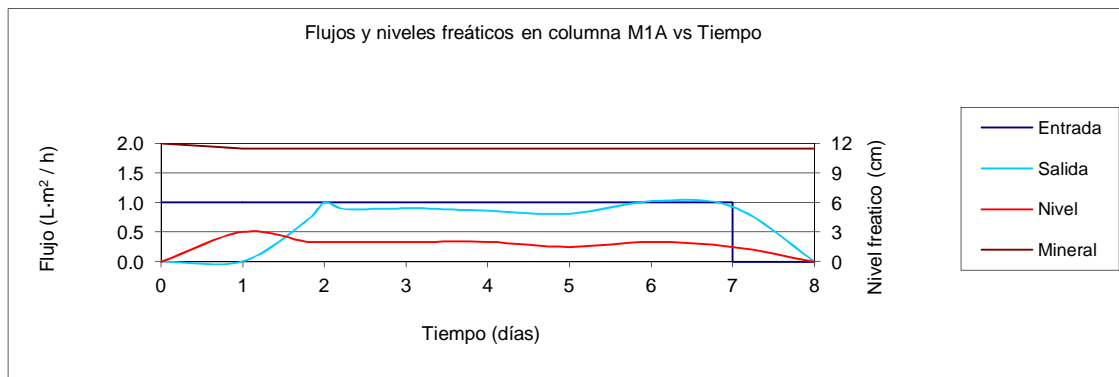


Figura 8.27: Flujos y niveles freáticos en columna M1A.

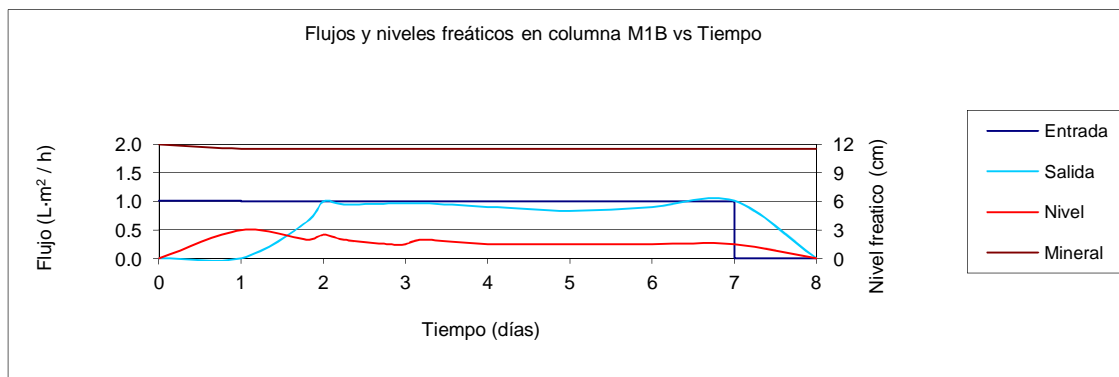


Figura 8.28: Flujos y niveles freáticos en columna M1B.

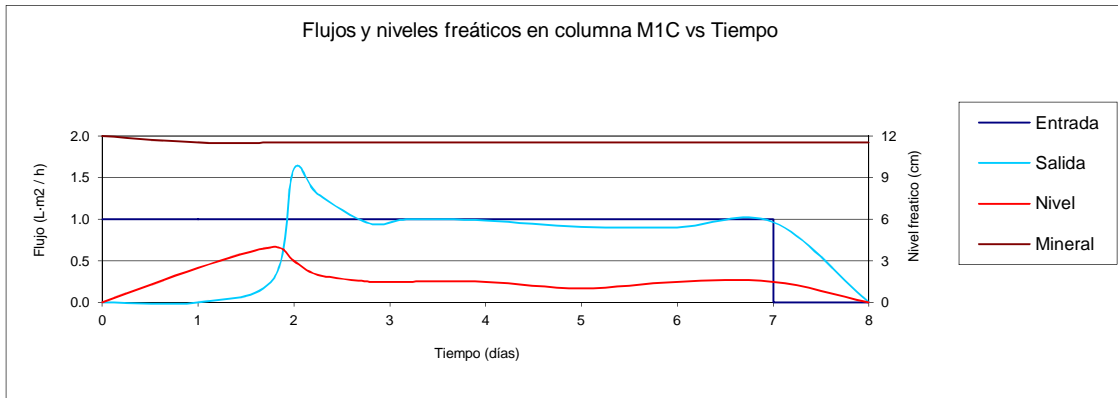


Figura 8.29: Flujos y niveles freáticos en columna M1C.

Caracterización hidrodinámica de la muestra M2.

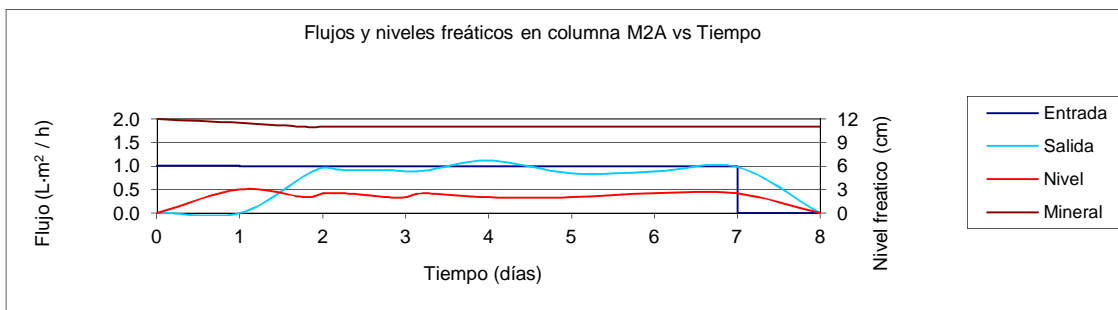


Figura 8.30: Flujos y niveles freáticos en columna M2A.

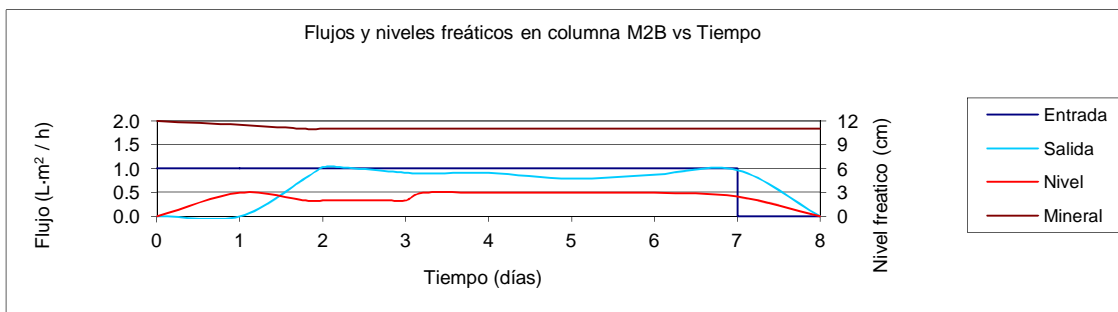


Figura 8.31: Flujos y niveles freáticos en columna M2B.

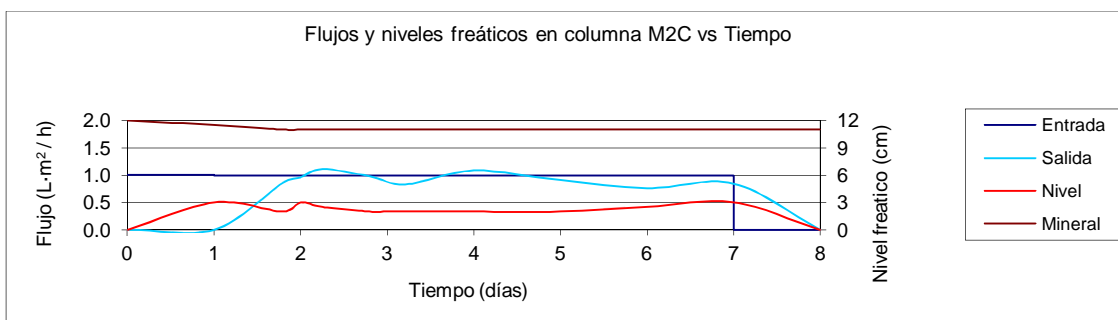


Figura 8.32: Flujos y niveles freáticos en columna M2C.

Caracterización hidrodinámica de la muestra M3.

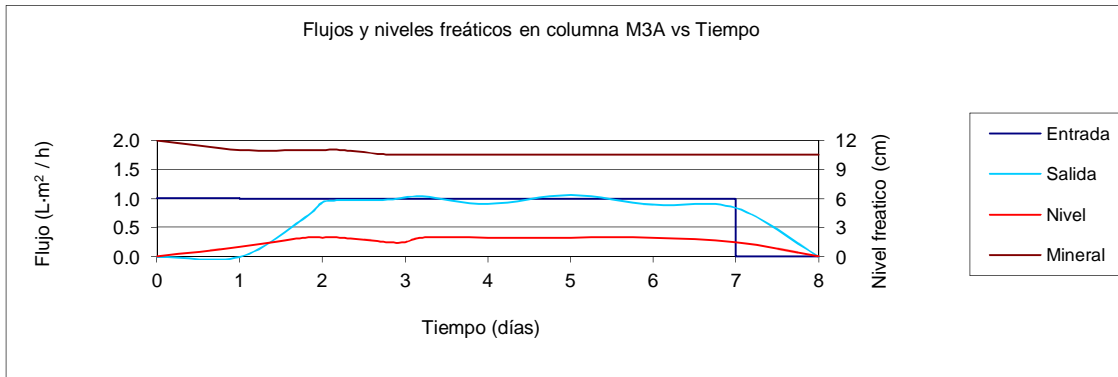


Figura 8.33: Flujos y niveles freáticos en columna M3A.

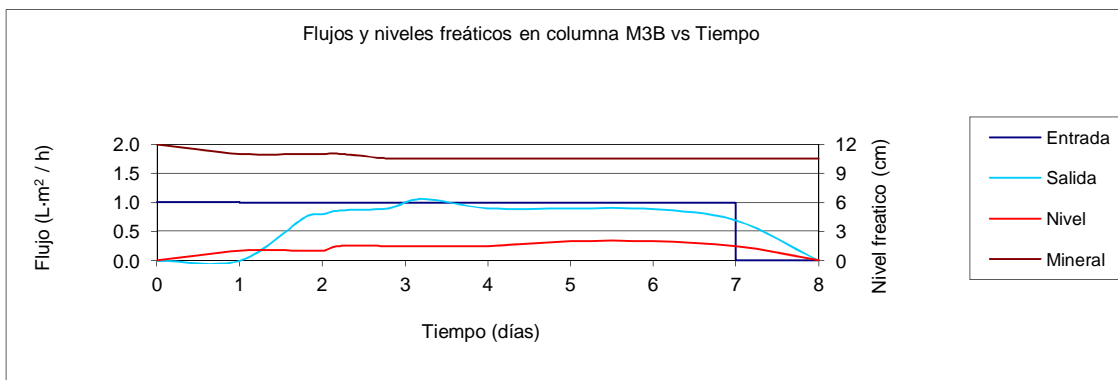


Figura 8.34: Flujos y niveles freáticos en columna M3B.

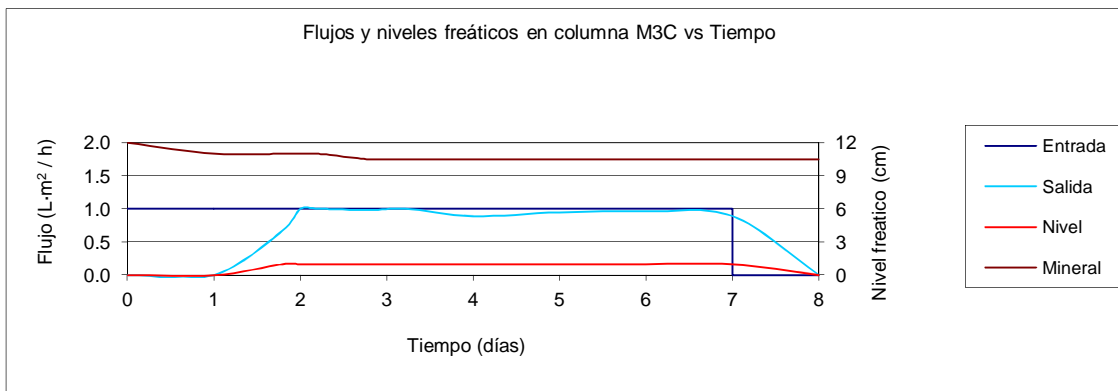


Figura 8.35: Flujos y niveles freáticos en columna M3C.

Caracterización hidrodinámica de la muestra M4.

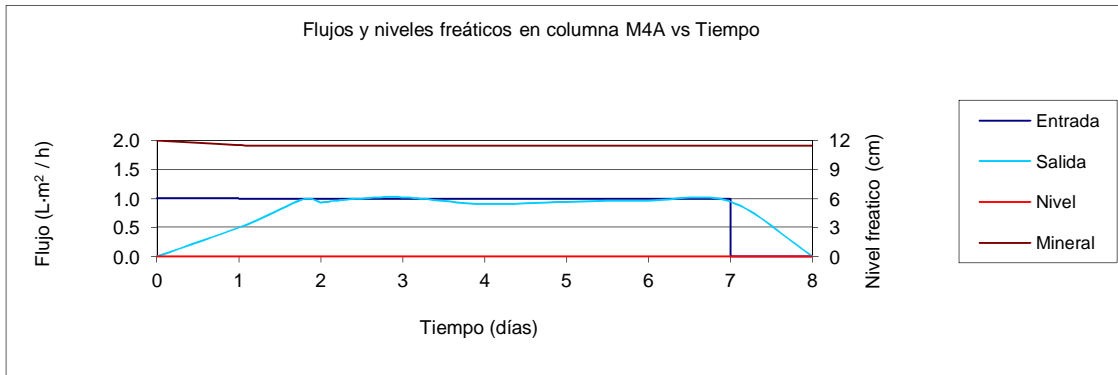


Figura 8.36: Flujos y niveles freáticos en columna M4A.

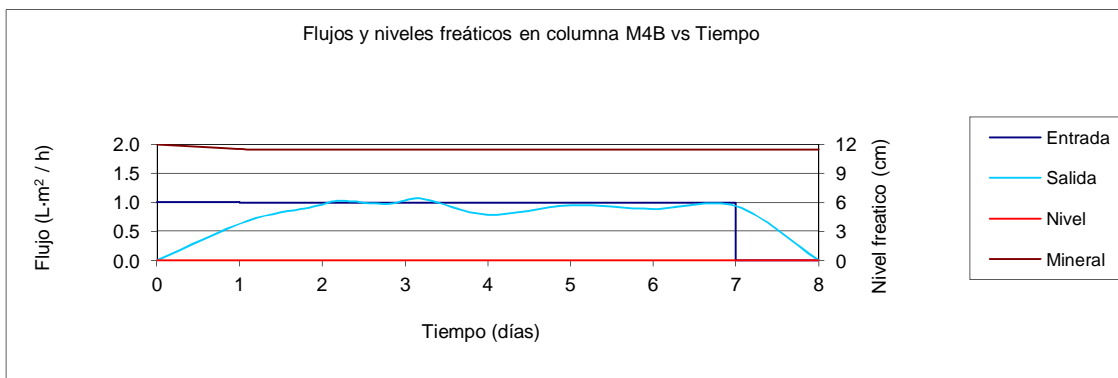


Figura 8.37: Flujos y niveles freáticos en columna M4B.

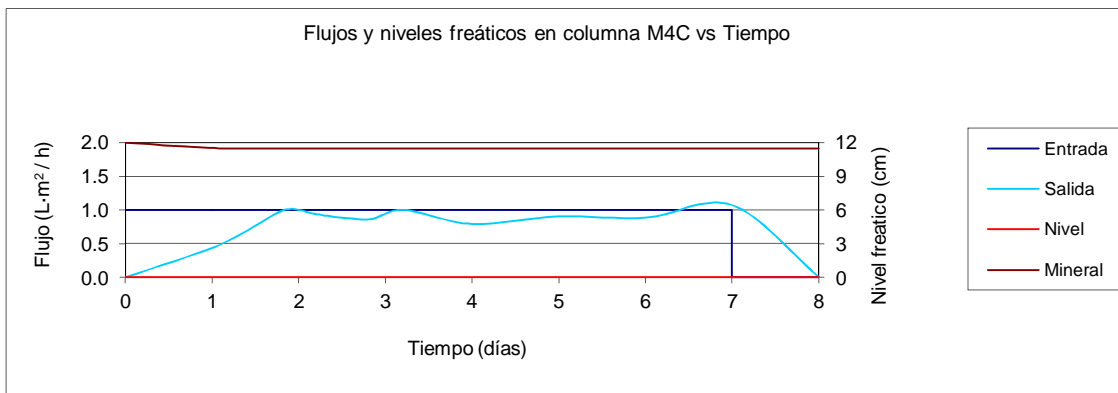


Figura 8.38: Flujos y niveles freáticos en columna M4C.

ANEXO C: ANALISIS QUÍMICO DE LOS RIPIOS

En la siguiente tabla se presenta el análisis de los rípios. Al contrastar el análisis de cabeza, se observa la disminución del Cu total y soluble y el aumento o constancia del Fe finalizada la lixiviación, debido a la impregnación de los rípios con refino (aporte de Fe), proporcional a la capacidad de retención de cada muestra. Por lo anterior un cálculo directo de recuperación de Fe en función de las leyes de cabeza no es adecuado.

Tabla 8.5: Análisis químico por Cu y Fe de los rípios de las muestras.

Muestras	Fe (%)	Cu _T (%)	Cu _S (%)
M1	2,92	0,66	0,47
M2	1,94	0,14	0,12
M3	1,91	0,34	0,10
M4	2,32	0,08	0,05

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DE ANÁLISIS QUÍMICOS

Disolución de cobre en curado ácido

Se pesan aproximadamente 5 grs de muestra de mineral curado. Luego se coloca la muestra en un vaso precipitado de 200 ml y se agregan 50 ml de agua destilada, se agita a 175 rpm durante un período de 2 hrs. La solución es filtrada y se determina la concentración de cobre por EAA.

Consumo de ácido

Se toma una muestra (M) de mineral y se colocan en un matraz con (V) de solución de 20 gpl (C_i) de ácido sulfúrico. Se cierra y somete a una agitación de 175 rpm, hasta que no se registren variaciones en la acidez del sistema (15 hrs). Luego se detiene la agitación y se mide la acidez final (C_f).

Finalmente se calcula el consumo de ácido según la fórmula.

$$\text{Consumo de ácido} = \frac{(C_i - C_f) \left[\frac{\text{grs}}{\text{lt}} \right] \cdot V [\text{lt}]}{M [\text{Kg}]} \left(\frac{\text{grs ácido}}{\text{Kg sólido}} \right)$$

Retención de Humedad en rípios

Realizada con el fin de obtener información acerca de cuanta solución queda en el mineral una vez que se descarta producto de la finalización de la operación.

Terminada la lixiviación, se deja escurrir la solución remante en el mineral por un periodo de 24 hrs. Luego se toman muestras de los rípios a cada una de las columnas y se pesan (A), se secan a

60 °C durante 24 horas, con el fin de no dañar la estructura de los minerales, para su posterior estudio mediante DRX. Finalmente la muestra seca es pesada (B) y se determina su retención de humedad.

$$\text{Humedad retenida} = \frac{A - B}{B} \left(\frac{\text{grs líquido}}{\text{grs sólido}} \right)$$

ANEXO E: DESCRIPCIÓN DE CÁLCULOS

Cálculo de recuperación mediante balance de masa por sólidos

$$\% \text{ recuperación} = \frac{Mf_i - Mi_i}{Mi_i} \cdot 100\%$$

Mf_i : masa final (ripio) del elemento i. $Mf_i = Mt \cdot \text{Ley}(\%)$

Mi_i : masa inicial (cabeza) del elemento i. $Mi_i = Mt \cdot \text{Ley}(\%)$

Mt : masa total de mineral cargado.

Cálculo de recuperación mediante balance de masa por soluciones

$$\% \text{ recuperación} = \frac{Ma_i}{Mi_i} \cdot 100\%$$

Ma_i : masa acumulada del elemento i. $Ma_i = \sum_0^t M_t$

M_t : masa obtenida en un tiempo t. $M_t = V_t \cdot C_t$

V_t : Volumen de solución en un intervalo de tiempo t.

C_t : Concentración del elemento en un tiempo t.

ANEXO F: CONSUMO DE ÁCIDO POR GRANULOMETRIAS

Para el análisis de consumo de ácido por granulometrías, se considero una muestra de masa representativa a cada granulometría, de igual manera se agregó la cantidad de ácido utilizada, la cual debe cubrir completamente la muestra. De esta forma se obtienen los consumos de ácido, de acuerdo a las ecuaciones presentadas anteriormente en el anexo de descripción de análisis químicos.

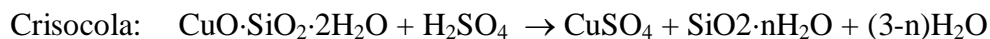
Tabla 8.6: Consumo de ácido por granulometrías.

Granulometría	Muestra de mineral (grs)	Volumen de ácido (ml)	Consumo de ácido en muestras (Kg H ⁺ / Ton mineral)			
			M1	M2	M3	M4
- 100 #	5	50	37,5	3,9	2,0	33,3
- 70 # – +100 #	5	50	31,4	3,9	4,0	25,7
- 40 # – +70 #	5	50	28,2	3,9	6,0	21,4
- 16 # – +40 #	10	50	30,6	6,7	8,9	20,8
- 4 # – +16 #	15	50	25,4	10,3	2,7	15,8
- 1/4 " – +4 #	20	50	21,4	11,1	5,0	11,0
- 3/8 " – +1/4 "	30	50	17,1	14,0	4,0	9,5
- 1/2 " – +3/8 "	50	50	13,4	12,9	3,8	7,7
- 3/4 " – +1/2 "	50	100	13,1	11,4	3,1	6,5
-1" – +3/4 "	100	100	7,4	7,5	2,4	5,1

ANEXO G: CÁLCULO DEL CONSUMO DE ÁCIDO TEÓRICO Y CONSUMO POR LA GANGA REACTIVA

Para el cálculo del consumo teórico se tuvieron las siguientes consideraciones:

- El Cu disponible, es el recuperado por lixiviación para cada caso.
- Solo la mena predominante es considerada como mineral de aporte de cobre.
- Se consideraron las siguientes ecuaciones de reacción en ácido sulfúrico.



Luego el consumo de ácido teórico es calculado según la siguiente fórmula:

$$\text{consumo ácido (Kg/ Ton)} = 1000 * \frac{\text{Cu}_T(\%)}{100} * \frac{\text{R}(\%)}{100} * \frac{\text{PMacido}}{\text{PMcobre}}$$

Válida solo para minerales cuya relación estequiométrica de reacción Cu: ácido es 1:1. De esta manera se obtienen los consumos teóricos para las cuatro muestras.

Tabla 8.7: Consumo de ácido teórico.

Muestra	ley de cabeza (%)	recuperación (%)	lixiviado (grs)	crisocola (grs)	covelina (grs)	ácido (Kg / Ton)
M1	1,19	69,80	41,5	114,81	-	12,82
M2	0,77	72,10	27,8	76,74	-	8,57
M3	0,78	49,20	19,1	-	28,69	5,89
M4	0,53	83,71	22,2	61,33	-	6,85

Para obtener el consumo de la ganga reactiva es necesario realizar la siguiente resta:

$$\text{consumo ganga reactiva} = \text{consumo real} - \text{ácido retenido} - \text{consumo teórico}$$

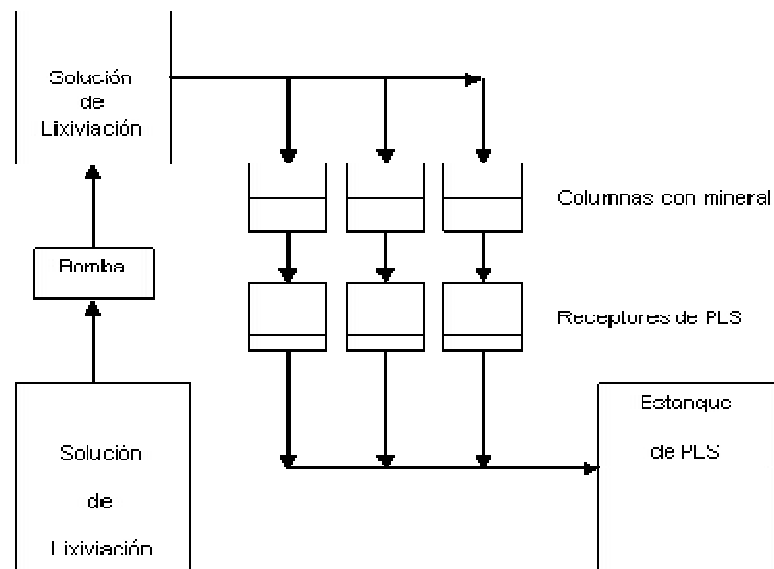
Donde:

$$\text{consumo real (Kg/Ton)} = \text{ácido en curado} + \sum \text{ácido en refino} - \sum \text{ácido en PLS}$$

$$\text{ácido retenido (Kg/Ton)} = \frac{\% \text{ humedad}}{100} * \frac{\text{concentración final ácido (g/L)}}{\text{densidad refino}}$$

ANEXO H: IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO

Se utilizó un equipo que consta de dos circuitos de lixiviación independientes, cada uno con tres columnas de acrílico transparente, como se muestra en la siguiente figura:



(a)

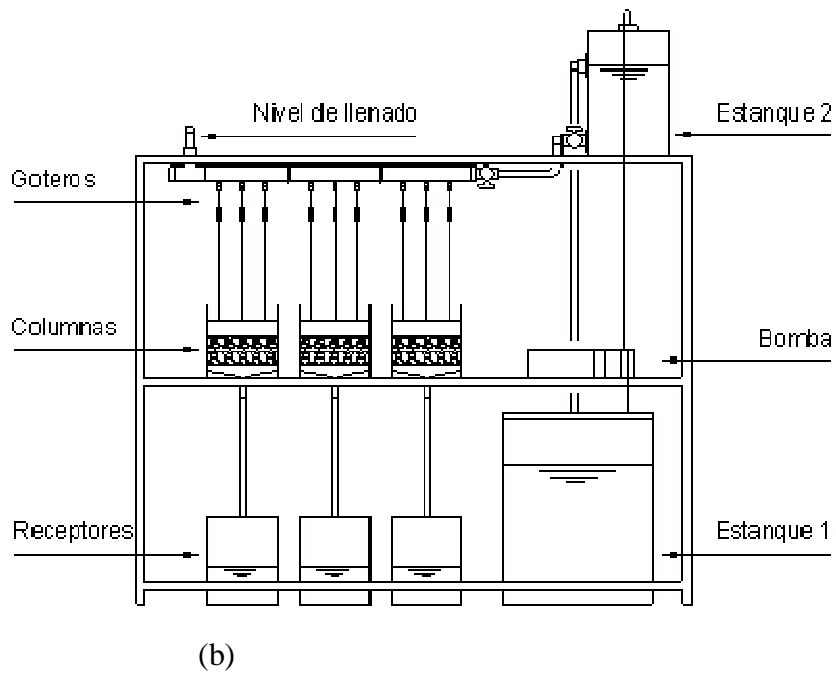


Figura 8.39: (a) Diagrama de flujo y (b) circuito de lixiviación sin recirculación.