



UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la Tierra

**CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DE ARCILLAS Y SU IMPACTO EN EL
PROCESO HIDROMETALÚRGICO DE MINA SAN ANTONIO ÓXIDOS, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

Nicolás Ismael Valenzuela Reyes

Profesor Guía: Dr. Harry Esterio Gallardo

Tutor: Eduardo Morales Palma, Superintendente Geología y Geotecnia

Miembros de la Comisión:

Ximena Contardo Berrios

Luis Ribba Gajardo

Viña del Mar, Chile

Junio 2020

RESUMEN

La mina San Antonio Óxidos se ubica en la comuna Diego de Almagro, Región de Atacama. Corresponde a tres Pórfidos Cupríferos (35ma) de composición dacítica alineados en sentido Norte-Sur que intruyen una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas y volcánicas asignadas a la Formación Asientos y la Formación Pedernales (Jurásico-Cretácico.) El yacimiento posee arcillas/finos que por sus propiedades físicas generan problemas en el procesamiento hidrometalúrgico. El objetivo general es caracterizar y modelar 3D las arcillas y determinar cómo afectan el proceso hidrometalúrgico. El estudio se realizó mediante recopilación de antecedentes, terrenos al rajo y planta hidrometalúrgica, muestreos de rocas para análisis de difracción de rayos X (DRX), consumo de ácido y cinética de lixiviación, finalmente con información de mapeos geológicos se realiza un modelamiento 3D de la alteración argílica. Con la DRX las principales arcillas identificadas son la Illita, Caolinita, Sepiolita, Halloysita, Pirofilita y Montmorillonita. Del consumo de ácido las arcillas con cobre (115 KgH/Ton) y a la Crisocola (109 KgH/Ton) son las menas con mayor consumo y de las gangas las limonitas (54 KgH/Ton), Estos minerales a partir de mayo 2019 aumentaron gradualmente el consumo de ácido hasta 43 KgH/Ton en el mes de agosto 2019. Las muestras de metasedimento con arcillas con cobre tienen la cinética de lixiviación más baja, además afectaron el %RecCuT en la lixiviación disminuyéndola en un 15% en el mes de mayo 2019.

Palabras Clave: Alteración Argílica, Arcillas, Proceso hidrometalúrgico, consumo de ácido, cinética de lixiviación.

ABSTRACT

The San Antonio Óxidos mine is located in the Diego de Almagro commune, Atacama Region. Corresponds to three Cupríferos Porphyry (35ma) of dacitic composition aligned in a North-South direction that intrude a sequence of calcareous and volcanic sedimentary rocks assigned to the Asientos Formation and the Pedernales Formation (Jurassic-Cretaceous.) The deposit has clays / fines that its physical properties create problems in hydrometallurgical processing. The general objective is to characterize and 3D model the clays and determine how they affect the hydrometallurgical process. The study was carried out by means of compilation of antecedents, terrains to the mine and hydrometallurgical plant, rock sampling for analysis of X-ray diffractometry (XRD), acid consumption and leaching kinetics, finally with geological mapping information, a 3D modeling of the argillic alteration is performed. With DRX, the main clays identified are Illita, Kaolinite, Sepiolite, Halloysite, Pyrophyllite and Montmorillonite. From the consumption of acid, clays with copper (115 KgH / Ton) and Chrysocolla (109 KgH / Ton) are the ores with the highest consumption and from bargains Limonites (54 KgH / Ton), These minerals from May 2019 increased Gradually acid consumption up to 43 KgH / Ton in August 2019. Metasediment samples with copper clays have the lowest leaching kinetics, also affected the % RecCuT in leaching, decreasing it by 15% in the month of May 2019.

Key Words: Argillic Alteration, Clays, Hydrometallurgical process, acid consumption, leaching kinetics.

Agradezco en primer lugar a mi profesor guía Harry Esterio, quien me dio las bases de mi pasión por la geología económica, además de apoyarme en los 4 distintos temas de tesis que trabajamos y enseñarme que siempre se puede dar más de lo que uno cree.

También a todo el personal de CODELCO que me acompañaron durante el desarrollo de mi memoria: Eduardo Gonzales, Mario Ibáñez, Erik Cruzatt, Rodrigo Calvo, Valentina Urtubia, Juan Apablaza, Camilo Fritis, Pablo Valdivia, Eduardo Morales, Vania Rojas, Sandra Toledo, Francisco Poblete, Richard Araya, Walter Morales, Jaime Fredes, Jaime Figueroa, Álvaro Lazcano, Godfly, Cristofer.

Imposible dejar de lado a todos mis amigos de la universidad, los Pichoyos: Mati, Nico, Pablo, Daniel, Tomas, Jp, Uruguayo, mis amigas Valeria, Camila, Natu, Poli y muchos otros más, sin ustedes no hubiera llegado hasta este momento.

Finalmente agradecerle a mi familia, mi padre Nelson y mi madre Mitzi por siempre confiar en mí y apoyarme en todo momento, mis hermanos Cristian y Sebastián, mis abuelitas Mirna y Mitzi, a mi tata Rodolfo, abuelito Beto, mi pareja Bárbara y madre de mi hijo Alonso por acompañarme en los últimos 4 años de mi carrera, gracias por siempre apoyarme y a sacar lo mejor de mí.

Mis palabras no son suficientes para todo lo que les tengo que agradecer, Muchas gracias a todos.

Dedicada a mis abuelitas Mirna y Mitzi (Mimi)
que partieron durante el desarrollo de mi Memoria.

INDICE

CAPÍTULO 1:	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Formulación del Problema.....	2
1.2	Hipótesis.....	3
1.3	Objetivo general, específicos y alcances	3
1.4	Metodología.....	3
1.4.1	Recopilación de antecedentes	4
1.4.2	Terreno.....	4
1.4.2.1	Muestreo	5
1.4.3	Laboratorio	5
1.4.4	Gabinete.....	7
1.4.5	Modelamiento geológico 3D.....	7
1.5	Ubicación y Accesos	10
1.6	Clima	11
1.7	Geomorfología.....	11
1.8	Trabajos Anteriores	13
CAPÍTULO 2:	MARCO GEOLOGÍCO.....	15
2.1	Marco Geológico Regional.....	15
	Batolito Pedernales.....	15
	Batolito Sierra Castillo	15
	Formación Montandón	16
	Formación Asientos.....	17
	Estratos de Quebrada Vicuña	17
	Formación Pedernales	17
	Domo Riolítico de Potrerillos.....	18
	Estratos de Cerro Valiente.....	18
	Gravas de Atacama.....	18
2.2	Marco Geológico Distrital	20

2.2.1	Litología.....	20
2.2.1.1	Rocas Estratificadas	21
2.2.1.2	Rocas Intrusivas	22
2.2.1.3	Rocas Metamórficas.....	23
2.2.2	Estructuras	24
2.2.3	Alteración	25
2.2.4	Mineralización	27
2.3	Marco Metalogénico.....	28
CAPÍTULO 3: MARCO TEORICO.....		31
3.1	Proceso Hidrometalúrgico	31
3.1.1	Chancado	31
3.1.2	Aglomerado y Curado.....	32
3.1.3	Apilamiento	33
3.1.4	Lixiviación.....	33
3.2	Arcillas	34
3.2.1	Estructura cristalográfica	34
3.2.2	Grupos.....	35
3.2.3	Propiedades.....	36
3.3	Problemas que generan las arcilla en las etapas de chancado, aglomerado / curado y lixiviación	37
3.3.1	Chancado y arcillas	37
3.3.2	Aglomerado/curado y arcillas	39
3.3.3	Lixiviación y arcillas	40
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....		43
4.1	Muestreo y descripción macroscópica de rocas.....	43
4.1.1	Caracterización de las arcillas por Difracción de Rayos X	43
4.1.2	Consumo de acido.....	46
4.1.3	Cinética de lixiviación	48
4.2	Caracterización de las arcillas por Difracción de Rayos X.....	50

4.3	Curado (consumo ácido).....	52
4.4	Lixiviación (% Recuperación CuT).....	55
4.5	Gastos antes y después del ingreso de las arcillas al proceso hidrometalúrgico.....	58
4.6	Modelamiento geológico de la alteración argílica.....	59
CAPÍTULO 5:	DISCUSIÓN.....	63
CAPÍTULO 6:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
CAPÍTULO 7:	REFERENCIAS.....	73
ANEXOS	.....	76
ANEXO A.....	.....	77
ANEXO B.....	.....	79
ANEXO C.....	.....	86
ANEXO D.....	.....	90
ANEXO E.....	.....	99
ANEXO F.....	.....	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital de la División El Salvador. (A) Ubicación de sus distritos. (B) Distrito Indio Muerto, (C) Distrito San Antonio.....	2
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.....	4
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la caracterización mineralógica por DRX.....	6
Figura 4. Ubicación y accesos Mina San Antonio.....	10
Figura 5. (A) Tipos climáticos en la Región de Atacama según Köeppen (1948) con su precipitación anual. (B) Clinograma de la Región de Atacama. Barras verticales representan precipitación (mm) y la curva roja, la temperatura (°C). Modificado de Julia et al, (2008).....	11
Figura 6. Mapa con unidades geomorfológicas de la región de atacama.....	12
Figura 7. Redes de drenaje.....	12
Figura 8. Mapa y perfil geológico Potrerillos. Cornejo et al (2003).....	19
Figura 9. Leyenda y simbología de Mapa y Perfil Geológico, Hoja Potrerillos.....	20
Figura 10. Modelo y perfil geológico de las unidades litológicas, Mina San Antonio. PSAI (2016).....	21

Figura 11. Modelo y perfil geológico estructural, Mina San Antonio. Extraído de PSAI 2016.....	25
Figura 12. Franjas metalogénicas con sus principales yacimientos y prospectos. Almonacid (2007).	29
Figura 13. Diagrama de flujo de la planta hidrometalúrgica de División El Salvador. CODELCO (2015).....	31
Figura 14. Concepto de Aglomeración. Extraído de Carreño (2012).....	32
Figura 15. Modelo cinético del núcleo recesivo, ejemplifica las etapas de evolución del proceso de lixiviación. Extraído de Carreño 2012.	34
Figura 16. Estructura básica de las Arcillas. Extraído de García y Suarez (2000).	35
Figura 17. Secuencia de acumulación de material fino en chutes de traspaso. Colores cálidos corresponden a una menor velocidad en el transporte del material.	38
Figura 18. Efecto barrera en pilas de lixiviación. (A) Pila con zona sin lixiviar producto del efecto barrera. (B) Pila sin efecto barrera. Zabala (2013).	42
Figura 19. Mapa de ubicación de las rocas capturadas para Difractometría de Rayos X.....	43
Figura 20. Ubicación de muestreo de minerales para análisis de consumo de ácido.	46
Figura 21. Ubicación de muestreo de rocas para análisis de cinética de lixiviación.	49
Figura 22. Mina San Antonio Óxidos. (A) Ubicación de sondajes históricos. (B) Ubicación de sondajes, mapeos de pozos de tiro y bancos.	59
Figura 23. Modelo antiguo (2016) alteración argílica. (A) Modelo Alteración Argílica sobre topografía mina. (B) Modelo alteración argílica sin topografía.	60
Figura 24. Modelo alteración argílica de esta memoria. (A) Modelo alteración argílica con topografía. (B) Modelo alteración argílica sin topografía.	60
Figura 25. Topografía de la mina San Antonio Óxidos a la altura del banco 3320. (A) Ubicación de sondajes. (B) Ubicación de sondajes, mapeos de pozos de tiro y bancos.....	61
Figura 26. Modelo de alteraciones en el banco 3320. (A) Modelo de alteraciones con base de datos antigua. (B) Modelo de alteraciones con la base de datos realizada en la memoria.	62
Figura 27. Modelo geológico de litologías de la mina San Antonio Óxidos.....	62
Figura 28. Mapa de ubicación espacial de las muestras recolectadas. (A) Modelo nuevo. (B) Modelo Antiguo (2016).	65
Figura 29. Clasificación para alteraciones hidrotermales (Corbett y Leach, 1998).	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Codificación mapeos pozos de tiro.	8
Tabla 2. Generación del Collar del sondaje en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.	9
Tabla 3. Generación del Survey del sondaje en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.	9
Tabla 4. Incorporación de los datos de litología y alteración en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.	9
Tabla 5. Muestras recolectadas para Difractometría de Rayos X.	43
Tabla 6. Caracterización de las muestras minerales recolectadas.	47
Tabla 8. Caracterización de las muestras de rocas recolectadas.	49
Tabla 9. Resultados caracterización de arcillas con Difracción de Rayos X.	51
Tabla 10. Tipo y cantidad de arcillas identificadas en las distintas litologías que componen a las fases de producción de SAO.	51
Tabla 11. Resultados de consumo de ácido (KgH/Ton) de las muestras minerales recolectadas.	52
Tabla 12. Resultados de análisis de cinética de lixiviación.	55

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Chancadores primario y secundario.	38
Fotografía 2. Tambor aglomerador INAMAR.	39
Fotografía 3. Mineral aglomerado con alto contenido de arcillas. Ejemplo de curado en un grano mineral con arcillas (Derecha).	40
Fotografía 4. Pilas de lixiviación.	41
Fotografía 5. Descarga de glómeros en pila de lixiviación.	41
Fotografía 6. (A) Glómeros de mayor tamaño en pilas de lixiviación. (B) Ejemplo de percolación de la solución lixivante entre granos con y sin contenido de arcillas en su matriz.	42
Fotografía 7. Muestra 4, Pórfido de Cobre con alteración argílica.	44
Fotografía 8. Muestra 6, Metasedimento con alteración argílica.	45
Fotografía 9. Brecha Matriz especularita con alteración argílica leve.	45
Fotografía 10. Muestra M6 (A) Arcillas con cobre y muestra M1(B) Crisocola.	47
Fotografía 11. Muestra M5(A) Arcillas Blancas y Muestra M2 (B) Limonitas.	48
Fotografía 12. Muestra MLX2(A) Pórfido de cobre y muestra MLX4 (B) Metasedimento.	50

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Resumen de cantidad de ácido utilizado (KgH/Ton) por minerales.....	53
Gráfico 2. Cantidad de ácido utilizado en el Curado entre septiembre 2018 – octubre 2019.	54
Gráfico 3. Porcentaje sulfatación de CuT entre las 48 y 72 horas entre septiembre 2018 y diciembre 2019.	54
Gráfico 4. Porcentaje de Recuperación CuT.....	56
Gráfico 5. Consumo de ácido.....	56
Gráfico 6. Porcentaje de Recuperación CuT en lixiviación entre septiembre 2018 a octubre de 2019.....	57
Gráfico 7. Valores de recuperación CuT vs Cantidad de ácido Kg/Ton y alteración argílica.....	58
Gráfico 8. Diferencia del ingreso de arcillas respecto a los gastos de energía y ácido sulfúrico.	58
Gráfico 9. Cantidad de minerales que ingresaron al procesamiento hidrometalúrgico. (A) Cantidad de menas. (B) Cantidad de gangas. Información entregada por Superintendencia de Planta Hidrometalurgica.	68
Gráfico 10. Porcentaje de litologías que ingresaron al procesamiento hidrometalúrgico. Información entregada por Superintendencia de Planta Hidrometalurgica.....	69

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La mina San Antonio se ubica en la Comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama, 60 km al Sur - Este de la ciudad El Salvador a 3.200 msnm. Pertenece a la División El Salvador, CODELCO (Figura 1). Incluye 3 rajos exóticos (Damiana Norte, Centro y Suroeste), 3 rajos de Pórfidos (Campamento Antiguo, QM y Colina de Cobre), un yacimiento porfídico subterráneo principal, El Inca (único activo) y el yacimiento San Antonio (San Antonio Óxidos) con un sistema de tres “Pórfidos Cupríferos” Terciarios (dacítica) de dirección Norte - Sur en una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas y volcánicas intermedias del Jurásico - Cretácico de las formaciones Asientos y Pedernales respectivamente. De Norte a Sur, los tres pórfidos son el Pórfido de Cobre Pórfido Secreto y Pórfido Esmeralda.

Antiguamente mina San Antonio era conocida como Mina Potrerillos o “Mina Vieja”, la cual fue explotada mediante minería subterránea con el método “block caving” por la empresa Andes Copper Mining Co. entre los años 1926 y 1959, extrayendo una total de 169 millones de toneladas (Mt) de mena sulfurada de calcosina, calcopirita, enargita y covelina, con una ley media de 1,65% CuT y 39 Mt de mena oxidada de brocantita, cuprita, crisocola, azurita, cobre nativo y tenorita, con una ley media de 1,65% CuT (March, 1933). Desde 1971, el yacimiento es propiedad de CODELCO. En el año 2015 reinauguró sus operaciones con el nombre mina San Antonio Óxidos, con una explotación a rajo abierto. Actualmente contiene 170 Mt de reservas, de una ley media de 0,5% de cobre, con un ritmo mensual de tratamiento máximo de 1 Mt produciendo mensualmente 1800 toneladas métricas de cobre fino (tmf) hasta el año 2021.

La geología es el primer eslabón de la cadena del negocio minero y se asocia con la geología de producción, geología de modelamiento, geología regional, geología de exploración, geotecnia, hidrogeología, ingeniería geológica, etc. Las principales variables geológicas que impactan en el negocio minero son la litología, alteración, mineralogía y estructuras, siendo fundamentales y decisivas en el desarrollo de la minería. En División Salvador, se ha detectado que la variable mineralógica asociada a la alteración argílica y a su procesamiento hidrometalúrgico está impactando el negocio minero.

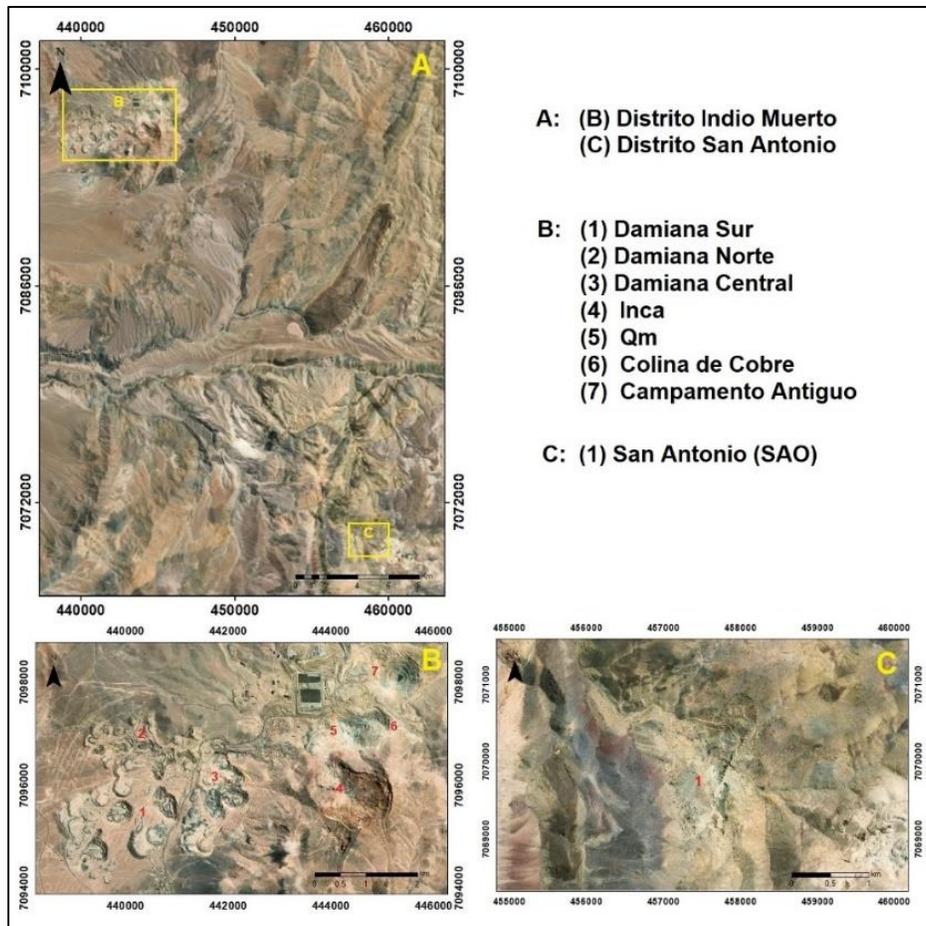


Figura 1. Imagen satelital de la División El Salvador. (A) Ubicación de sus distritos. (B) Distrito Indio Muerto, (C) Distrito San Antonio.

1.1 Formulación del Problema

Mina San Antonio posee arcillas/finos producto de las alteraciones hidrotermales, lo que se ha convertido en un problema para la planta hidrometalúrgica en las etapas de chancado, aglomerado/curado y lixiviación debido a las propiedades de estos minerales. El problema se hizo evidente en mayo del 2019, cuando ingresó a la planta material arcilloso produciendo un aumento en el consumo de ácido y una disminución en la recuperación del cobre. La presente investigación se desarrolla en el área de Geología y Geotecnia, perteneciente a la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD) de la División El Salvador, CODELCO, bajo la supervisión del Superintendente Eduardo Morales.

1.2 Hipótesis

Las rocas de mina San Antonio Óxido contienen arcillas que afectan el proceso hidrometalúrgico, por lo que es posible que los minerales de la alteración argílica sean los causantes de los problemas.

1.3 Objetivo general, específicos y alcances

El objetivo general es caracterizar, modelar 3D las arcillas y determinar cómo afectan el proceso hidrometalúrgico de mina San Antonio Óxido.

Los objetivos específicos corresponden a:

- Identificar las rocas y minerales que causaron problemas en el proceso hidrometalúrgico.
- Determinar el impacto y gastos económicos en el proceso hidrometalúrgico de la cinética de lixiviación y consumo de ácido de las muestras recolectadas.
- Definir la distribución, dimensiones y controles de formación de la alteración argílica mediante un modelamiento geológico 3D.
- Recomendar mezclas de litologías y minerales para beneficiar el proceso hidrometalúrgico evitando pérdidas económicas.

Los alcances corresponden a:

- El trabajo se realiza en la División El Salvador en mina San Antonio Óxidos.
- La base de datos utilizada contiene información de sondajes (DDH y AR) y de los mapeos de bancos y pozos de tiro realizados en terreno. Además, los mapeos y muestreos no incluyen al sector del hundimiento minero.
- El análisis del procesamiento del mineral en la planta hidrometalúrgica comprende solo las etapas donde está involucrado el material con arcillas (chancado, curado, aglomerado y lixiviación).
- No se considera la geotecnia.

1.4 Metodología

Se divide en recopilación de antecedentes, terreno, laboratorio y gabinete (Figura 2).

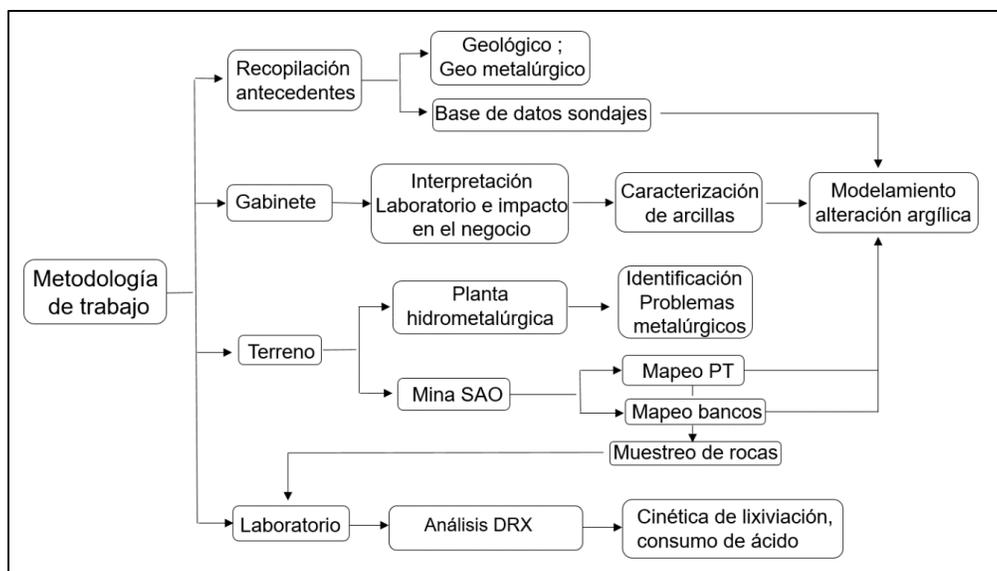


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

1.4.1 Recopilación de antecedentes

Corresponden a estudios y/o trabajos geológicos y geo - metalúrgicos de mina San Antonio Óxidos, con el fin que los análisis y estudios propuestos no se hayan realizado anteriormente; antecedentes bibliográficos con énfasis en la geología regional y distrital del yacimiento; papers sobre las litologías, eventos de mineralización y alteración; investigaciones de minerales de arcilla en yacimientos de cobre asociado procesos hidrometalúrgicos; e información geo - metalúrgica del comportamiento de las rocas y minerales en el proceso hidrometalúrgico. Finalmente, se construye una base de datos (BD) de sondajes (DDH y AR) para realizar el modelamiento geológico 3D.

1.4.2 Terreno

Los terrenos donde se capturó información y rocas para posteriores análisis se realizaron en la planta hidrometalúrgica y en mina San Antonio Óxidos. En la planta hidrometalúrgica se realizaron 3 terrenos con una duración de 1 día cada uno, identificando los sectores donde las arcillas generan problemas y definiendo sus impactos en el proceso hidrometalúrgico. En mina San Antonio Óxidos los terrenos correspondieron a 8 meses. Se capturaron muestras de mano en los bancos 3300, 3310, 3360, 3370, 3380, 3390, 3430, 3450, 3520, 3560. Se realizaron mapeos geológico de pozos de tiro y de bancos mediante cartillas geológicas definidas (ANEXO A). El mapeo geológico de pozos de tiro consiste en la descripción de litología, alteración y mineralogía (óxidos, sulfuros y ganga) de cada uno de los cutting dejados alrededor de los pozos por sondajes de aire reverso. El mapeo geológico de bancos se realiza en los bancos no mapeados (3340, 3360, 3370, 3520, 3560, 3580,

3610, 3630) y en las frentes liberadas luego de la tronadura/extracción de la roca, utilizando el Método Anaconda, el cual consiste en una descripción geológica en planta de la litología, estructuras, alteración y mineralización de los bancos.

1.4.2.1 Muestreo

El muestreo correspondió a:

- 10 muestras de rocas con minerales de mena y ganga para determinar el consumo de ácido. Se prioriza un muestreo monomineral con el objetivo de que los resultados sean lo más representativo posible del mineral y no sean afectados por la litología y/o alteración, sin embargo, algunos minerales son imposible recolectarlos como monomineral por lo tanto el muestreo de rocas fue realizado con un % alto en cantidad del mineral y con una intensidad de alteración baja o nula.
- 7 muestras de rocas para determinar cinética de lixiviación con prioridad a las unidades Pórfido de Cobre, Pórfido Secreto y Metasedimento, debido a que son las principales litologías que constituyen las fases de producción (1A, 1B y 1C). El criterio de muestreo se centró en rocas con distintas litologías con alteración argílica que componen a la Fase 1C y 1B. El objetivo del muestreo fue conocer el comportamiento metalúrgico de estas unidades y estar preparados para la extracción P0 2020 (Fase 2 San Antonio) que se realizará durante el año 2020.
- 8 muestras de roca para identificación de minerales por Difracción de Rayos X asociado a las 3 fases de explotación (Fases 1A, 1B y 1C). El objetivo del muestreo fue caracterizar las arcillas componen las fases productivas del yacimiento.

1.4.3 Laboratorio

Los análisis de laboratorio corresponden a análisis hidrometalúrgicos (17 muestras en total, consumo de ácido (10 muestras) y análisis de cinética de lixiviación (5 muestras)) realizados en la empresa BUREAU VERITAS y por la Difracción de Rayos X.

Los análisis de consumo de ácido tienen como finalidad determinar la cantidad de ácido que consumen los minerales de mena y ganga. Los análisis de cinética de lixiviación tienen como finalidad determinar la velocidad de disolución de las rocas (5 muestras de pórfido y 2 muestras de

Metasedimento ambas con alteración argílica). Las muestras están ubicadas en las zonas que serán explotadas durante las nuevas fases del 2020.

La metodología empleada en los análisis de Difracción de Rayos X esta resumida en la (Figura 3). El análisis se realizó a las muestras de mano obtenidas en terreno, dando énfasis a las rocas que serán extraídas en las nuevas fases durante el 2020. La descripción macroscópica se encuentra en el ANEXO B, definiendo el tipo de roca, color, textura, minerales primarios y secundarios, alteraciones, mineralización, oxidación y magnetismo. La preparación mecánica de las muestras fue realizada por personal especializado de la empresa PRO LTDA en el laboratorio de la concentradora DSAL, CODELCO. Esta etapa consiste en la pulverización de la muestra mediante 3 chancadores hasta obtener un tamaño menor a 150 μm . Mientras más pequeño es el tamaño del grano, mejores son los resultados. Una vez pulverizada la muestra, se envasó y se rotuló con su respectivo código. Las muestras pulverizadas y preparadas fueron analizadas con el difractómetro Bruker D8 Advance - A25, con un rango angular de medición 2θ desde 4° y 80° . Este se encuentra en el Laboratorio de Análisis de Solidos, de la Facultad de Ingeniería y de Ciencias Químicas de la Universidad Andrés Bello, Santiago.

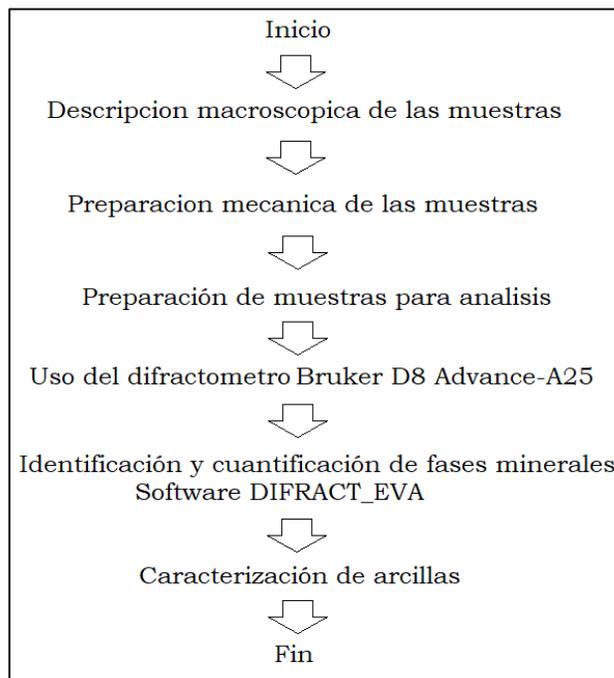


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la caracterización mineralógica por DRX.

Para la identificación de cuantificación de las fases minerales se utilizó el software DIFRACT_EVA y comienza con la carga del difractograma al software, posteriormente se eliminan los peaks de ruido o “background” debido a que estos peaks pueden confundirse con los minerales investigados. Una vez extraído el “background”, se indican los parámetros de búsqueda al software (elementos químicos y tipos de materiales) para luego, identificar las fases minerales presentes en la muestra. El software entrega una lista de minerales de las fases minerales que contiene la muestra. Esta lista es el resultado de la comparación de los peaks de difracción de la muestra con peaks teóricos de la base de datos. Una vez determinados los minerales para cada muestra se definieron sus volúmenes y se relacionó con su comportamiento hidrometalúrgico de la fase de explotación de donde fueron obtenidas las muestras. Las arcillas identificadas son separadas según su fase de producción donde están ubicadas, definiendo los tipos de arcillas en orden de abundancia, con la finalidad de conocer el comportamiento metalúrgico de las rocas con alteración argílica en las fases de producción.

1.4.4 Gabinete

En el gabinete se interpretan los resultados del laboratorio y terreno, generándose con esta información el modelo geológico 3D e informe final.

1.4.5 Modelamiento geológico 3D

El modelamiento geológico 3D es realizado con el software LeapFrog Geo 4.5 mediante un modelamiento implícito que utiliza las bases de datos disponibles para calcular la distribución de las distancias a las muestras más cercanas generando distintos escenarios posibles para las mismas unidades geológicas. Esta aproximación usa funciones basadas en las distancias entre las muestras para calcular los contactos entre dos unidades distintas. La base de datos utiliza información geológica que represente la alteración argílica del yacimiento asociada a la de los mapeos geológicos de bancos, pozos de tiro y la base de datos de sondajes histórica.

- Base de datos de sondajes: La base de datos de sondajes utilizada tiene 1177 sondajes históricos (DDH y AR) de mina San Antonio. Los sondajes fueron realizados en 18 campañas entre 1913 y 2012, siendo codificadas y organizadas por la empresa GEOESTIMA (2016) con la finalidad de crear el “Informe Modelo Integrado PSAI”.

- Mapeo pozos de tiro: Son usados para generar modelos geológicos predictivos, donde cada pozo es codificado como un sondaje (Tabla 1). La codificación de los pozos tiene un ID_Pozo donde se especifica el disparo y número de pozo, también se georreferencia con sus coordenadas X, Y, Z, y se le agregan datos geológicos como; CuT (Cobre Total), CuSF (Cobre Soluble Frio), Rsol (Razón Solubilidad), litología y alteración.

ID_Pozo	X	Y	Z	CuT	CuSF	Rsol	Lito	Alteración
3310-008SA-114	457843,778	7069930,977	3319,864	0,080	0,020	25	Porf	Argilico
3310-008SA-117	457843,141	7069949,965	3320,047	0,080	0,020	25	Porf	Argilico
3310-008SA-125	457854,598	7069937,955	3320,050	0,320	0,200	63	Porf	Argilico
3310-008SA-128	457859,193	7069951,902	3320,061	2,200	1,590	72	Porf	Argilico
3310-008SA-13	457873,394	7069883,194	3320,036	0,130	0,050	38	Porf	Argilico
3310-008SA-130	457860,175	7069938,395	3320,085	0,760	0,650	86	Porf	Argilico
3310-008SA-130	457860,175	7069938,395	3320,085	0,760	0,650	86	Porf	Argilico
3310-008SA-134	457866,104	7069932,010	3319,851	0,740	0,650	88	Porf	Argilico
3310-008SA-136	457865,136	7069945,443	3319,963	0,710	0,660	93	Porf	Argilico
3310-008SA-138	457870,115	7069953,210	3319,842	0,400	0,320	80	Porf	Argilico
3310-008SA-141	457871,321	7069936,823	3319,721	0,960	0,910	95	Porf	Argilico
3310-008SA-143	457876,437	7069940,422	3319,705	0,150	0,100	67	Porf	Argilico
3310-008SA-145	457875,343	7069953,608	3319,717	0,060	0,010	17	Porf	Argilico
3310-008SA-146	457880,843	7069954,293	3319,613	0,100	0,030	30	Porf	Argilico
3310-008SA-148	457880,891	7069943,020	3319,670	0,110	0,040	36	Porf	Argilico
3310-008SA-149	457886,324	7069944,132	3319,755	0,070	0,020	29	Porf	Argilico
3310-008SA-151	457885,752	7069954,677	3319,612	0,120	0,020	17	Porf	Argilico
3310-008SA-152	457890,616	7069955,201	3319,792	0,430	0,100	23	Porf	Argilico
3310-008SA-154	457892,281	7069945,338	3319,894	0,320	0,280	88	Porf	Argilico

Tabla 1. Codificación mapeos pozos de tiro.

- Mapeo de bancos: Son codificados como sondajes, generando un Collar con la ubicación (X, Y, Z) del sondaje y su largo entre cada punto (Tabla 2). Luego se genera el Survey el cual con la profundidad del sondaje, además del Azimut y Dip entre cada punto topográfico (Tabla 3). Finalmente se le incorporan la información de litología y alteración capturada en terreno (Tabla 4). El registro de los mapeos de bancos empleados para esta memoria se encuentra en el ANEXO C.
- Tendencia estructural: Corresponde a la orientación espacial de las litologías y alteraciones respecto a las estructuras del yacimiento. Para su modelamiento, se utilizó la opción “Structural Trend” del software LeapFrog Geo 4.5 el cual consiste en agregarle una orientación a la unidad seleccionada (litología y/o alteración). Las informaciones de las orientaciones de las unidades geológicas modeladas fueron extraídas del trabajo de Bobenrieth y Zamora (2008) donde indican que el principal sistema que controla el emplazamiento del Pórfido de Cobre corresponde a un sistema de fallas de rumbo preferente Norte - Sur con variaciones al Norte

Noreste y Norte Noroeste subverticales. El segundo sistema de fallas es de dirección NW representados por la falla San Antonio (N30W/70SW).

PUNTO BANCO 3520SA					
ID	ESTE	NORTE	COTA	LARGO COMI	COMPOSITO
3520SA-2	7069169,7	457803,22	3522,967	0,0000	2
3520SA-3	7069181,9	457780,66	3526,301	25,8621	2;3
3520SA-4	7069190,1	457770,89	3522,605	13,2618	3;4
3520SA-5	7069208,2	457743,68	3522,647	32,7196	4;5
3520SA-6	7069226,5	457726,97	3523,079	24,7319	5;6
3520SA-6.1	7069244,1	457722,93	3521,985	18,1377	6;6,1
3520SA-7	7069249,9	457721,21	3522,451	6,0031	6,1;7
3520SA-8	7069263,9	457719,41	3523,034	14,1839	7;8
3520SA-9	7069278	457720,35	3519,28	14,6533	8;9
3520SA-10	7069287,3	457717,43	3522,675	10,2733	9;10
TOTAL				159,8266	

Tabla 2. Generación del Collar del sondaje en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.

PUNTO BANCO 3520SA							
ID	ESTE	NORTE	COTA	LARGO COMI	PROFUNDID	AZIMUT	DIP
3520SA-2	7069169,7	457803,22	3522,967	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3520SA-3	7069181,9	457780,66	3526,301	25,8621	25,8621	151,5823	0,2667
3520SA-4	7069190,1	457770,89	3522,605	13,2618	39,1239	140,0867	-0,4247
3520SA-5	7069208,2	457743,68	3522,647	32,7196	71,8435	146,2585	0,0023
3520SA-6	7069226,5	457726,97	3523,079	24,7319	96,5754	132,5187	0,0237
3520SA-6.1	7069244,1	457722,93	3521,985	18,1377	114,7131	102,9102	-0,0619
3520SA-7	7069249,9	457721,21	3522,451	6,0031	120,7162	106,6516	0,0811
3520SA-8	7069263,9	457719,41	3523,034	14,1839	134,9001	97,3010	0,0415
3520SA-9	7069278	457720,35	3519,28	14,6533	149,5534	86,1908	0,2596
3520SA-10	7069287,3	457717,43	3522,675	10,2733	159,8266	107,5454	0,3519
TOTAL				159,8266			

Tabla 3. Generación del Survey del sondaje en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.

BHID	FROM	TO	LITO	BHID	FROM	TO	ALTE
3520SA	0	25,862148	PORF_ESM	3520SA	0	25,862148	BT-ARC-QTZ
3520SA	25,862148	30,8621	PORF_ESM	3520SA	25,862148	30,8621	BT-ARC-QTZ
3520SA	30,8621	39,123949	Msed	3520SA	30,8621	39,123949	META_R
3520SA	39,123949	71,843535	Msed	3520SA	39,123949	71,843535	BT-ARC-QTZ
3520SA	71,843535	96,57539	Msed	3520SA	71,843535	96,57539	BT-ARC-QTZ
3520SA	96,57539	114,71307	Msed	3520SA	96,57539	114,71307	META_R
3520SA	114,71307	120,71616	Msed	3520SA	114,71307	120,71616	SILIC
3520SA	120,71616	134,90005	Msed	3520SA	120,71616	134,90005	SILIC
3520SA	134,90005	149,55337	Msed	3520SA	134,90005	149,55337	META_R
3520SA	149,55337	159,82664	Msed	3520SA	149,55337	159,82664	META_R

Tabla 4. Incorporación de los datos de litología y alteración en la codificación de los mapeos geológicos de bancos.

- Base de datos: Es unificada e incluye información de sondajes; mapeo pozos de tiro y mapeo de bancos. Esta base de datos única debe tener codificada cada uno de sus parámetros, por lo tanto, no debe tener distintos nombres a la misma litología, alteración y zona mineral.

1.5 Ubicación y Accesos

La mina San Antonio se ubica en la comuna Diego de Almagro, Región de Atacama a 8 km al SE del ex campamento minero Potrerillos (Figura 4). Para acceder desde Santiago puede ser vía terrestre a través de la Ruta 5 Norte durante 800 km hasta la ciudad de Copiapó, luego se debe acceder a la ruta C - 17 por 150 km hacia la localidad de Diego de Almagro para continuar en dirección al este a través de la Ruta C - 13 y C - 163 por 70 Km hasta finalmente llegar al Distrito San Antonio. También se puede acceder vía aérea desde Santiago hacia el Aeropuerto Desierto de Atacama ubicado a 55 km al NE de Copiapó, desde el aeropuerto se debe tomar la Ruta 5 Norte en dirección al sur durante 55 km hasta Copiapó para luego seguir la ruta establecida anteriormente. Finalmente, desde la ciudad El Salvador se debe tomar la Ruta C - 183 durante 3 km hacia el cruce con la ruta C - 13 para seguir durante 40 km hasta el Distrito San Antonio.

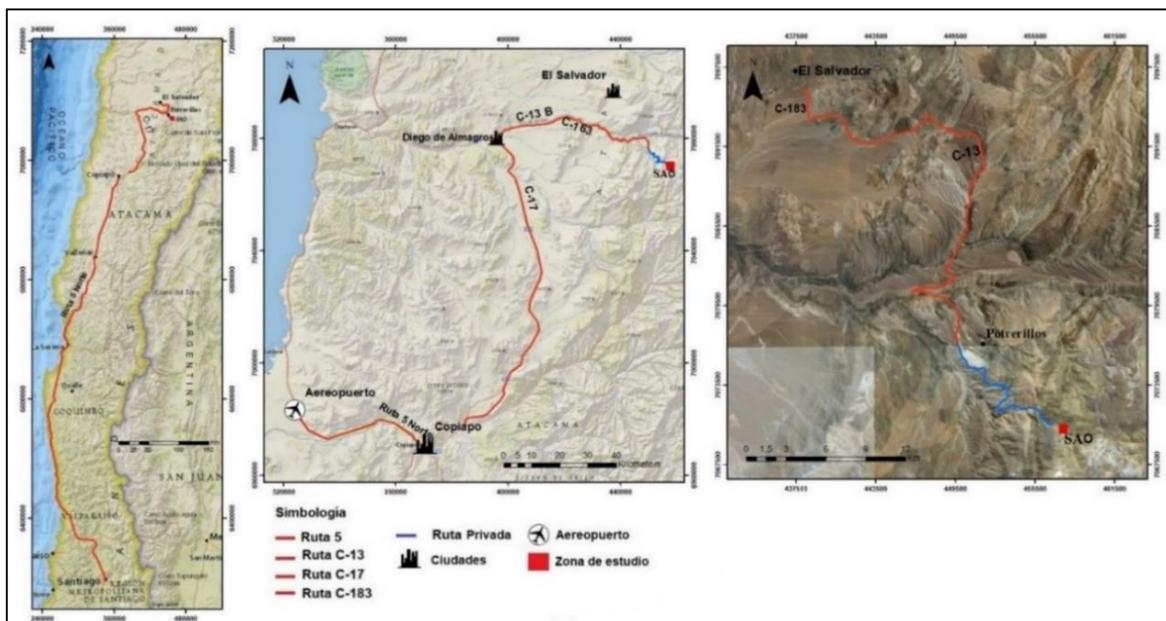


Figura 4. Ubicación y accesos Mina San Antonio.

1.6 Clima

La Dirección Meteorológica de Chile ha realizado una clasificación de los tipos de clima de la región de Atacama (Figura 5A) basada en Köeppen (1948). El clima de tipo Bw (desértico) predomina en la región de Atacama con prácticamente un 81% de la superficie regional, mientras la superficie restante responde a una tipología de tundra de alta montaña (EB). Mina San Antonio se caracteriza por la presencia de vientos Alisios o del Este con precipitaciones estivales de manera decreciente de norte a sur (Miller 1976, Garreaud et al, 2003). Existen marcadas diferencias de temperatura entre el día y la noche y también entre las estaciones de invierno y verano al igual que las precipitaciones (Figura 5B). La temperatura media anual varía entre 15 - 17°C, con máximas de 38°C y mínimas de -1 a -2°C. La distribución de las precipitaciones depende en gran medida de la altitud y distancia a la costa y por lo general no superan los 100 mm/año.

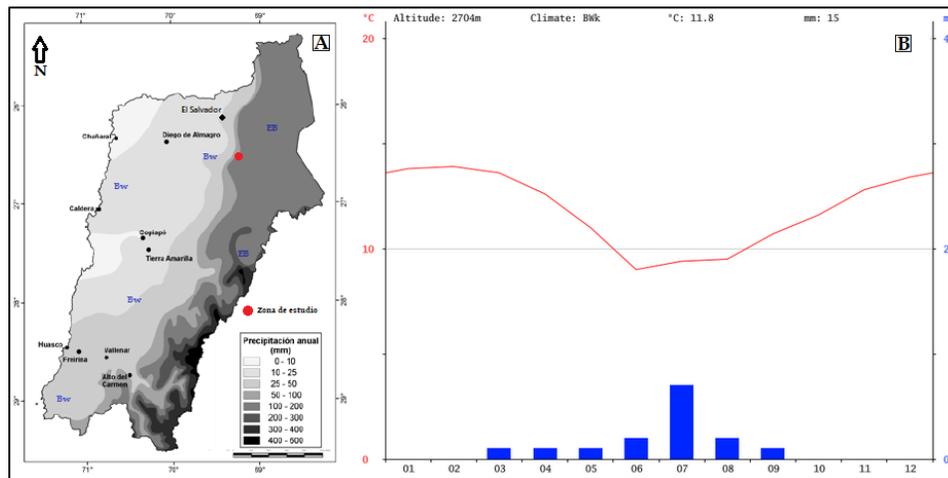


Figura 5. (A) Tipos climáticos en la Región de Atacama según Köeppen (1948) con su precipitación anual. (B) Clinograma de la Región de Atacama. Barras verticales representan precipitación (mm) y la curva roja, la temperatura (°C). Modificado de Julia et al, (2008).

1.7 Geomorfología

A nivel regional se identifican 5 unidades morfoestructurales con orientación NS (Cordillera de la Costa, Valle Central, Precordillera, Depresión Pre andina y la Cordillera Principal (Figura 6). Mina San Antonio, se caracteriza por la unidad morfológica correspondiente a la precordillera a través de cordones longitudinales NS. En las redes de drenaje (Figura 7), predomina un sistema de drenaje tipo dendrítico, típico de morfologías de alta pendiente mayor a 35°, con afluentes de tendencia paralela al cauce principal y ángulos de intersección hasta 60°, influenciados por las litologías

sedimentarias, sin control estructural. También se presentan patrones enrejados paralelos al rumbo de las rocas sedimentarias y volcánicas, plegadas y disectadas, las cuales presentan variaciones litológicas importantes (rocas blandas o arcillosas y rocas duras o areniscas). Finalmente se identifica el patrón anular, formado por desniveles circulares producto de la subsidencia del terreno en la mina generado por el método de explotación subterránea (block - caving) durante 1926 - 1959.

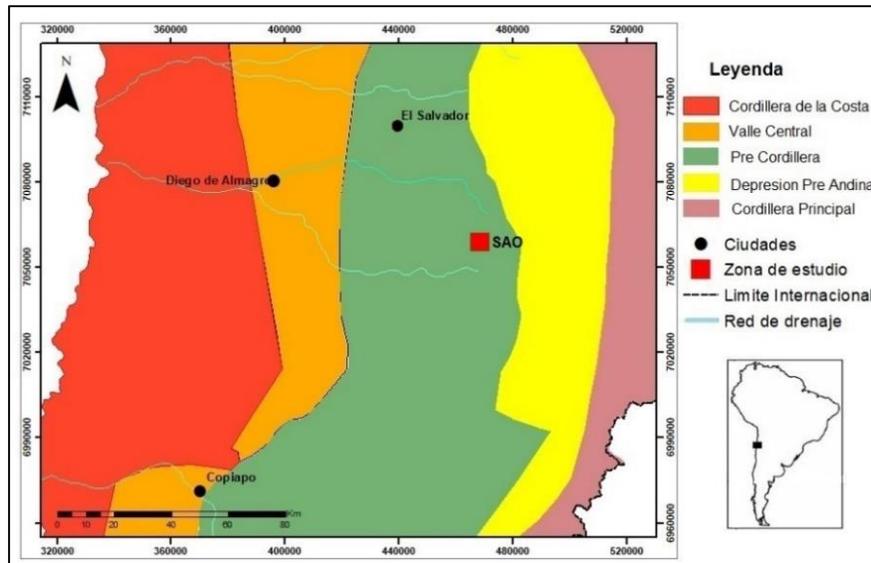


Figura 6. Mapa con unidades geomorfológicas de la región de Atacama.

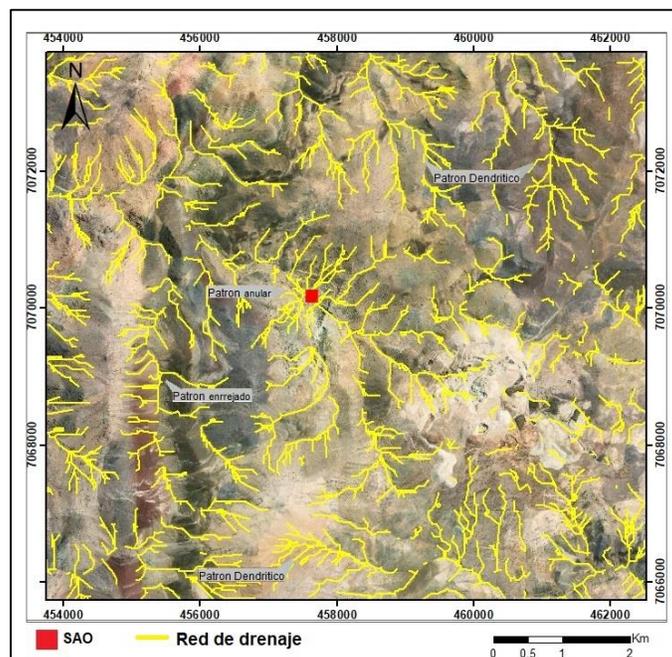


Figura 7. Redes de drenaje.

1.8 Trabajos Anteriores

Olson (1989) realizó una investigación sobre la estratigrafía y configuración estructural del pórfido Potrerillos. Concluyó que las velocidades de convergencia entre la placa de Nazca y Sudamericana, señalan que el volcanismo bimodal Paleoceno tuvo lugar en un periodo de baja velocidad de convergencia, después, la intrusión de los pórfidos con velocidades de convergencia crecientes, pero fluctuantes, mientras que la etapa de deformación compresiva coincide con un periodo de elevada velocidad de convergencia de placas.

Tomlinson, et al. (2003) publicó para el SERNAGEOMIN una carta geológica a escala 1:100.000 en la cual realiza una descripción general de las unidades geológicas de la zona. Su resultado define unidades ígneas, metamórficas y sedimentarias, además de sus recursos geológicos y geología estructural.

SAMSA (2008), realizó un servicio de levantamiento geológico, muestreo, topografía, dibujo y data room de la mina San Antonio. Sus resultados consisten en la agrupación de 5 tipos de litologías, 3 tipos de alteraciones, 8 grupos de mineralización y controles estructurales.

Niemeyer y Munizaga (2008) realizaron una investigación sobre el control estructural del emplazamiento del pórfido Potrerillos. Concluyeron que el control estructural del emplazamiento del pórfido se debe al efecto de la transpresión que afectó a toda la región de Potrerillos.

Codelco, DSAL (2011) realizó una estimación de los recursos geológicos “óxidos”, contenidos en los cuerpos mineralizados del área de San Antonio Óxidos, expresados en un modelo de bloques. Identifican que el recurso geológico total de cobre, para una ley de corte de 0% CuT, corresponde a 451,562 KT con una ley media de 0,35% de CuT y de 0,19% de CuS.

Codelco, DSAL (2011), realizó un modelamiento geológico de las variables zona mineral y litología, para la zona de óxidos, Proyecto San Antonio. Los resultados de los modelamientos comprenden a modelos de sólidos 3D extruidos para litología, zona mineral referida a la alteración supérgena y un modelo tridimensional de la superficie del piso de óxidos.

Consultores de Recursos Minerales (2011) realizó un modelo de recursos geológicos para el Proyecto San Antonio. Sus resultados indican que el recurso de la zona de óxidos incluye una estimación de CuT, CuS y Consumo de Ácido Analítico sobre un piso de Óxidos. El recurso de la zona de Sulfuros incluye la estimación de CuT y CuS en Mixtos y Sulfuros Secundarios y la estimación de CuT, Oro, Plata y Arsénico en Sulfuros Primarios.

Investigaciones Mineras y Geológicas LTDA (2012) realizó estimaciones y modelamiento geológico de recursos CuT de sulfuros y un modelo integrado de estimación CuT para Óxidos - Sulfuros. Para el Proyecto San Antonio. Establecieron que el yacimiento posee un recurso total de Cu sulfurado de 1.844.583 Mt @ 0,343%, donde el aporte de metal fino es de 6.336.144 Mt. Los recursos estimados tienen la categoría de inferidos.

Codelco, DSAL (2012) realizó un modelo geotécnico 3D y estimación de modelo de bloques geotécnico 3D línea de óxidos, en el Proyecto San Antonio. Su resultado fue un modelo que cuenta con criterios geológicos y geotécnicos que establecen categorías de la calidad geotécnica de según su zona litológica, alteración y zona mineral.

Investigaciones Mineras y Geológicas LTDA (2013) realizó un modelamiento geológico y estimación de recursos CuT% de la cavidad In Situ del Proyecto San Antonio. Como resultado, el modelo estimado muestra un total de 532.386.730 ton @0,711% CuT.

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLOGÍCO

2.1 Marco Geológico Regional

Las unidades geológicas regionales, han sido extraídas de la Hoja Potrerillos del SERNAGEOMIN (Tomlinson et al, 2003) (Figura 8 y Figura 9).

Batolito Pedernales (Pérmico; 300 - 260 Ma) (Cornejo et al., 1993): Complejo intrusivo multiplutónico, con edades K - Ar comprendidas entre 298 y 261 Ma (Cornejo et al., 1993), se extiende al suroeste del Salar de Pedernales. Formado por rocas calcoalcalinas, agrupadas en nueve facies, que en su conjunto representan una distribución concéntrica, con un grupo marginal de dioritas, granodioritas y granitos de anfíbola y biotita, metaluminosas, Pzgp (1), (2), (3) y (8) (Cornejo et al., 1999) y un núcleo de granitos y granodioritas leucocráticos de grano grueso, Pzgp (4), moderadamente peraluminosos, probablemente producto de magmas dominados por procesos de fusión cortical. Junto a ellos, afloran cuerpos menores de granitos leucocráticos y gráficos Pzgp (5), (6) y (7) y facies tardías subvolcánicas de pórfidos graníticos y riolíticos, Pzgp (9), que intruyen a la Formación La Tabla. Se identifica un cuerpo intrusivo de granitos y granodioritas leucocráticas de grano grueso (Pzgp 4) que son rocas de color gris rosado (66 - 73% SiO₂), que constituyen el núcleo del batolito con mega cristales de feldespato potásico, plagioclasa sódica, biotita y anfíbola subordinada y con facies de borde con xenolitos pelíticos parcialmente asimilados y numerosos diques riolíticos. Los valores disponibles de 283±7 Ma, biotita y 261±6 Ma, muscovita, indican una edad Pérmica.

Batolito Sierra Castillo (Pérmico; 280 - 250 Ma) (Cornejo et al., 1993): Se extiende desde Sierra de Doña Inés Chica, al norte, hasta Quebrada El Jardín por el sur. Presenta la forma de un bloque triangular de 45 km de largo, limitado al oeste por la Falla Sierra Castillo y al este, por la Falla Barrancas. El batolito incluye un grupo de rocas básicas a intermedias con dioritas, tonalitas y granodioritas de hornblenda y biotita (Pzgc 1, 2, 3) de afinidad calcoalcalina, meta - aluminosa que constituyen cerca 80% del volumen expuesto del batolito. Otro conjunto de monzogranitos y sienogranitos de biotita y hornblenda (Pzgc4) forma el núcleo del batolito. Facies de menos distribución ubicados en el sector noroccidental del batolito está formado por granitos de marcado carácter hipersilíceo - peraluminoso (Pzgc 5 y 6) (Cornejo et al., 1999). Pórfidos e intrusivos

menores graníticos y granodioríticos se encuentran diferenciados como Pzgc 7 y 8, así como una franja de rocas foliadas de protolitos graníticos, que afloran a lo largo de la traza de la falla Sierra Castillo (Pzgc 9). En el extremo norte del batolito existe un plutón en Sierra de Doña Inés Chica (Pzgc 10) de granodioritas y monzogranitos con muscovita de carácter peraluminoso. Las edades K - Ar disponibles en el batolito indican un rango 280 - 255 Ma (Pérmico; Cornejo et al., 1993). Las sub unidades corresponden a 3 cuerpos intrusivos de:

- Dioritas de hornblenda y piroxeno (Pzgp 1): Franja de rocas melanocráticas de grano medio (52 - 58% SiO₂) y foliación moderada ubicada en el margen occidental de las tonalitas foliadas. Se obtuvo una edad K - Ar hornblenda de 192±7 Ma, que representan probablemente un evento termal en las dioritas, asociado a la intrusión de cuerpos Dioríticos menores a lo largo de la Falla Sierra Castillo, durante el Jurásico inferior.
- Tonalitas y granodioritas foliadas (Pzgp 2): Rocas de grano grueso a muy grueso (57 - 69% SiO₂) con abundante plagioclasa tabular, hornblenda y biotita orientados que definen una foliación magmática y con rasgos de deformación frágil sobreimpuestos, con bandas de micas y anfífolas crenuladas. En esta unidad se cuenta con tres edades K - Ar en biotita con valores de 269±8; 262±8 y 254±8 Ma (Cornejo et al., 1993).
- Granitos con Muscovita (Pzgp 6): Rocas de color blanco o levemente gris verdoso, de grano medio (74 - 78% SiO₂) y variedades pegmatíticas. Forman una franja en el margen occidental de la Sierra Castillos. (Edades K - Ar en muscovita 281±6 Ma y 264±6 Ma).
- Microgranitos rosados (Pzgp 8): Stocks pequeños tabulares y diques de granitos de grano fino (77 - 78% SiO₂) o pórfidos rojizos, emplazados preferentemente en tonalitas foliadas, Pzgc (2) y granodioritas, Pzgc (3), del núcleo de la Sierra Castillo.

Formación Montandón (Pliensbachiano - Bajociano medio) (Harrington, 1961): Secuencia de calizas y calcilutitas fosilíferas en parte bituminosas, finamente laminadas, de color gris a gris oscuro. Al interior de la Quebrada Asientos alcanza espesor máximo de 1.250 m. En Quebrada Asientos, la formación se apoya, a través de un conglomerado transgresivo, sobre granitoides pérmicos e infrayace a la Formación Asientos. Esta Formación se dispone en concordancia sobre cuarcitas y felsarenitas de la Formación Quebrada del Salitre con fauna del Sinemuriano. Las facies de calcilutitas negras y grises finamente laminadas y con material bituminoso, características de

los niveles del Pliensbachiano superior - Toarciense de esta formación, representan acumulación en un ambiente anóxico bajo el tren de olas (Olson, 1983).

Formación Asientos (Bajociano - Caloviano) (Harrington, 1961): Alternancia de calizas fosilíferas de color gris claro a gris verdoso y areniscas volcanoclásticas verdes, con intercalaciones de lavas basálticas, cuyos afloramientos se distribuyen de igual forma que la formación Montandón, sobre la cual se apoya concordantemente. Sus espesores varían entre 300 - 700 m y al norte de Quebrada Asientos presentan extensos sills andesítico - basálticos. En la localidad de Quebrada Asientos, la formación incluye potentes bancos de calizas fosilíferas, alternados con areniscas calcáreas y volcarenitas verdosas, con fauna fósil (*Macrocephalites* sp; *dolikephalites* sp., *Reineckeia* sp.,) del Caloviano (Müller y Perelló 1982). Los niveles superiores de la formación, en la zona central (Rio de la Sal y Mina Potrerillos) consisten mayoritariamente en calizas, calcarenitas, lutitas calcáreas y lutitas de color gris a pardo amarillento, con intercalaciones locales de lavas andesíticas y basálticas vesiculares. En la zona de la mina Potrerillos estas intercalaciones de lavas se hacen más frecuentes hacia el techo de la unidad, observándose un contacto transicional con la unidad volcánica sobreyacente (Estratos Quebrada de Vicuña).

Estratos de Quebrada Vicuña (Caloviano - Titoniano) (Cornejo et al., 1993): Secuencia de hasta 650 m de espesor de lavas y sills andesíticos basálticos vesiculares, con intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas hacia el techo. En el sector de Quebrada Asientos - Rio de la Sal, la secuencia de lavas aflora en los núcleos de los sinclinales de Guanaco Muerto y Rio de la Sal (Ver Perfil Geológico, Anexo 2). Esta unidad se acuña hacia el este. Las lavas corresponden principalmente a andesitas y andesitas basálticas vesiculares (53 - 59% SiO₂). La superficie rugosa y oxidada de las lavas y la presencia en el techo de las coladas de material detrítico volcánico y fragmentos mal conservados de materia fosilífero marino, cementados con carbonatos, indica que estas se depositaron en un ambiente subacuático.

Formación Pedernales (Titoniano - Valanginiano) (Harrington, 1961): Alternancia de calizas y areniscas calcáreas fosilíferas con intercalaciones de areniscas volcanogénicas de color verde, con espesor variable entre 50 - 450 m. En la zona suroccidental del mapa (Sector inferior de Quebrada Asientos y mina Potrerillos), la Formación Pedernales sobreyace a los niveles volcánicos de los

Estratos de Quebrada Vicuña, y está cubierta, al suroeste de mina Potrerillos por areniscas rojas de la Formación Quebrada Monardes. Las calizas y areniscas calcáreas son de color de meteorización amarillo ocre y corresponden principalmente a calcarenitas y calciruditas portadoras de fauna trigonias y ammonites del Titoniano superior - Berriasiano (Marticorena y Tapia 1981).

Domo Riolítico de Potrerillos (51 - 52 Ma) (Tomlinson, 2003): Voluminoso cuerpo de riolitas fluidales, de sección circular de 4 km de diámetro, ubicado al sureste de la ciudad de Potrerillos. Incluye una sección basal de brechas que representa la fase explosiva inicial con flujos piroclásticos que incluyen bloques del sustrato sedimentario y volcánico y fragmentos riolíticos juveniles. Al norte y sur del cuerpo macizo de riolitas, se encuentran flujos de lavas riolíticas correspondientes a facies de outflow, como también diques silíceos. Edades (K - Ar, roca total) entre 51±52 Ma obtenidas tanto en rocas del domo como en los flujos riolíticos proximales, tienen carácter de valores mínimos en consideración a las facies de outflow que subyacen a intercalaciones de ignimbritas de 57±55 Ma (Cornejo et al., 1993).

Estratos de Cerro Valiente (63 - 55 Ma) (Cornejo et al., 1993): Productos de actividad volcánica explosiva del Paleoceno (63 - 55 Ma) que dio lugar a la formación de calderas de colapso y complejos de domos riolíticos (Cornejo et al., 1997). Esta unidad presenta una sucesión estratigráfica que incluye de base a techo, tres unidades de carácter volcánico de lavas y brechas andesíticas; ignimbritas y flujos riolíticos macizos y lavas traquiandesíticas rojas.

Gravas de Atacama (Mioceno medio) (Mortimer, 1973): Depósitos semiconsolidados hasta de 250 m de espesor compuestos de gravas polimicticas y arenas de color gris a pardo claro - amarillento, con regular selección de tamaño y redondeamiento, matriz o clasto soportados. Se encuentran principalmente en el sector occidental y central de la hoja y representan la sedimentación aluvial y fluvial de los sistemas de drenajes antiguos activos durante el Mioceno. Además, contiene intercalaciones de ignimbritas soldadas, con edades, K - Ar en biotita, de 15,3±1,5 y 12,7±0,5 Ma (Cornejo et al., 1993).

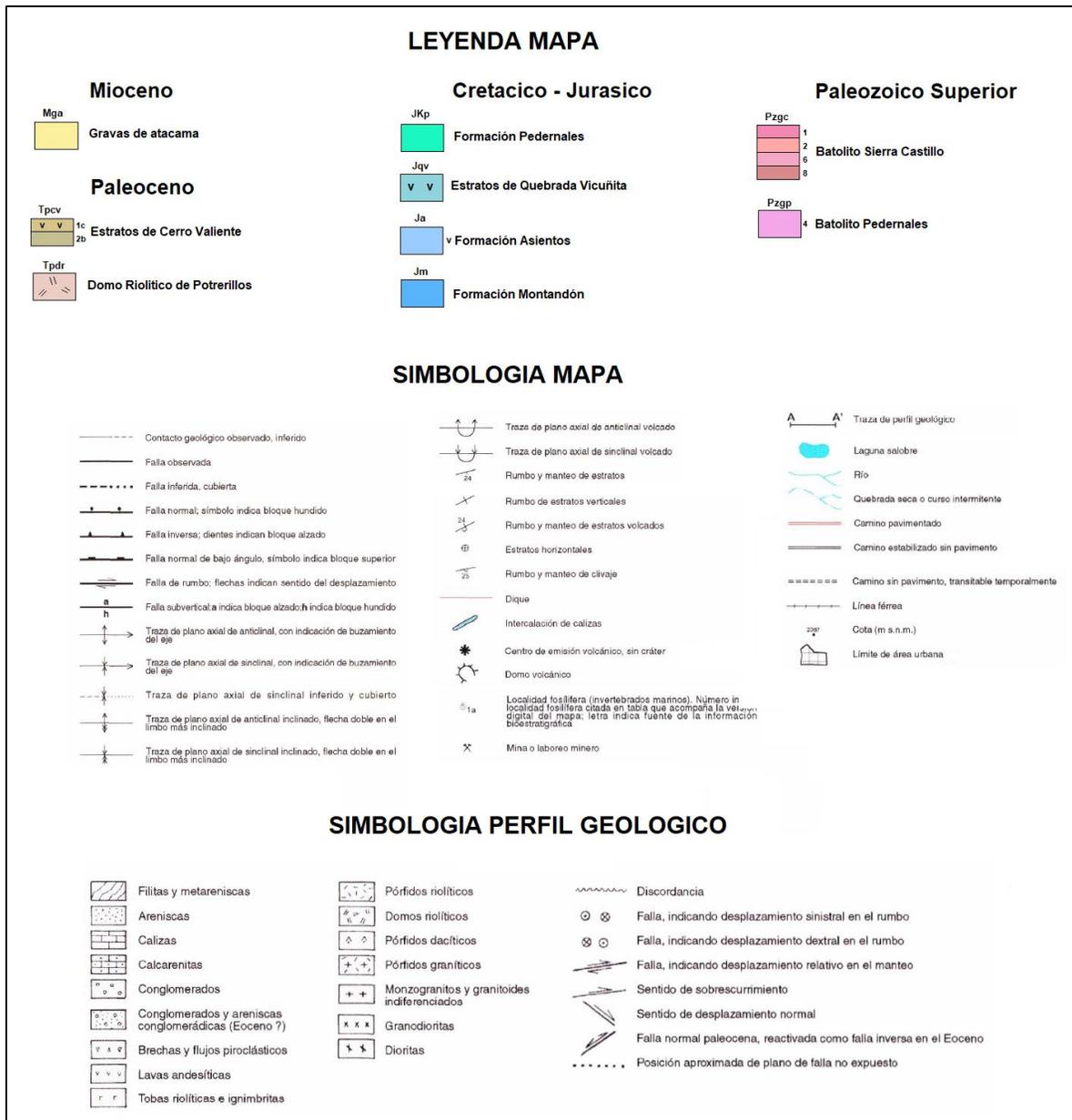


Figura 9. Leyenda y simbología de Mapa y Perfil Geológico, Hoja Potrerillos.

2.2 Marco Geológico Distrital

2.2.1 Litología

En Mina San Antonio afloran mayoritariamente rocas estratificadas pertenecientes a la Formación Asientos (Jurásica) y la Formación Pedernales (Cretácica), las cuales están intruidas por el Complejo de pórfidos de Cobre generando alteraciones producto del metamorfismo de contacto, fluidos hidrotermales y acción supérgena (Figura 10).

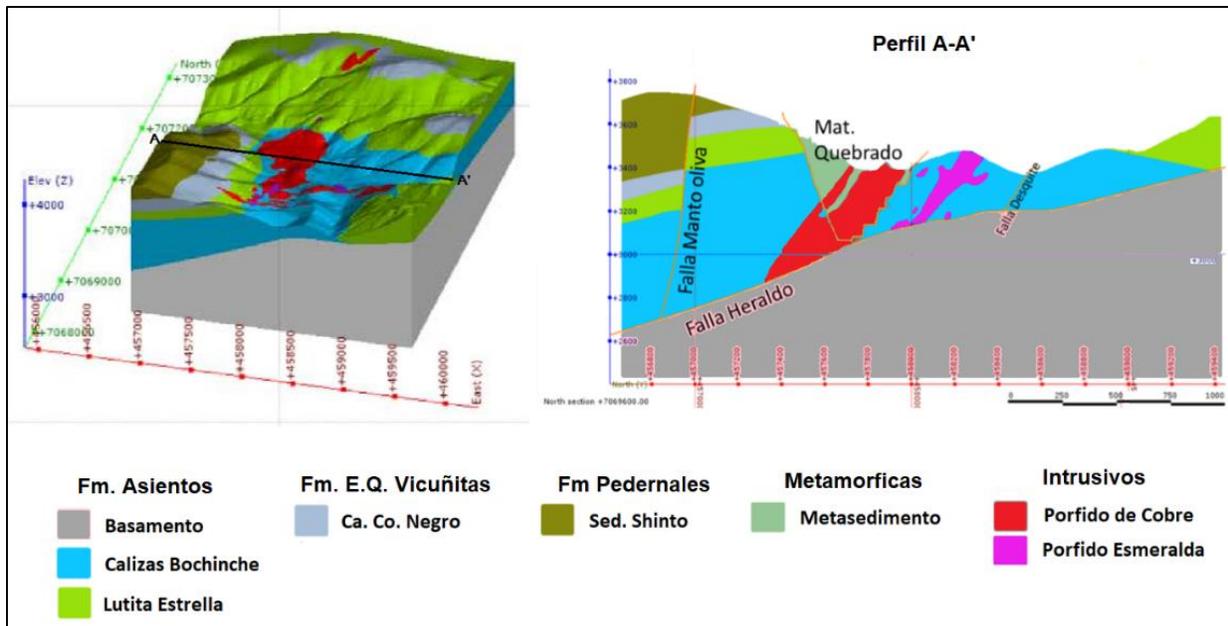


Figura 10. Modelo y perfil geológico de las unidades litológicas, Mina San Antonio. PSAI (2016).

2.2.1.1 Rocas Estratificadas

Formación Asientos: Compuesta por areniscas calcáreas, calcarenitas, calcilutitas y calizas, con intercalaciones de rocas volcánicas de edad Bajociano media a Caloviano, se encuentra plegada y sobreescurrada con vergencia al este. La Formación Asientos muestra una disposición homoclinal normal con manteo al oeste entre 20 a 30°. Infrayace concordantemente a la unidad Estratos de Vicuña. Es intruida por el Complejo Pórfidos de Cobre, desarrollándose una zona de metamorfismo de contacto con rocas córneas de clorita - epidota - actinolita con un halo de 300 m, donde se observa descalcificación de la roca de caja, especialmente en la zona centro oriental de la mina. Además, se ha identificado el desarrollo de una zona perimetral a la anterior donde existe influencia del metamorfismo, evidenciado por recristalización de carbonato y texturas clásticas relictas (Müller y Perelló 1982).

Estratos Quebrada Vicuña: Secuencia cercana a los 650 m de espesor de lavas y sills andesíticos basálticos vesiculares con intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas hacia el techo. Esta unidad se acuña hacia el este. Las lavas corresponden a andesitas y andesitas basálticas vesiculares (53 - 59% SiO₂). La superficie rugosa y oxidada de las lavas y la presencia en el techo de las coladas de material detrítico volcánico y fragmentos mal conservados de materia fosilífero

marino, cementados con carbonatos, indica que estas se depositaron en un ambiente subacuático (Cornejo et al., 1999).

Formación Pedernales: Secuencia de rocas sedimentarias clásticas, clásticas calcáreas y calcáreas de plataforma somera, formada por estratos rítmicos de 0,2 - 2 m de potencia de calizas fosilíferas, intercaladas con areniscas calcáreas de grano fino a medio y con areniscas de grano medio volcánicas. Esta secuencia se apoya en concordancia sobre la Formación Asientos y mantiene una actitud monoclinial de rumbo Norte - Sur a Norte Noroeste con inclinación variable entre 10 - 20° al Oeste, similar a la de la Formación Asientos sobre la cual se apoya (Marticorena y Tapia, 1981).

2.2.1.2 Rocas Intrusivas

Cuerpos intrusivos y brechas. Los intrusivos corresponden a un complejo de Pórfidos Cupríferos con orientación NS con manteo desde 60° W controlados por la Falla Heraldo. Este complejo está compuesto por los pórfidos Esmeralda, Secreto y Cobre. La intrusión de este sistema de pórfidos generó un metamorfismo de contacto y un depósito tipo Skarn de granate y Skarn retrogrado. Presenta una alteración potásica en su núcleo norte, mientras hacia el sur - este se sobreimpone una alteración fílica seguido de la alteración argílica. También se caracteriza por la presencia de un abundante stockwork de vetillas tipo A, B y D. El Complejo Pórfido Cobre ha sido datado como Eoceno medio a Oligoceno inferior con una edad estimada en 35 Ma (40Ar / 39Ar en hornblenda) (Marsh et al., 1995). Dentro de esta unidad también se reconocen restringidos cuerpos de brechas ígneas de orientación norte sur y subordinados a su lado oeste.

Pórfido de Cobre: Roca intrusiva de composición granodiorítica a monzodiorítica con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa de 1 - 2 mm de diámetro en una masa fundamental afanítica. Aflora en la zona central del área de estudio como un cuerpo elongado N - S y en la zona centro oriental como una faja elongada en sentido NE-SW, controlado por la falla Heraldo. El Pórfido Cobre intruye a las rocas estratificadas generando un metamorfismo de contacto y un depósito tipo Skarn de granate y skarn retrogrado de clorita - epidota - actinolita. Dentro de esta unidad se reconocen cuerpos de brechas ígneas de orientación norte sur y subordinados a su lado oeste. Se identifican stockwork de vetillas tipo A, B y D, mineralización tipo calcopirita - pirita,

calcopirita - bornita, pirita - enargita - tenantita y escasos niveles de enriquecimiento secundario con calcosina - covelina (Castillo, 2013).

Pórfido Esmeralda: De textura porfídica y composición riódacítica. Aflora en el sector sur del área de estudio con una orientación ENE e intruye a las unidades estratificadas del jurásico y el Pórfido Cobre. Presenta una alteración cuarzo sericítica moderada a débil y escasa mineralización de sulfuros de cobre, esencialmente calcopirita - pirita. Esta unidad muestra un stockwork de baja intensidad compuesto principalmente por vetillas tipo D (Castillo, 2013).

Pórfido Secreto: De textura porfídica de grano fino de carácter dacítico. Aflora en el sector centro sur del área de estudio y muestra una elongación en sentido NE según un arreglo estructural menor de igual dirección. Intruye a rocas de la Formación Asientos, Pórfido Esmeralda y Pórfido Cobre. Presenta una alteración cuarzo sericítica moderada y es considerada una unidad estéril dado su casi nulo contenido de sulfuros de cobre (Castillo, 2013).

Brechas: Existen cuatro tipos de brechas hidrotermales (brecha matriz especularita, brecha matriz clorita - epidota, brecha clastos metasedimentos y brecha polimicticas con predominio de clastos de pórfido) de acuerdo a la composición de sus clastos, matriz y posición espacial. Sus características mineralógicas y texturales permiten interpretar un origen relacionado y muy cercano al final de la intrusión del Pórfido Cobre durante la etapa freatomagmática explosiva con aporte y actividad de fluidos a alta presión (Bobenrieth y Zamora, 2008).

2.2.1.3 Rocas Metamórficas

Relacionadas a la intrusión del Complejo Pórfido que genera una aureola de metamorfismo de contacto de distintos grados y skarn retrogrado de granate - actinolita - epidota. Esta zona metamórfica se distribuye como una aureola de 300 m de longitud desde el contacto entre el intrusivo y su roca de caja hacia el este. Las unidades en esta zona son el pórfido Cobre, que es el que genera el efecto termal y metasomático y por volcanitas y sedimentitas marinas de la Formación Asientos (Bobenrieth y Zamora, 2008).

Metasedimento: Asociada a la Formación Asientos indiferenciada afectada por metamorfismo de contacto de exoskarn distal retrograda de grado leve a moderado de textura fina. Se observan las texturas y estructuras sedimentarias de granos y estratos de las sedimentitas calcáreas originales. Formado por calcarenitas finas a gruesas, areniscas calcáreas fosilíferas, areniscas finas a gruesas, areniscas volcánicas, calcilutitas, lutitas, calizas arcillosas y margas obliterados por la alteración metamórfica de exoskarn distal retrograda de carácter leve a moderado consistente en una mezcla de actinolita, clorita y epidota (Bobenieth y Zamora, 2008).

Hornfels: Asociada a la Formación Asientos y afectada por metamorfismo de contacto de exoskarn distal retrograda de grado moderado a fuerte de textura fina. Se observan difusamente las texturas y estructuras sedimentarias de granos y estratos de las sedimentitas calcáreas originales las cuales han sido obliteradas por la re - cristalización metamórfica. Presenta texturas finas microgranular a afaníticas y se pueden distinguir dos facies metamórficas, una más cercana al contacto con el pórfido consistente en la asociación actinolita, epidota, clorita con biotita y magnetita y la otra más distal con la asociación de actinolita, clorita, epidota con calcita (Bobenieth y Zamora, 2008).

Skarn: Asociada a la Formación Asientos afectada por metamorfismo de contacto de exoskarn de progrado moderado a fuerte de textura fina a gruesa. Formada por un agregado fino a grueso de color pardo claro a gris verdoso claro de actinolita, clorita, epidota, calcita, piroxeno (diopsidos y hedenbergitas) granates (pardos y verdes tipo grosularias y andraditas) y magnetita, producto de la re - cristalización de areniscas calcárea, calizas, calizas fosilíferas, coquinas, calizas arcillosas y margas. Esta unidad posterior al metamorfismo de contacto de progrado fue afectada por metamorfismo de contacto retrógrado generando la digestión de la unidad de Hornfels sobre la unidad de Skarn, quedando pequeñas islas irregulares de Skarn rodeadas por la unidad de Hornfels predominando en los alrededores del pórfido (Bobenieth y Zamora, 2008).

2.2.2 Estructuras

En la Mina San Antonio existen tres sistemas de fallas principales (Figura 11) que controlan a lo menos el emplazamiento de los pórfidos, la alteración y mineralización.

- El primer sistema actúa en el control de la mineralización, alteración supérgena y del emplazamiento de Pórfido Cobre y corresponde a un sistema de fallas de rumbo N - S /

verticales a sub - verticales con inclinación preferente al Oeste, con movimientos normales, inversos y de rumbo, pero en profundidad con un comportamiento lístrico inclinándose paulatinamente hacia el Oeste pasando a un régimen de fallas inversas, de bajo ángulo con vergencia al Este. Estas fallas están relacionadas a un sistema de falla inversas, con inclinación al Oeste y vergencia al Este, de carácter regional denominada Falla Heraldo (Tomlinson, 1994).

- El segundo sistema corresponde al de fallas de rumbo Noroeste, Falla San Antonio que posee un rumbo general N30°W / 60 - 70° W.
- El tercer sistema se asocia con el control de la mineralización secundaria y de la alteración y corresponde a un sistema de rumbo Noreste, representado por la Falla Desquite y un tramo de la Falla Manto Oliva, ambas con manteos de 60 - 80° W. Esta falla limita al pórfido por su lado sur. Las rocas estratificadas de la Formación Asientos presentan a ambos costados del Pórfido Cobre una actitud monoclinal de rumbo Norte - Sur con manteo muy persistente de 10 - 20° con un máximo de 40° W (GeoEstima, 2016).

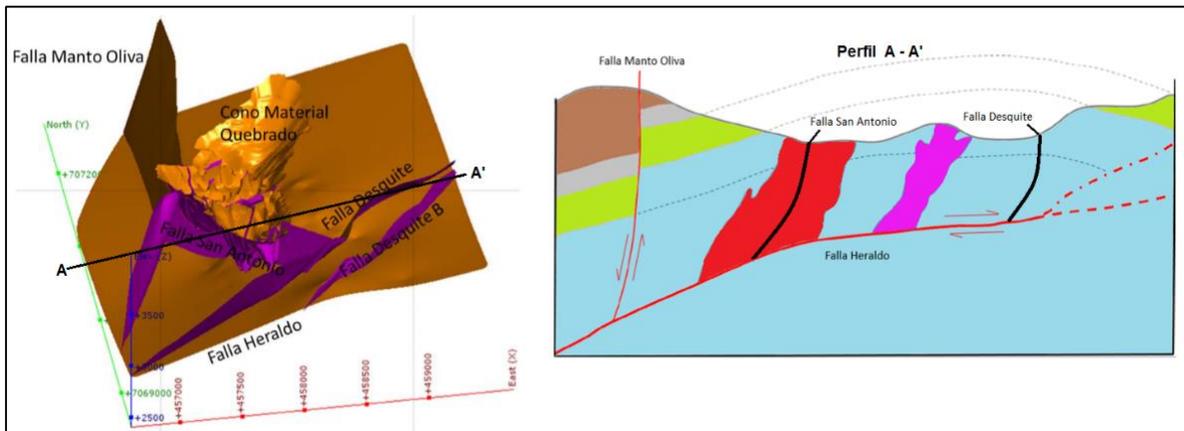


Figura 11. Modelo y perfil geológico estructural, Mina San Antonio. Extraído de PSAI 2016.

2.2.3 Alteración

Corresponden a tres tipos que se suceden en el tiempo (Las dos primeras hipógena y la última es supérgena). La alteración hipógena está controlada principalmente por la litología de las unidades de roca que atraviesa y consecuentemente cada tipo de alteración está relacionada a una o máximo a dos unidades de roca en particular. La alteración supérgena afecta a todas las rocas del área controlada en su intensidad principalmente por la frecuencia de fallas y zonas de fractura (Bobenieth y Zamora, 2008).

- La primera alteración hipógena es producto del metamorfismo de contacto producto de la intrusión del Complejo Pórfido Cobre sobre las unidades estratificadas que se comportan como roca de caja. La segunda alteración hipógena es producto de los fluidos hidrotermales provenientes del Complejo Pórfido Cobre los cuales alteraron y mineralizaron al complejo de pórfidos como a las unidades estratificadas.
- Sobre las asociaciones de minerales de alteración tanto del tipo “Metasomatismo de Contacto” como “Hidrotermal”, se sobreimpone una intensa alteración supérgena representada por los minerales arcillosos y limonita los cuales obliteran total o parcialmente las texturas originales de las rocas.

Rocas metamórficas de contacto

Las unidades de alteración metasomática se ordenan con una geometría irregular en torno al intrusivo con las de mayor grado metamórfico en el centro y las de menor grado hacia la periferia, pero con un mayor desarrollo hacia el costado Este del complejo intrusivo en la Mina San Antonio (Bobenrieth y Zamora, 2008). Estas unidades de alteración metasomática comienzan en su grado bajo de metamorfismo con Calcita, Epidota y Clorita en las zonas más distales, seguido de alteraciones de grado medio de metamorfismo con Actinolita, Magnetita y Biotita en las zonas más cercanas al pórfido y finalmente aumenta su grado de metamorfismo a medio - alto con la aparición de granate en las zonas de contacto con el intrusivo.

Hidrotermalismo

La alteración hidrotermal se ordena con una geometría regular en torno al intrusivo con las de mayor temperatura y más tempranas al centro y de menor temperatura y más tardías hacia la periferia. Existe un núcleo de alteración Potásica, temprana y de alta temperatura, evidenciado por la presencia de Feldespato Potásico y Biotita en la zona central y más profunda del Complejo Pórfido Cobre, el cual hacia afuera del núcleo (siempre dentro del complejo de pórfidos) se torna más Cuarzo - Sericítica en las zonas más periféricas con mayor desarrollo dentro de las facies de grano grueso y dentro de las brechas hidrotermales ubicadas dentro del Complejo Pórfido Cobre. La regularidad de la distribución de las unidades de alteración hidrotermal se ve interrumpida por los efectos de la alteración supérgena representado por Caolín, Limonitas (Jarosita), Alunita y

Montmorillonita, que localmente oblitera los minerales de alteración previos de tipo hidrotermal y/o metasomáticos (Bobenrieth y Zamora, 2008).

Alteración Supérgena

Tiene un gran desarrollo areal afectando prácticamente a todas las unidades de roca y sobre imponiéndose a la mayoría de las unidades de alteraciones tanto metasomáticas como hidrotermales previas. Esta alteración se ha reconocido en las labores subterráneas de la Mina Vieja de Potrerillos hasta los 450 m bajo la superficie. Se caracteriza por la presencia caolín, montmorillonita (esmectita) e illita, “capping” limonítico (hematina, jarosita y goethita) y “capping” silíceo (ópalo y cuarzo) (Bobenrieth y Zamora, 2008).

2.2.4 Mineralización

Las unidades de mineralización corresponden a ocho asociaciones minerales agrupadas según su génesis, donde la primera asociación de minerales es de origen primario (hipógeno), sucedida por siete asociaciones minerales de origen secundario o supérgeno. Así se tiene:

- Mineralización primaria: Concentrada exclusivamente en la Unidad Litológica Pórfido Dacítico Grano Grueso y asociada a la alteración de origen hidrotermal del mismo complejo de pórfido. Las asociaciones de sulfuros primarios corresponden a calcopirita y pirita con proporciones menores de enargita, tenantita, digenita, bornita, molibdenita y blenda, minerales que se encuentran diseminados dentro de la masa fundamental del pórfido o rellenando un enrejado de vetillas de cuarzo tipo “B”.
- Mineralización secundaria: Afecta al Complejo Pórfido Cobre como a los metasedimentos de caja localizados hacia el contacto Este del complejo de pórfidos. La mineralización supérgena dentro del complejo de pórfido está controlada principalmente por estructuras tipo fallas y zonas de falla, y el grado de mineralización depende directamente del aumento de la frecuencia de fracturas y sus sistemas de vetas y vetillas relacionadas. Dentro de los metasedimentos, la mineralización supérgena también está controlada por el aumento de fallas y zonas de falla, además por el grado de alteración metasomática de contacto y por la cercanía al complejo de pórfidos que es la fuente de la mineralización primaria. Los sulfuros secundarios corresponden principalmente a calcosina con proporciones menores de covelina, minerales que se encuentran diseminados dentro de la masa fundamental del pórfido o rellenando vetillas de cuarzo tipo

“B”. Las asociaciones secundarias de acuerdo a Bobenrieth y Zamora (2008) corresponden a i) Óxidos Negros (neotocita, copper wad tenorita, melaconita, copper pitch, crisocola pitch, cuprita, nontronita y pirolusita); ii) Óxidos Verdes (crisocola, malaquita, brocantita, antlerita, chalcantita con proporciones menores de azurita, atacamita, clinoclasa, gerhardita, para - malaquita, olivenita, tenorita, cuprita y cobre nativo); iii) Óxidos Negros y Verdes; iv) Arcillas con Cobre (montmorillonita, esmectita, caolín, con variables porcentajes de cobre en sus estructuras moleculares); v) Limonitas con Cobre (goethita, jarosita y hematina, con variables porcentajes de cobre en sus estructuras moleculares) y vi) Fosfatos (turquesa, Psemaludomalaquita, libethenita, raslegita y sampleita).

2.3 Marco Metalogénico

Mina San Antonio se ubica en la parte central de la Franja Metalogénica cuprífera del Eoceno superior – Oligoceno inferior (Maksaev, 2001) al sur de la Cordillera de los Andes (Figura 12). Se extiende por 1400 km desde el extremo norte del país hasta la localidad de Combarbalá a lo largo de la Cordillera de Domeyko. Esta provincia es la que presenta la mayor variedad de tipos de yacimientos metalíferos y la que contiene los pórfidos cupríferos más grandes conocidos en el mundo (Chuquicamata y Escondida) y otros de menor tamaño pero igual importancia económica (El Salvador, Poterillos, Caserones, Relincho, El Abra, Radomiro Tomic, Gaby, Quebrada Blanca, Collahuasi); incluye, además, chimeneas de brechas con cobre - oro, vetas mesotermales de cobre, depósitos estratoligados y 'stockwork' de cobre, vetas mesotermales de oro, cobre - oro y cobre - plata, vetas epitermales y depósitos estratoligados de metales preciosos. Todos formados en ambientes volcánicos y subvolcánicos (Cornejo et al, 1993).

Esta franja metalogénica, ocupa la parte central de la región en la Cordillera de Domeyko, la cual está constituida por rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, con edades comprendidas entre el Jurásico y el Eoceno (Cornejo et al., 1993). Estas rocas son interpretadas como el producto de la evolución de sucesivos arcos magmáticos y cuencas de tras arco e intraarco. Están distribuidas en una zona de larga vida de facies, cambios de espesor y fallas normales asociadas con acumulaciones de rocas volcánicas Jurásico - Paleoceno al oeste. Esta zona se reactivó posteriormente en el Oligoceno - Mioceno tardío como una zona de fallas inversas. Las rocas del distrito de Potrerillos también registran el cambio del volcanismo de andesita - riolita basáltica en el tiempo del

Paleoceno a la intrusión de pórfido rico en cristales de composición intermedia en el tiempo del Oligoceno del Eoceno.

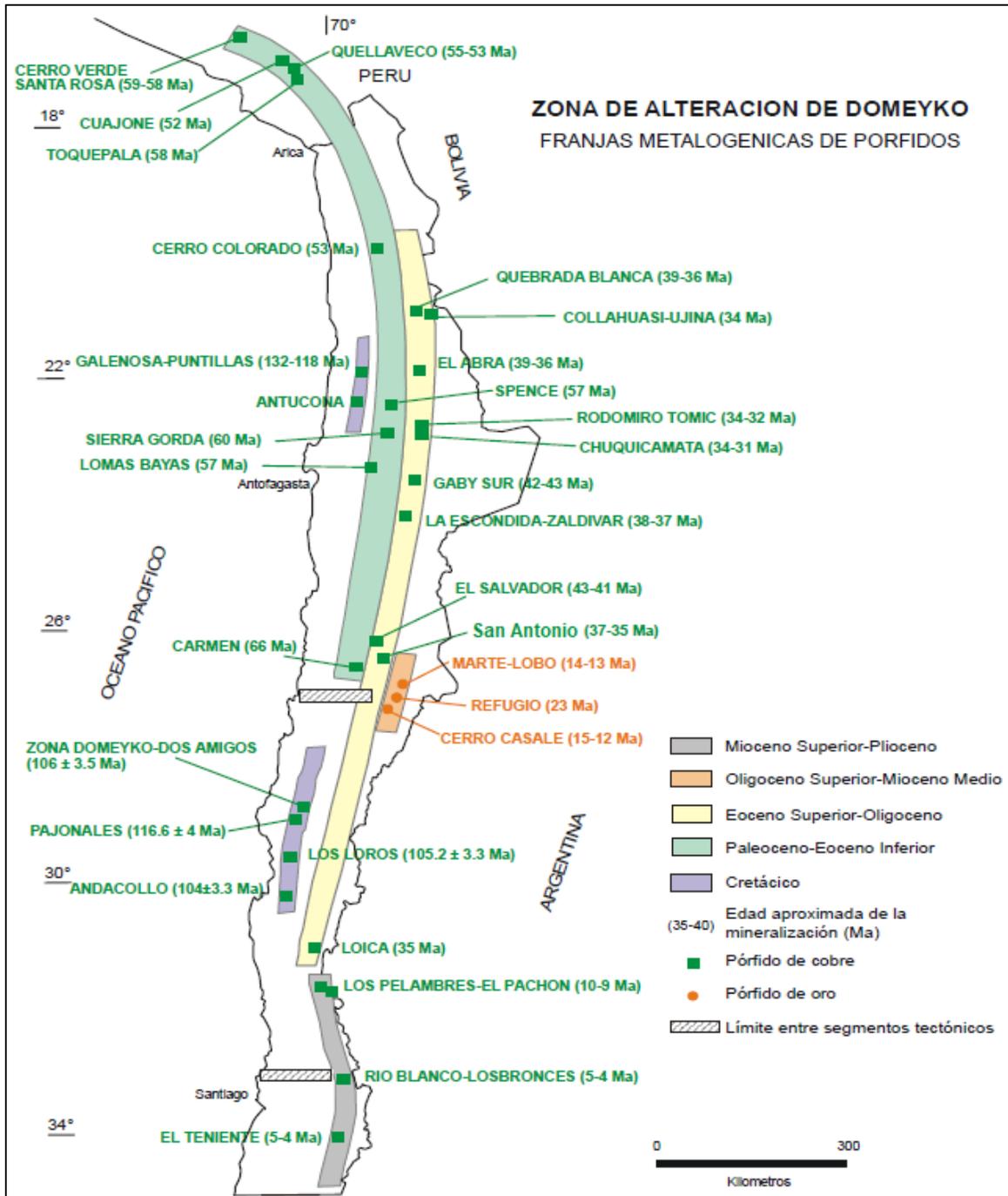


Figura 12. Franjas metalogénicas con sus principales yacimientos y prospectos. Almonacid (2007).

Las principales orientaciones de diques sugieren que el estado de tensión cambió de la extensión aproximada este - oeste en el Paleoceno a N - S a los 32 Ma. Los cambios del volcanismo bimodal del Paleoceno a la intrusión de pórfido Eoceno - Oligoceno y finalmente a la deformación por compresión del Oligoceno - Mioceno coinciden con tasas de convergencias lentas, fluctuantes pero aumentadas y muy aumentadas en el límite de la placa de Nazca - sudamericana. Tanto las fallas inversas de empuje como las de ángulo alto representan una reducción de hasta el 50% en el área de estudio. Este valor probablemente no sea representativo del acortamiento a través de los Andes, pero es más probable que indique una zona de tensión especialmente alta a lo largo del borde occidental del Altiplano (Olson, 1989).

Los yacimientos metalíferos de la Región fueron afectados por procesos de alteración supérgena, entre el Eoceno medio - superior (*ca.* 40Ma) y el Mioceno medio (*ca.* 14 Ma) (Bissig and Riquelme, 2009), representando su mejor desarrollo en los yacimientos de cobre de la Provincia Metalogénica de la Cordillera de Domeyko, donde dio origen a potentes zonas de enriquecimiento secundario y yacimientos exóticos de cobre (Damiana; Munchmeyer, 1996).

CAPÍTULO 3: MARCO TEORICO

3.1 Proceso Hidrometalúrgico

La hidrometalurgia es una disciplina de la metalurgia extractiva, que se ocupa de los métodos y la ciencia de la extracción de metales por medios acuosos también es un campo interdisciplinario que involucra a la geología, química, hidrología, metalurgia extractiva, ingeniería de minas, ingeniería de procesos y economía. Los principales procesos en la planta hidrometalúrgica (chancado, aglomerado/curado, apilamiento y lixiviación) de la División El Salvador (Figura 13) y asociado a esta memoria se explican a continuación. Se explica también los grupos de las arcillas, sus propiedades y formación.

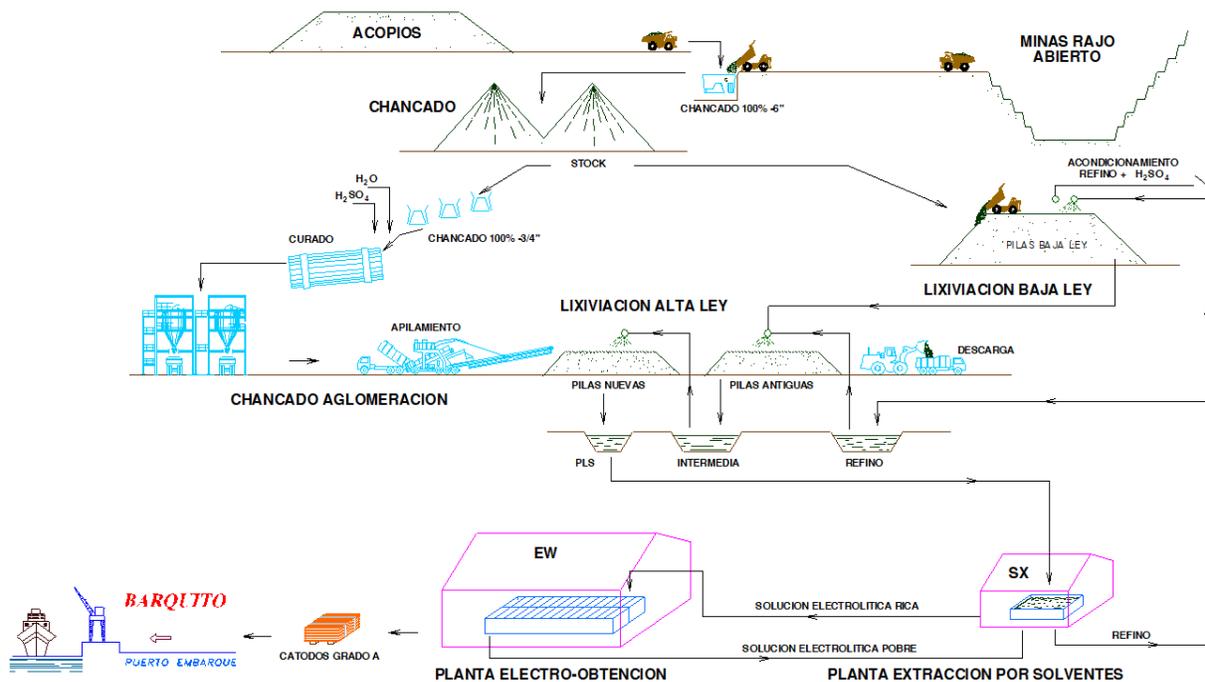


Figura 13. Diagrama de flujo de la planta hidrometalúrgica de División El Salvador. CODELCO (2015).

3.1.1 Chancado

Grupo de operaciones unitarias en el procesamiento de minerales, cuya función es la reducción de grandes trozos de rocas a fragmentos pequeños. La chancadora es la primera etapa de la reducción de tamaños, generalmente trabaja en seco y se realiza en dos o tres etapas que son: chancadora primaria, secundaria y ocasionalmente terciaria. Las chancadoras se diseñan de modo que reduzcan

las rocas, de tal manera que todos los fragmentos sean menores que el tamaño establecido, la energía que se gasta en la chancadora es convertida en gran parte, en sonido y calor; por lo que se acepta generalmente, que la eficiencia de chancado es baja; ésta eficiencia puede variar, porque las menas tienen cierta dureza, humedad, contenido de finos, etc. El tamaño del producto de la operación de chancado a nivel industrial es del orden de 3/4", 1/2", 3/8" y 1/4". Dependiente fundamentalmente de la capacidad de la planta y de las características del mineral.

3.1.2 Aglomerado y Curado

La aglomeración consiste en la cohesión de partículas de menor granulometría en torno a aquellas de mayores tamaños (Figura 14). Tiene como principal objetivo mejorar la permeabilidad del lecho, minimizando la presencia de zonas sin acceso a la solución lixivante. La permeabilidad del lecho de mineral es mayor si i) las partículas son de tamaño suficientemente grande; ii) no hay acumulación de partículas finas; iii) el tamaño de las partículas es homogéneo en la pila y iv) no hay compactación de la pila por maquinaria pesada. El proceso más simple de aglomeración es humedecer el mineral con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los tamaños gruesos. Se forma un puente líquido entre las partículas. Aquellos minerales que no han sido aglomerados presentan una ausencia de las fuerzas para mantener las partículas en su lugar, por lo cual, los finos se desplazan debido al arrastre de la solución lixivante, ocupando espacios entre las partículas mayores y de existir arcillas, ambos factores cumplen un rol sellante, afectando negativamente la permeabilidad del lecho.

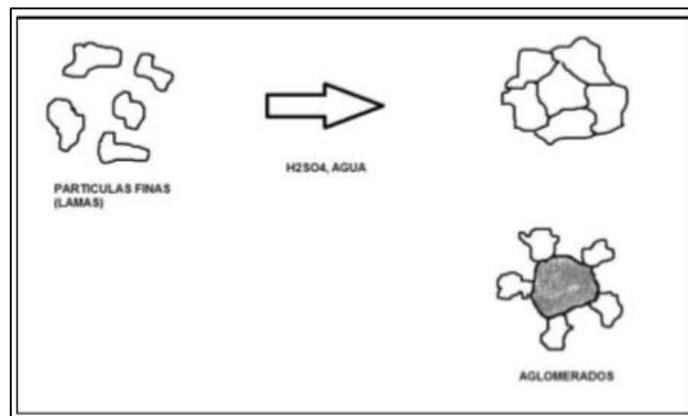


Figura 14. Concepto de Aglomeración. Extraído de Carreño (2012).

El curado es el tratamiento químico previo a la etapa de lixiviación, en el que se suministra agua y ácido sulfúrico concentrado al mineral chancado, con el fin de iniciar una serie de reacciones, cuyos efectos favorables para la operación son el incremento de la solubilidad mineral, la generación de fracturas que mejoran la difusión de reactivos al interior de la partícula y finalmente la acidificación del mineral que previene la precipitación de sulfatos de hierro durante la lixiviación. La aglomeración y el curado se realizan en equipos llamados tambores aglomeradores que corresponden a cilindros inclinados girando a baja velocidad, ocasionando el deslice (cascada) y la aglomeración del mineral previamente mojado con agua y/o adherentes.

3.1.3 Apilamiento

El mineral aglomerado con cierta cantidad de ácido y de agua (kg/t) según su mineralogía y su ganga, se acomoda en las pilas formando los módulos de riego, con superficie y altura determinadas, ángulo de reposo del mineral ya establecido, y con pendiente en dos sentidos: i) Inclinación lateral, para el drenaje e ii) inclinación en sentido longitudinal para la evacuación de las soluciones. A este material mineralizado apilado y preparado se le determina la densidad aparente que varía según su porcentaje de finos. El apilamiento se puede realizar mediante distintos métodos como es un sistema de correas o a través de apiladores móviles. Las pilas se cargan habitualmente entre 3 y 8 m sobre un sustrato impermeable, normalmente protegido con una membrana de plástico que puede ser de tipo polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 - 1,5 mm de espesor según las exigencias de cada aplicación.

3.1.4 Lixiviación

Proceso que permite disolver el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una solución de ácido sulfúrico y agua. El material mineralizado y apilado debe ser regado con una solución lixivante, para lo cual se tiende la malla de riego, que cubre toda el área. El riego de las pilas se puede realizar fundamentalmente por dos procedimientos: por aspersión o por distribución de goteo, este último siendo recomendable en caso de escasez de líquidos y bajas temperaturas. En la industria, se utiliza generalmente una tasa de riego del orden de 10 - 20 litros/hm². El cual debe ser homogéneo. Los cuales riegan la superficie de la pila con solución lixivante. El sistema de riego implementado en la pila tiene la función de permitir la circulación de tres tipos de soluciones:

las soluciones de refino, intermedias y/o el agua (Figura 15). Las soluciones recogidas son llevadas a piscinas desarenadoras, para ser clarificadas y desde allí fluyen a diferentes piletas según la calidad de la solución.

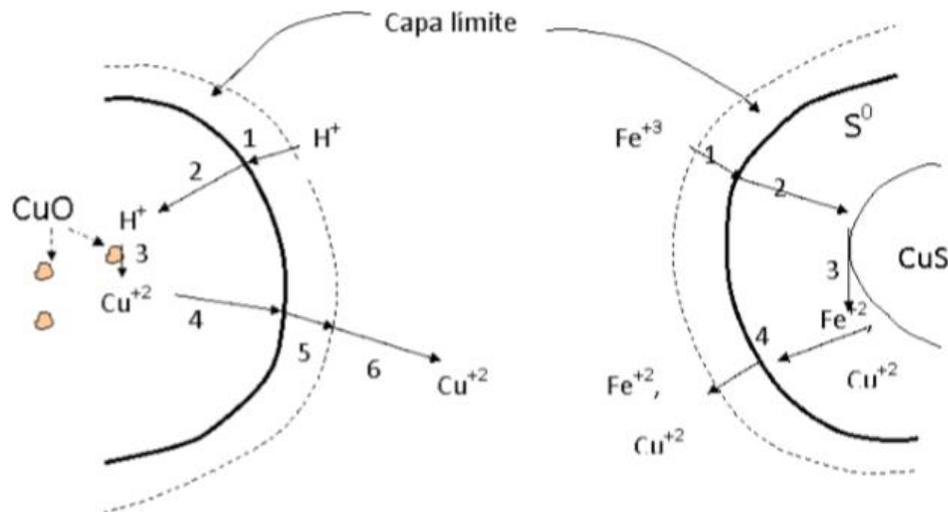


Figura 15. Modelo cinético del núcleo recesivo, ejemplifica las etapas de evolución del proceso de lixiviación. Extraído de Carreño 2012.

3.2 Arcillas

Minerales pertenecientes al grupo de los filosilicatos cuyas propiedades físico - químicas dependen de su estructura interna y diminuto tamaño (2 μm promedio). Tienen hábito hojoso o escamoso y con una dirección de exfoliación dominante. Son blandos, peso específico relativamente bajo y sus láminas de exfoliación pueden ser flexibles e incluso elásticas. Las arcillas fueron inicialmente definidas, en base a su tamaño, como cualquier mineral cuyas partículas fueran menores que 2 μm . Esta definición se impuso debido a que las técnicas de observación no podían reconocer los minerales a esta escala reducida y los análisis químicos nunca se realizaron a partículas de este tamaño.

3.2.1 Estructura cristalográfica

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(\text{SiO})_4$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$ que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros

se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} . Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (Figura 16).

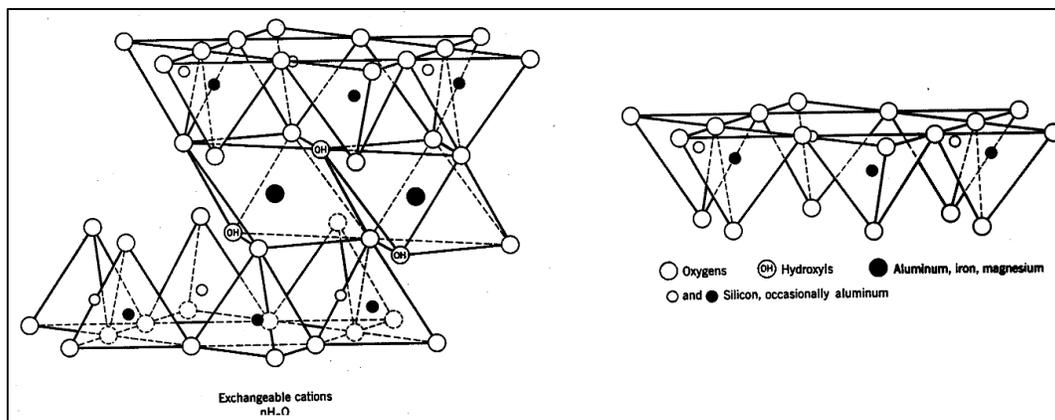


Figura 16. Estructura básica de las Arcillas. Extraído de García y Suarez (2000).

3.2.2 Grupos

La repetición bidimensional de las unidades tetraédricas y octaédricas, el apilamiento de estas laminas según varias combinaciones y finalmente, las sustituciones isomórficas de unos átomos por otros dentro de la red cristalina, originan los distintos tipos de arcillas. A este respecto, se pueden establecer cuatro grandes grupos, en los cuales quedan englobados la mayor parte de los minerales:

- **Grupos del Caolín:** Incluye diez especies, siendo la caolinita la más importante y abundante en los suelos. Las restantes, haloisita, nacrita, anaxita y metaloisita, se encuentran en el suelo en escasa proporción; su composición química y mineralógica es prácticamente igual a la caolinita, siendo diferente en lo que se refiere a la sustitución parcial del Al^{+3} por Fe^{+2} , Mg^{+2} , Ni^{+2} o Mn^{+2} . La haloisita es más hidratada. La caolinita presenta una estructura hojosa,

constituida por unidades cristalinas aplanadas. Cada una de estas unidades esta a su vez formada por laminas alternadas de sílice y alúmina, unidas entre sí muy estrechamente.

- Grupo de las Esmécticas: Formadas por dos láminas de sílice y una de alúmina intercalada y tenazmente unida las dos de sílice por átomos de oxígeno. Estas unidades cristalinas están ligadas unas a otras mediante puentes oxígeno - oxígeno. Ello permite a estas arcillas, cuando están mojadas, una expansión amplia de la red y como consecuencia, la fácil entrada y adsorción de agua y cationes en las superficies internas. Su principal mineral es la Montmorillonita.
- Grupo de las Micas Hidratadas: La arcilla más representativa es la illita. Otras, aún no totalmente definidas, como moscovita, glauconita y serospatita, se integran también en este grupo. Las micas hidratadas pueden considerarse como productos primarios de la descomposición de las rocas feldespáticas y probablemente se producen sustituciones isomórficas, las cuales pueden dar lugar al cambio de sodio por potasio e inversamente. Los cristales de Illita se presentan formando escamas irregulares y con diámetros entre 0,1 y 2 micras. Su superficie, plasticidad, cohesión y carácter coloidal pueden considerarse intermedia entre la Caolinita y la Montmorillonita. La capacidad de cambio de cationes suele oscilar entre 15 y 40 me/100g. El espesor de estratos es de 10A.
- Grupo de la Vermiculita: La vermiculita, arcilla principal de este grupo, presenta un retículo cristalino similar a la Illita, pero en lugar de contener potasio entre las láminas silíceas adyacentes, contiene magnesio. Su espaciamiento basal es de 14A y debido a que puede adsorber además agua, se la conoce como arcilla hinchable. En esta arcilla, los Mg^{+2} hidratados son fácilmente reemplazables por otros cationes, pudiendo dar origen a otros minerales arcillosos. Admitiendo sustituciones iónicas, al igual que en la clorita.

3.2.3 Propiedades

Derivan principalmente de su tamaño inferior a 2 mm; su morfología laminar (filosilicatos) y de las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio inter laminar. Las distintas características corresponden a:

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Propiedad fundamental de las esmécticas. Son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los

espacios inter laminares, o en otros espacios interiores de las estructuras por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La CIC se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

- Capacidad de absorción: Relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) asociado a dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).
- Hidratación e hinchamiento: La hidratación y deshidratación del espacio inter laminar son propiedades características de las esmécticas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión inter laminar y a la carga de la lámina.
- Plasticidad: Esta propiedad se debe a que el agua envuelve a las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

3.3 Problemas que generan las arcilla en las etapas de chancado, aglomerado / curado y lixiviación

3.3.1 Chancado y arcillas

El proceso de chancado asociado a la planta hidrometalúrgica se asocia a tres Chancadores (Fotografía 1). El primero es un chancador Roxon 48 x 60 pulgadas, al cual ingresa 1100 t/h de mineral. Posee un 5% de humedad y su granulometría de descarga es de un 80% menor a 6 pulg (152,4 mm). El segundo chancador es un modelo Symons Cabeza Corta de 7 pie. Posee un flujo de alimentación de 750 t/h, y consta de aberturas de harnero de Ds: 3 pulg y Di: 1,5 pulg., entregando mineral con granulometría entre 25 - 50 mm (1 - 2 pulg). El tercer chancador es el mismo modelo del anterior, con la diferencia que las aberturas de harnero son de Ds: 1,5 pulg y Di:

1 pulg. El mineral producto del tercer chancador tiene granulometría entre 15 - 30 mm (0,6 – 1,2 pulg). Este chancador posee un flujo de alimentación de 350 t/h.



Fotografía 1. Chancadores primario y secundario.

El Chancado es la primera etapa en ser afectada por las arcillas. Las rocas que son transportadas desde la mina San Antonio Óxidos hacia la planta hidrometalúrgica traen alto contenido de arcillas blancas (>35%), además estas rocas al tener arcillas retienen humedad (>4%), aumentando su tamaño. Estas rocas con arcillas al ser transportadas por las correas y los chutes de traspaso generan polución, acumulándose en las paredes de los chutes hasta el punto de comenzar a disminuir su diámetro, lo que finalmente reduce la cantidad de material que sale del chute o no permite el traspaso del mineral, siendo el principal problema en el chancador (Figura 17).

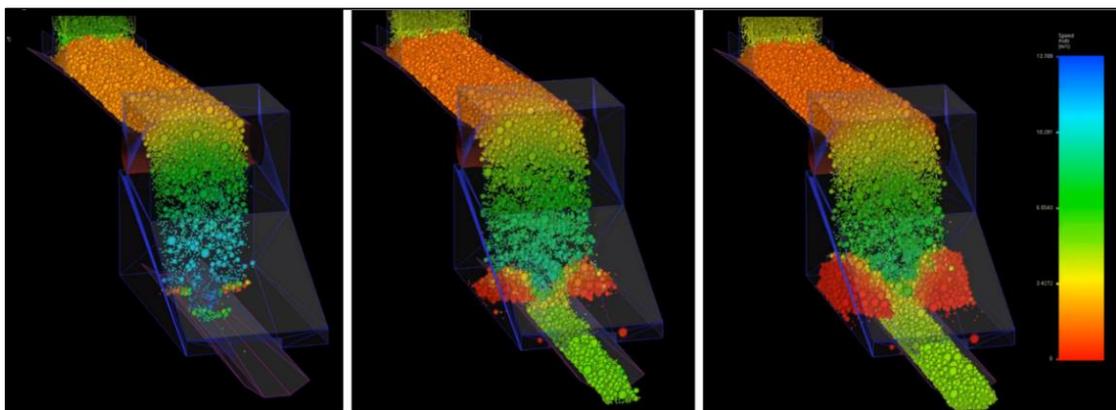


Figura 17. Secuencia de acumulación de material fino en chutes de traspaso. Colores cálidos corresponden a una menor velocidad en el transporte del material.

3.3.2 Aglomerado/curado y arcillas

El mineral a tratar es curado con ácido sulfúrico concentrado y agua. El proceso de aglomeración se realiza junto al proceso de curado en dos tambores aglomeradores INAMAR (Fotografía 2), a los cuales se les agrega agua con un flujo de 15 - 18 m³/h y agua como lluvia en la correa de descarga del aglomerador, la cual representa el 0,2% del total de agua agregada en el glomero. Ingresan a los tambores aglomeradores 13.802 tmh (toneladas métricas húmedas) y 13.193 tms (toneladas métricas secas). Durante el proceso de aglomeración se consume entre 30 - 40 kg/tmh de ácido al día correspondiendo a un consumo cercano a 1.050 toneladas mensuales de ácido, esta cantidad representa un 80% del total de ácido consumido en todo el proceso.



Fotografía 2. Tambor aglomerador INAMAR.

En esta etapa el problema con las arcillas es mecánico. Mientras el tambor rota para formar el glomero (adhesión de partículas finas sobre las gruesas) se va agregando agua para generar la unión, sin embargo las arcillas absorben agua, hinchándose y aumentando su tamaño, lo que genera glomeros más grandes que disminuyen la porosidad de las partículas, producto de esto las partículas no son lo suficientemente curadas con ácido sulfúrico concentrado para generar la sulfatación (Fotografía 3). Este problema se traduce en una disminución en el porcentaje de sulfatación de los minerales (<40%), debido a esto se ha tenido que aumentar el tiempo de reposo en la pila hasta 8 días y aumentar la cantidad de ácido, para que la sulfatación sea > 40%.



Fotografía 3. Mineral aglomerado con alto contenido de arcillas. Ejemplo de curado en un grano mineral con arcillas (Derecha).

3.3.3 Lixiviación y arcillas

El proceso de lixiviación se realiza en pilas dinámicas de 1,5 m de altura, 50 m de ancho y 300 m de largo (Fotografía 4). Después de un reposo de 4 a 8 días se riega por 2 hrs/día durante 4 días, seguido de un riego por aspersores 24 hrs/día. La irrigación de las pilas se efectúa por aspersion en un riego primario con solución intermedia y un riego secundario con solución refino, en un ciclo de 50 días. Una vez finalizado el tiempo de riego y tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolecta la solución rica en cobre (llamada PLS) con una concentración de 5 - 6 gr/lit que es retirada por un sistema de drenaje a través de canaletas protegidas por un material impermeable de alta densidad (HDPE).

La característica de las arcillas que más afecta en la lixiviación es su capacidad de absorber e hincharse aumentando su tamaño y afectando la permeabilidad de la pila. Desde que se comenzó a lixiviar mineral de mina San Antonio Óxido con alto contenido de arcillas, se tuvo que disminuir la altura de la pila a 1,50 m debido a que la pila perdería permeabilidad por su altura y al alto contenido de granulometría fina.



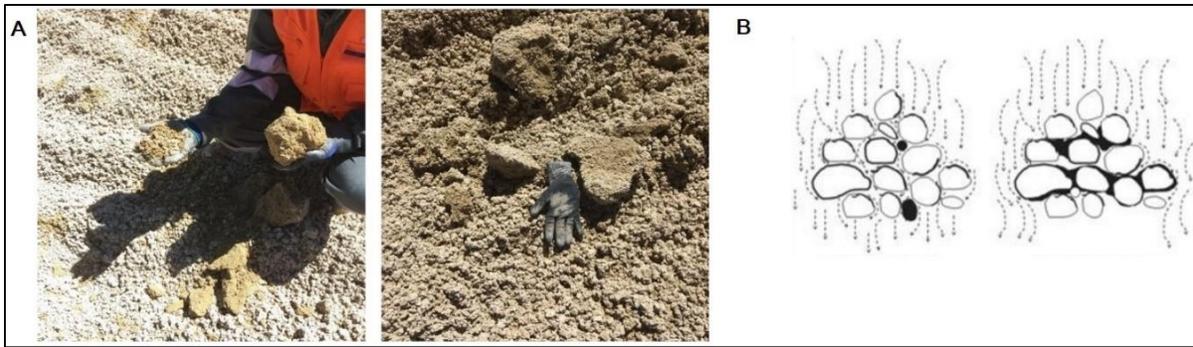
Fotografía 4. Pilas de lixiviación.

Al descargar el material sobre las membranas y formar la pila (Fotografía 5), se genera energía potencial, aplastando el material y disminuyendo la permeabilidad y generando un efecto barrera, debido a que las arcillas son un material muy blando y moldeable. Por lo tanto, para disminuir la energía potencial en la descarga, el material se apila sobre la misma pila con lentitud, para disminuir la altura de caída y compactación, luego una retroexcavadora la acomoda para formar la pila.



Fotografía 5. Descarga de glómeros en pila de lixiviación.

En la superficie e interior de la pila, las arcillas juegan un rol ligante entre las partículas generando glómeros de mayor tamaño formados durante su etapa de acopio en la pila (Fotografía 6A) con bolones de tamaños desde 5 - 30 cm. La adhesión de los granos de mineral, genera una matriz impermeable entre ellos, lo que no permite el ingreso de la solución lixivante (Fotografía 6B), quedando mineral sin lixiviar, lo que afecta directamente a la recuperación del cobre.



Fotografía 6. (A) Glómeros de mayor tamaño en pilas de lixiviación. (B) Ejemplo de percolación de la solución lixivante entre granos con y sin contenido de arcillas en su matriz.

Este fenómeno de impermeabilización también ocurre a escalas mayores, llamado “efecto barrera” (Figura 18) que consiste en zonas donde la arcilla se ha compactado entre los granos impermeabilizándolos, lo que puede llegar a tener hasta varios metros de extensión, comportándose como una especie de paraguas contra la solución lixivante, provocando que gran parte del mineral que este bajo de él, no se lixivie afectando directamente a la recuperación del cobre.

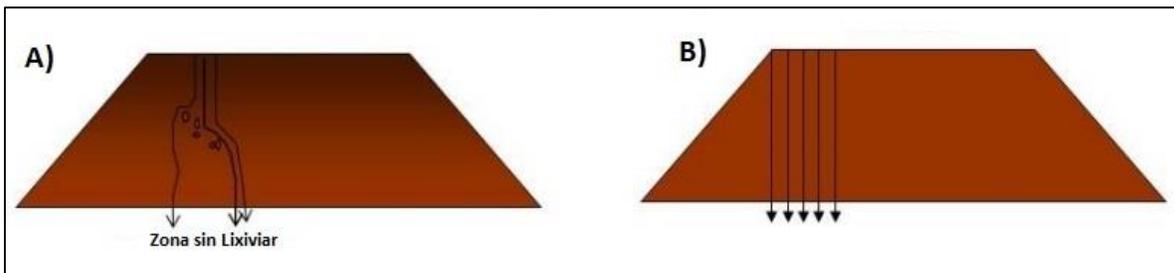


Figura 18. Efecto barrera en pilas de lixiviación. (A) Pila con zona sin lixiviar producto del efecto barrera. (B) Pila sin efecto barrera. Zabala (2013).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del muestreo y descripción macroscópica de rocas, caracterización de las arcillas por Difracción de Rayos X, etapas de curado, lixiviación, y modelamiento de la alteración argílica en LeapFrog 4.5.

4.1 Muestreo y descripción macroscópica de rocas

4.1.1 Caracterización de las arcillas por Difracción de Rayos X

La Figura 19 y la Tabla 5 muestran la posición espacial de las muestras capturadas dando prioridad a las unidades geológicas Pórfido de Cobre, Metasedimento y Brecha, asociados a las fases 1A, 1B y 1C.

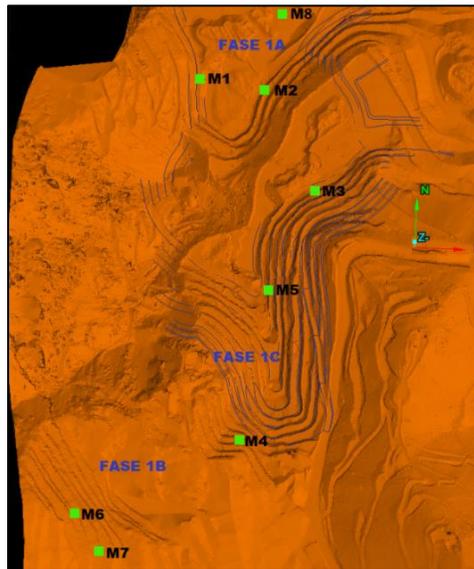


Figura 19. Mapa de ubicación de las rocas capturadas para Difractometría de Rayos X.

ID DRX	X (m)	Y (m)	Z (m)	Fase	Banco	Litología	Alteración
M1	457846.67	7069942	3305.26	1A	3310	Pórfido de Cu	Argílico
M2	457945.61	7069959.20	3307.27	1A	3310	Pórfido de Cu	Argílico
M3	458066.23	7069805.10	3370	1C	3370	Vetas	Argílico
M4	457931.38	7069350.50	3459	1C	3450	Pórfido de Cu	Argílico
M5	457915.33	7069533.36	3409.63	1C	3360	Metasedimento	Argílico
M6	457637.22	7069226.81	3585.60	1B	3510	Metasedimento	Argílico
M7	457679.34	7069171.79	3585.82	1B	3510	Pórfido de Cu	Argílico
M8	458007.96	7070105.50	3304	1A	3300	Brecha	Argílico

Tabla 5. Muestras recolectadas para Difractometría de Rayos X.

Se capturaron 4 muestras del Pórfido de Cobre, 2 de Metasedimento, 1 de brecha y 1 de vetas, con alteración argílica con la finalidad de identificar las arcillas que contienen, el muestreo se realizó en las 3 fases de producción de la mina (Fase 1A, 1B y 1C) específicamente las zonas que serán explotadas y extraídas en la Fase 2 (a partir de mayo 2020).

Las muestras de Pórfido de Cobre (Fotografía 7) presentan una textura porfídica obliterada parcialmente debido a la alteración argílica que afecta a los feldespatos (plagioclasas y ortoclasas), tienen color Blanco grisáceo, su mineralogía primaria corresponde a Plagioclasas (60%), Cuarzo (25%), Ortoclasas (10%) y Biotitas (5%), su mineralogía de mena es principalmente Arcillas con Cobre, Crisocola y Libethenita.



Fotografía 7. Muestra 4, Pórfido de Cobre con alteración argílica.

Las muestras de metasedimento (Fotografía 8) su textura no se puede describir debido a su grado de metamorfismo y la alteración argílica la cual reemplaza a sus minerales principales por arcillas, de color verde grisáceo debido a sus minerales originados por la alteración metamórfica retrograda (Clorita, Epidota, Actinolita) y las arcillas originadas por la alteración argílica, montmorillonita principalmente, la cual absorbe iones de Cu adquiriendo colores verdosos. Están constituidas principalmente por 20 - 40% de actinolita, 20 - 30% de epidota, 10 - 20% de clorita y 10 - 50% de arcillas (Caolín y montmorillonita). Su mineralogía de menas son Arcillas con Cobre.



Fotografía 8. Muestra 6, Metasedimento con alteración argílica.

La muestra de brecha (Fotografía 9) corresponde a una brecha matriz especularita, tiene una textura brechosa y alteración argílica leve. Los clastos son de 0,1- 40 cm diámetro, de formas angulosas a sub-angulosas y compuestos en un 70 - 80% de fragmentos de metasedimento y en el restante 20 -30% de pórfido de cobre. La matriz es en un 80 - 90% de especularita con el restante 10 - 20% de cuarzo, clorita, epidota, actinolita y arcillas (Caolinita).



Fotografía 9. Brecha Matriz especularita con alteración argílica leve.

Las descripciones de las muestras de Difractometría de Rayos X se encuentran en el ANEXO B.

4.1.2 Consumo de ácido

En la etapa de curado, el uso anticipado de ácido permite al ácido i) reaccionar sobre cada uno de los granos minerales logrando la sulfatación de los minerales que están en la superficie del grano e ii) inhibir la disolución de algunas especies indeseables de la ganga (aluminio y sílice). Sin embargo, ciertos minerales tardan más en lograr la sulfatación como los sulfuros y algunas gangas (arcillas principalmente) lo que se traduce en un aumento en el consumo de ácido, convirtiéndose en uno de los mayores problemas en el procesamiento hidrometalúrgico de la División El Salvador. Las muestras capturadas se identifican en la Figura 20 y la Tabla 6 caracteriza las rocas en relación a fase, litología, alteración y banco.

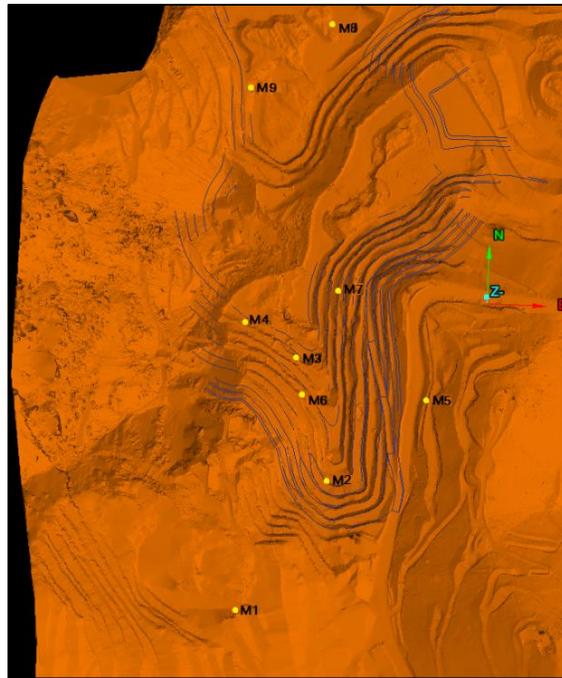


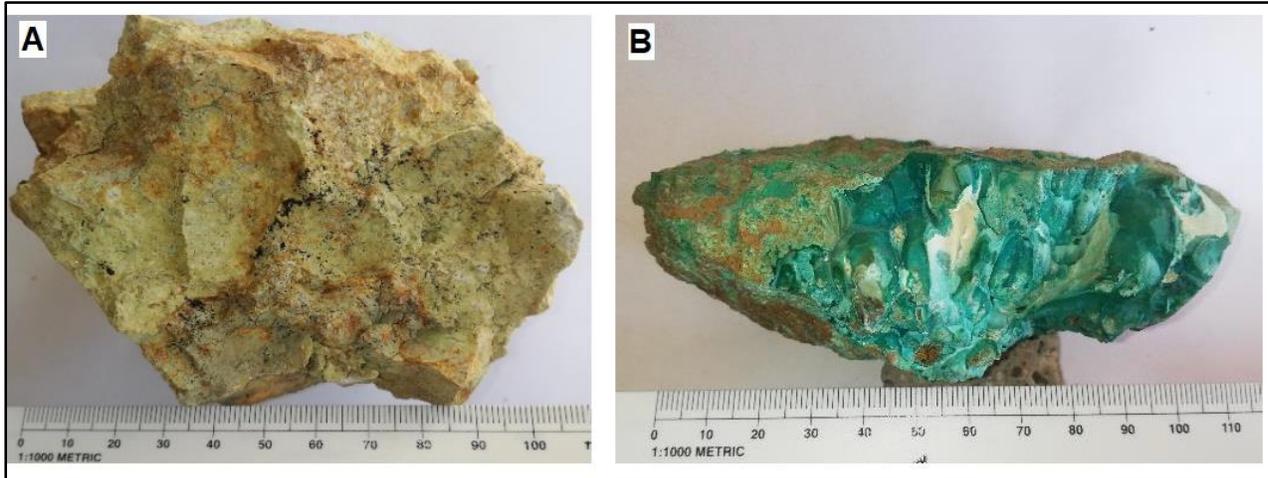
Figura 20. Ubicación de muestreo de minerales para análisis de consumo de ácido.

Las 10 muestras de rocas con minerales de mena y ganga capturadas para determinar el consumo de ácido contienen Crisocolas, Arcillas con Cobre y Libethenita y gangas a Limonita, Goethita, Jarosita, Caolinita, Montmorillonita y Sericita. Se pretendió que el muestreo fuera monomineral, sin embargo con algunos minerales fue imposible, por lo tanto se dio prioridad a los minerales en pórfido de cobre y metasedimento con poca alteración.

Muestras	Mineral	Categoría	x	y	z	Fase	Banco	Litología	Alteración
M1	Crisocola	Mena	457804,41	7069185,51	3523,18	1B	3520	Monomineral	Sin Alteración
M2	Limonita	Ganga	457992,03	7069342,54	3439,95	1C	3430	Monomineral	Sin Alteración
M3	Goethita	Ganga	457938,075	7069503,37	3407,78	1C	3370	Porfido	Argílica
M4	Jarosita	Ganga	457919,7	7069527,6	3409,62	1C	3370	Porfido	Argílica
M5	Caolin	Ganga	458116,21	7069573,89	3444,58	1C	3430	Monomineral	Sin Alteración
M6	Montmorillonita	Ganga	457963,63	7069444,16	3406,85	1C	3390	Monomineral	Sin Alteración
M7	Arcillas con Cu	Mena	458011,24	7069731,25	3397,45	1C	3380	Metasedimento	Argílica
M8	Libethenita	Mena	457926,75	7070064	3306,99	1A	3300	Porfido	Argílica
M9	Sericita	Ganga	458028,38	7070189,56	3300	1A	3300	Porfido	Filica

Tabla 6. Caracterización de las muestras minerales recolectadas.

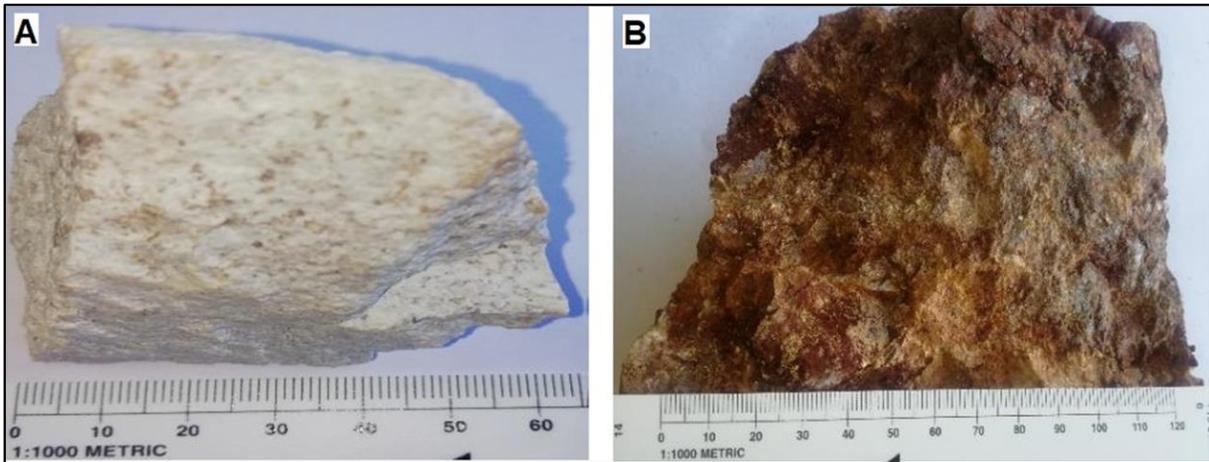
Las Arcillas con cobre (Fotografía 10A) es la mena de mayor cantidad en el yacimiento, presentan colores muy variados (Blanco, gris, amarillo, verdoso, pardo), habito masivo, brillo terroso, raya blanca, y dureza 1,5 - 2, su clivaje no se puede identificar debido a su granulometria fina (< 0,002 mm). La Crisocola es la segunda mena de mayor abundancia (Fotografía 10B) tiene colores que varían de verdes a azulados, su habito puede ser masivo, nodular y brotoidal, tiene brillo vitreo, raya blanca, dureza 2,5 - 3,5 y presenta fractura concoidal.



Fotografía 10. Muestra M6 (A) Arcillas con cobre y muestra M1(B) Crisocola.

Las Limonitas (Fotografía 11B) es una de las gangas de mayor abundancia en el yacimiento, se encuentran principalmente en las estructuras. Poseen un hábito botroidal y terroso, su color varia de Amarillo rojizo a pardo anaranjado, brillo mate a terroso, raya parda amarillenta, dureza 3-4 y fractura desigual. Las Arcillas Blancas (Fotografía 11A) también es una de las gangas de mayor

abundancia, se encuentran en estructuras y alterando a las rocas. Poseen habito masivo, y color blanco a pardo amarillento, brillo terroso a sedoso, raya blanca, dureza 1-2 y clivaje perfecto.



Fotografía 11. Muestra M5(A) Arcillas Blancas y Muestra M2 (B) Limonitas.

Las descripciones de todas las muestras de consumo de ácido se encuentran en el ANEXO B.

4.1.3 Cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación o velocidad de disolución de los minerales consiste en la determinación de las velocidades y mecanismos de disolución o extracción de los metales de interés económico. Las especies minerales que constituyen las rocas pueden tener diferencias respecto a su cinética de lixiviación, logrando ser desde muy rápida, como es en el caso de los sulfatos, a muy lenta, en el caso de los sulfuros.

En mina San Antonio existen distintas asociaciones minerales producto de las distintas litologías y alteraciones. Debido a lo informado por la planta hidrometalúrgica, posterior al ingreso de material con alto contenido de arcillas comenzaron a producirse variaciones negativas en el proceso hidrometalúrgico, surgiendo la necesidad de entender como es la cinética de lixiviación de las rocas con esta alteración. La Figura 21 muestra la ubicación espacial de las muestras capturadas. La Tabla 7 caracteriza las rocas en relación a mena, ganga, litología, alteración y banco.

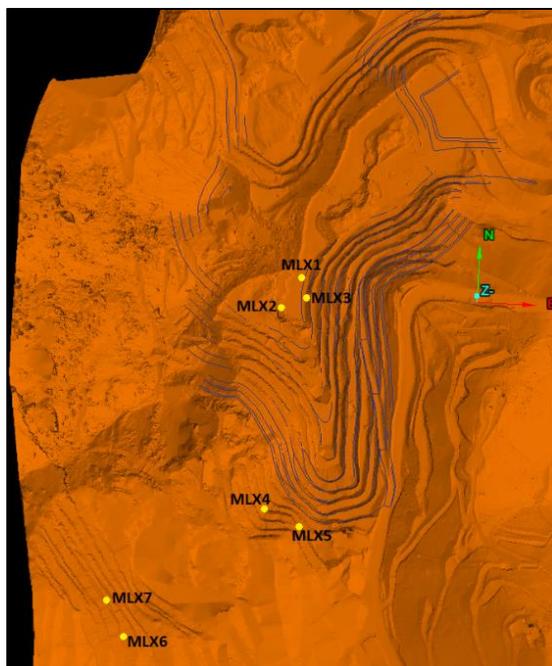


Figura 21. Ubicación de muestreo de rocas para análisis de cinética de lixiviación.

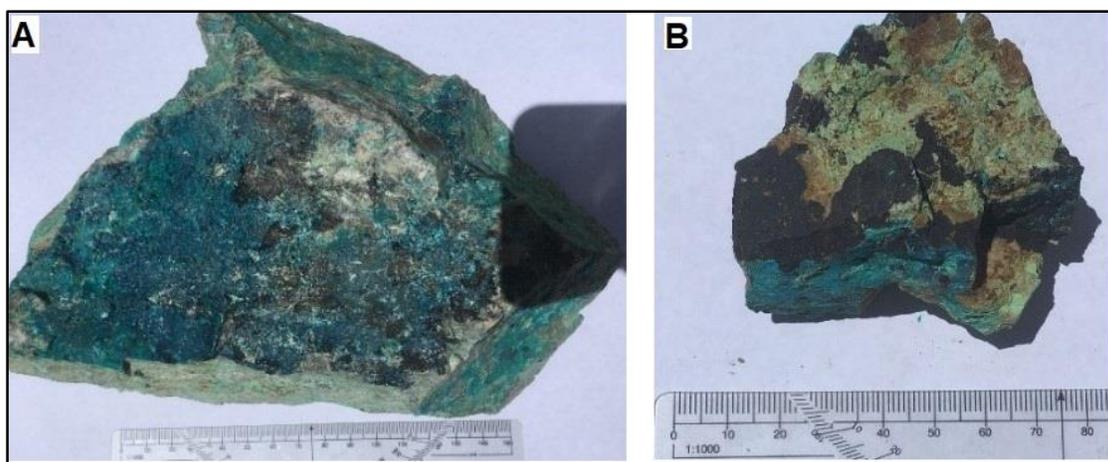
Muestra	x	y	z	Fase	Banco	Litología	Alteracion	Mena	Ganga
MLX1	457948,303	7069749,969	3340,458	1C	3330	Pórfido	Fílica	Cri-Pse-Cc	Qz-Plg
MLX2	457914,329	7069641,538	3341,079	1C	3330	Pórfido	Argílica	Cri-ArcCu-Lbt	Cao-Montt
MLX3	457941,409	7069688,38	3341,151	1C	3330	Metased	Argílica	ArcCu-Wad	Mont-CI-Btt-Act
MLX4	457910,94	7069355,04	3455,39	1C	3450	Metased	Argílica	ArcCu-Wad-Criso	Mont-CI-Btt-Act
MLX5	457931,38	7069350,5	3459	1C	3450	Pórfido	Argílica	Cri-Pse	Cao
MLX6	457755,8831	7069133,356	3554	1B	XX	Pórfido	Argílica	ArcCu	Mont-Cao
MLX7	457289,245	7069933,113	3552	1B	XX	Pórfido	Argílica		Mont-Cao

Tabla 7. Caracterización de las muestras de rocas recolectadas.

Las 7 muestras de rocas con minerales de mena y ganga capturas para determinar su cinética de lixiviación contienen Crisocolas (Cri), Arcillas con Cobre (ArcCu), Libethenita (Lbt), Calcosina (Cc), Pseudomalaquita (Pse) y Copper Wad (Wad) y gangas a Caolinita (Cao), Montmorillonita (Mont), Cuarzo (Qz), Plagioclasa (Plg), Clorita (Cl), Biotita (Btt) y Actinolita (Act). Las muestras corresponden a Pórfido de Cobre (5 Muestras) y Metasedimento (2 Muestras), todas con alteración argílica. El muestreo se realizó en las 3 fases de producción de la mina (Fase 1A, 1B y 1C) en las zonas que serán explotadas y extraídas posteriormente en la Fase 2.

Las muestras de pórfido de cobre (Fotografía 12A) tienen una descripción similar con las muestras descritas de Difractometría de Rayos X debido a que el muestreo fue realizado a las mismas

litologías con la misma alteración. Tienen textura porfídica obliterada intensamente debido a la alteración argílica, color Blanco grisáceo, su mineralogía primaria corresponde a Plagioclasas (60%), Cuarzo (25%), Ortoclasas (10%) y Biotitas (5%) y su mineralogía de mena es principalmente, Crisocola, Arcillas con Cobre y Libethenita. En las muestras de metasedimento (Fotografía 12B) no se identifica su textura debido a su alteración argílica intensa, posee un color verde grisáceo debido a sus minerales originados por la alteración metamórfica retrograda y las arcillas originadas por la alteración argílica. Están constituidas principalmente por 20 - 40% de actinolita, 20 - 30% de epidota, 10 - 20% de clorita y 10 - 50% de arcillas (Caolin y montmorillonita). Su mineralogía de menas son Arcillas con Cobre, Copper Wad y Crisocola.



Fotografía 12. Muestra MLX2(A) Pórfido de cobre y muestra MLX4 (B) Metasedimento.

Las descripciones de todas las muestras de cinética de lixiviación se encuentran en el ANEXO B.

4.2 Caracterización de las arcillas por Difracción de Rayos X

Los análisis indican que las principales arcillas son Illita y Caolinita, seguidas de Sepiolita, Halloysita y Pirofilita (Tabla 8). En la muestra M5 se reconocen Illita y Halloysita (75,84%) como minerales arcillosos principales. La muestra M6 tiene un 62,5% de arcillas, siendo la Caolinita y la Sepiolita los minerales arcillosos mayoritarios. Las muestras M2, M7 y M8 corresponden a las muestras con menor contenido de arcillas reconocidas 8,8%, 4,7%, 5,28% respectivamente. El análisis completo de las muestras se encuentra en el ANEXO F.

Arcillas	Formula	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)	M5 (%)	M6 (%)	M7 (%)	M8 (%)
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	2,86		3,9		15,7	31,4	4,7	4,6
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O^1$					3,04			0,2
Illita	$(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	11,11	6,72	11,63	13,3	34,37			
Pirofilita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$	8,2		6,7	8				
Halloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$			3,8	2	20,45			
Alunita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$		2,13	1,35	2,4				0,48
Sepiolita	$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$						31,1		
Vermiculita	$Mg_{0,7}(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot 8H_2O$					2,28			
Berlinita	$AlPO_4$			14,53					

Tabla 8. Resultados caracterización de arcillas con Difracción de Rayos X.

Los tipos de arcillas y su cantidad en las rocas con alteración argílica de cada Fase, se muestran en la Tabla 9. En la Fase 1A se recolectaron 3 muestras (M1, M2, M8), donde el principal mineral arcilloso identificado corresponde a la Illita (17%), seguido de la Pirofilita (8,2%), Caolinita (7,4) y Alunita (2,61%). En la Fase 1B se recolectaron 2 muestras (M6 y M7) donde el principal mineral arcilloso identificado corresponde a Caolinita (36%) y Sepiolita (31,1%). En la Fase 1C se recolectaron 3 muestras (M3, M4 y M5) donde los principales minerales arcillosos identificados son la Illita (59%), Halloysita (26,25%) y Caolinita (19,6%) seguidos de la Pirofilita (14,7%), Berlinita (14,53%), Alunita (3,75%) y Montmorillonita (3,04%).

Arcillas	FASE 1A (M1, M2, M8)			FASE 1B (M6, M7)		FASE 1C (M3, M4, M5)	
	Pórfido	Metasedimento	Brecha	Pórfido	Metasedimento	Pórfido	Metasedimento
Caolinita	2,8%		4,6%	4,7%	31,4%		19,6%
Montmorillonita			0,2%				3,04%
Illita	17,83%					13,3%	46%
Pirofilita	8,2%					8%	6,7%
Halloysita						2%	24,25%
Alunita	2,13%		0,48%			2,4%	1,35%
Sepiolita					31,1%		
Vermiculita							2,28%
Berlinita							14,53%

Tabla 9. Tipo y cantidad de arcillas identificadas en las distintas litologías que componen a las fases de producción de SAO.

4.3 Curado (consumo ácido)

Se realizaron análisis de consumo de ácido a las 9 muestras recolectadas (Tabla 10), obteniendo resultados de su consumo de ácido (KgH+/Ton) a las 0, 2, 6, 22 y 52 horas de análisis (Gráfico 1). Los resultados de cada una de las muestras se encuentran en el ANEXO D.

Muestra	Mineral	%CuT	Consumo (KgH+/Ton)					Consumo H+ (KgH/Ton)
			0 hrs	2 hrs	6 hrs	22 hrs	52 hrs	
M1	Crisocola	5.62	41	86	103	113	117	109
M2	Limonitas	2.41	28	46	49	54	56	54
M3	Goethita	1.38	26	39	46	47	48	48
M4	Jarosita	0.08	9	9	9	9	10	4
M5	Arcillas Blancas	0.12	9	14	14	15	15	8
M6	Esmectitas	0.097	6	10	17	17	17	9
M7	Arcillas Cobre	5.32	27	72	90	118	118	115
M8	Libethenita	0.7	13	24	24	26	29	19
M9	Sericita	0.01	5	8	8	8	10	4

Tabla 10. Resultados de consumo de ácido (KgH/Ton) de las muestras minerales recolectadas.

Los minerales que presentan el consumo de ácido mayor corresponden a las arcillas con cobre (115 KgH/Ton) y a la Crisocola (109 KgH/Ton) los cuales son las principales menas. Las arcillas con cobre se asocian principalmente al Metasedimento y la Crisocola al Pórfido de Cobre. Ambos minerales en las primeras 22 horas presentan un consumo de ácido entre 27 - 41 KgH/Ton alcanzando valores de 118 - 113 KgH/Ton a las 22 horas, producto de la reacción de los minerales con el ácido. Posterior a las 22 horas el consumo de ácido se estabiliza debido a que los minerales ya reaccionaron con el ácido y no lo están consumiendo.

Los minerales con un consumo de ácido intermedio son las Limonitas (54 KgH/Ton) y Goethita (48 KgH/Ton). Estos minerales se ubican en todo el yacimiento principalmente asociados a las estructuras. En las primeras horas presentan un consumo de ácido de 28 KgH/Ton y 17 KgH/Ton respectivamente aumentando hasta los 59 KgH/Ton y 50 KgH/Ton a las 52 horas.

Los minerales con bajo consumo de ácido bajo son la Libethenita (19 KgH/Ton), Esmectitas (9 KgH/Ton), Arcillas Blancas (8 KgH/Ton), Jarosita (4 KgH/Ton) y Sericita (4 KgH/Ton). La

Libethenita se identifica en la Fase de Producción 1A es escasa comparada con las menas. La Montmorillonita y las Arcillas Blancas se asocian a la alteración argílica siendo esta alteración la de mayor abundancia en las fases de producción. La Sericita se asocia a rocas con alteración Fílica y la Jarosita en rocas con actividad supérgena. La Libethenita en las primeras horas tiene un consumo de ácido de 13 KgH/Ton aumentando hasta los 29 KgH/Ton a las 52 hrs, sin embargo, los minerales con menor consumo de ácido (Esmectitas - Arcillas Blancas - Jarosita y Sericita) varían entre 5 - 9 KgH/Ton aumentando el consumo de ácido de 10 - 17 KgH/Ton a las 52 hrs.

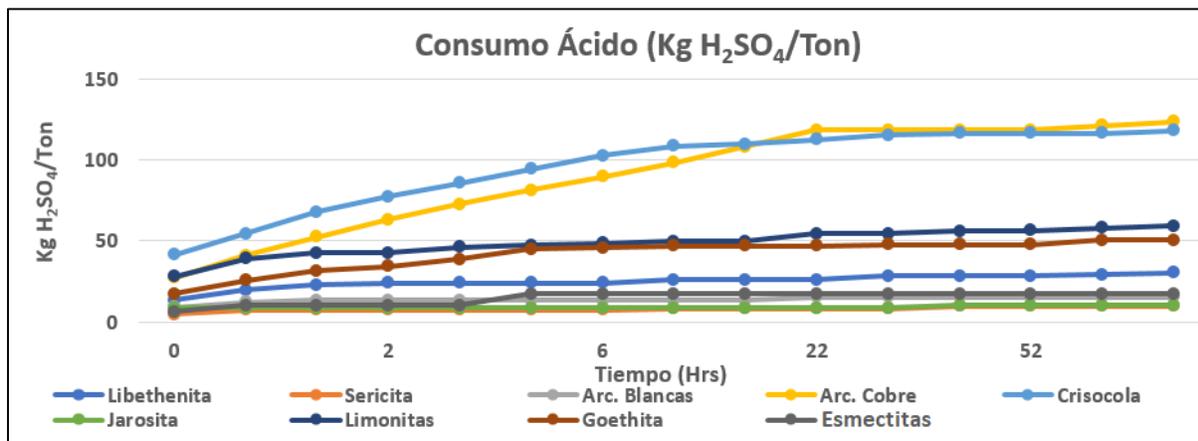


Gráfico 1. Resumen de cantidad de ácido utilizado (KgH/Ton) por minerales.

El impacto de estos minerales en el consumo de ácido en la etapa de curado/aglomerado se observa en el Gráfico 2. El promedio de ácido utilizado entre septiembre del 2018 y mayo del 2019 es de 25 Kg/Ton. En abril del 2019 hubo un consumo de 34 Kg/Ton debido a la existencia de arcillas en los chancadores y como medida de prevención para que no afectara en la etapa de curado/aglomerado, se incorporó más ácido, provocando una caída en la recuperación CuT del mes de mayo 2019 (26%) producto del exceso de ácido en la solución con concentrado de cobre extraído de las pilas de lixiviación, en mayo 2019 disminuyó la cantidad de ácido con la finalidad de aumentar la recuperación CuT. Entre junio – octubre del 2019 el consumo de ácido siguió aumentando debido al ingreso constante de rocas con arcillas al procesamiento, además se buscaba un equilibrio entre la cantidad de ácido utilizado vs una recuperación CuT aceptable (>75%).

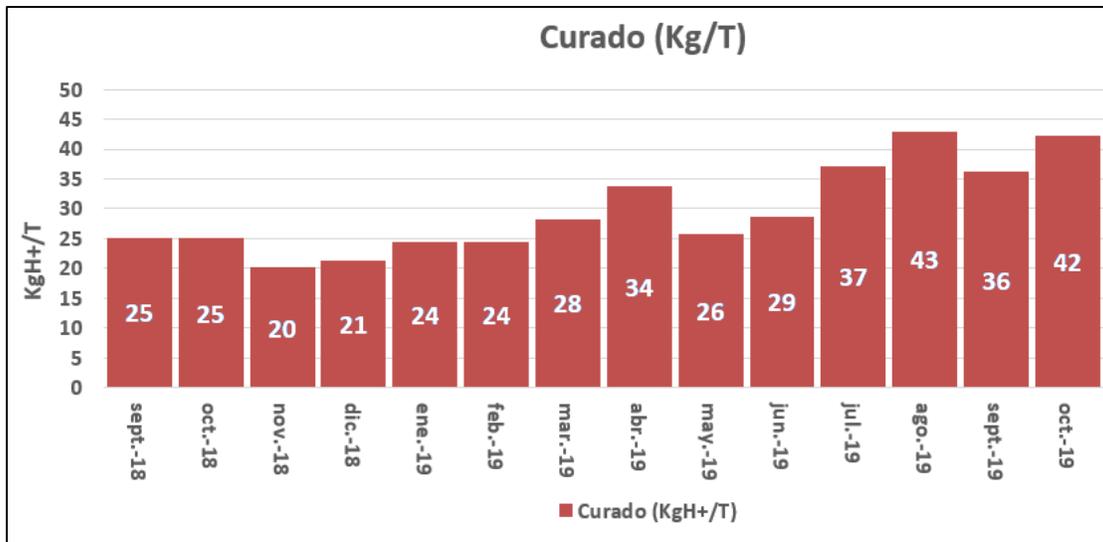


Gráfico 2. Cantidad de ácido utilizado en el Curado entre septiembre 2018 – octubre 2019.

Las arcillas en la etapa de curado además de ser consumidoras de ácido también cumplen un rol impermeable en los granos con mineral (Ver capítulo 3) afectando directamente en la sulfatación de los minerales. Los resultados del % Sulfatación de CuT se observan en el Gráfico 3. Antes de mayo del 2019 la sulfatación promediaba un 47% a las 72 horas. Entre mayo - julio del 2019 se observa un descenso de 40% a las 72 horas. En mayo del 2019 cuando se adicionaron arcillas al procesamiento genero un descenso en la sulfatación durante 3 meses continuos. En agosto del 2019 la sulfatación se acerca al valor promedio asociado al aumento en la cantidad de ácido utilizado y al control de la cantidad de arcillas que ingresan a la planta.

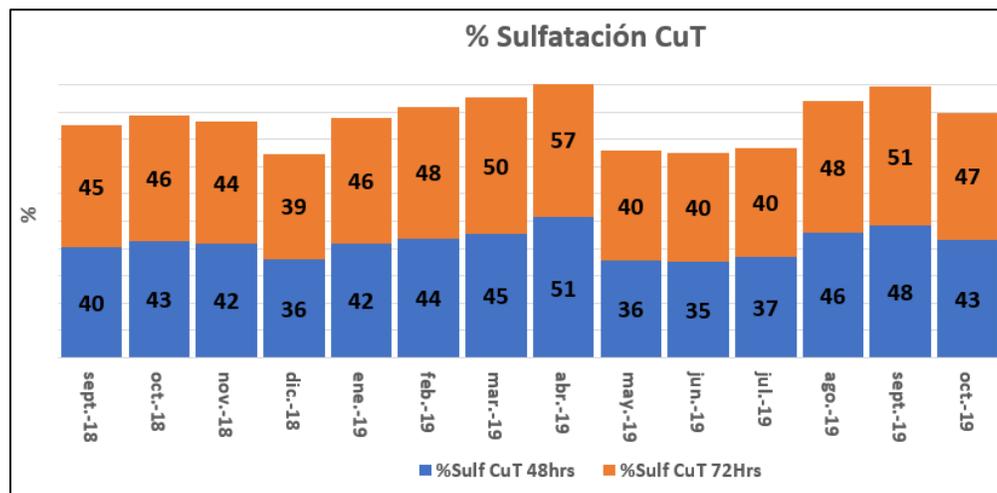


Gráfico 3. Porcentaje sulfatación de CuT entre las 48 y 72 horas entre septiembre 2018 y diciembre 2019.

4.4 Lixiviación (% Recuperación CuT)

Los resultados a las 7 muestras analizadas fueron agrupados en la Tabla 11, donde se obtuvieron valores de % Rec CuT (Gráfico 4) y % consumo de ácido (Gráfico 5) durante 72 horas de análisis. La totalidad de los resultados se encuentran en el ANEXO E.

Para el % Rec CuT se tiene que las muestras MLX1 y MLX2 presentan una cinética de lixiviación alta debido al rápido aumento en el %Rec CuT en las primeras 6 horas. Al inicio liberan entre un 34 - 36 %Rec CuT respectivamente, posteriormente liberan entre 85 - 87 %Rec CuT a las 6 horas, a las 8 horas la curva muestra una meseta con valores entre 90 - 93 %Rec CuT. Las muestras MLX3, MLX4 y MLX5 presentan una cinética de lixiviación moderada debido a que su %RecCuT tiene un aumento moderado hasta las 6 horas. La muestra MLX5 comienza liberando un 59 %Rec CuT y las muestras MLX3 y MLX4 un 20 y 32 %Rec CuT respectivamente, luego muestran una meseta a las 8 horas con valores entre los 69 - 73%Rec CuT para la muestra MLX3 y MLX4 y entre los 88 - 91%Rec CuT para la muestra MLX5 respectivamente. Las muestras MLX6 y MLX7 tienen una baja cinética de lixiviación debido a que la variación en el %Rec CuT se mantiene generando una gráfica recta. La muestra MLX6 muestra valores desde los 3 %Rec CuT al comienzo del análisis hasta los 7%Rec CuT a las 72 horas y la muestra MLX7 se mantiene con 36%Rec CuT durante todo el análisis.

Control (Hr)	MLX1		MLX2		MLX3		MLX4		MLX5		MLX6		MLX7	
	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)	%Rec CuT	Consumo (KgH+/Ton)
0		23		19		20		37		33		10		8
0.5	34	33	36	31	20	32	32	50	59	42	3	17	36	13
1.0	42	47	46	43	27	41	40	62	67	51	3	23	36	13
1.5	54	58	59	53	39	49	49	70	74	54	4	23	36	13
2	67	69	72	61	50	56	58	77	81	57	4	24	36	15
4	78	73	81	64	59	61	64	81	85	57	5	30	36	18
6	85	75	87	69	67	66	67	85	87	59	6	30	36	18
8	88	76	90	69	69	67	69	85	88	59	6	30	36	18
12	91	76	90	69	70	67	70	85	89	59	7	30	36	18
18	92	76	91	69	71	67	71	85	90	59	7	30	36	18
26	93	76	91	69	71	67	72	86	90	59	7	30	36	18
34	93	76	91	69	72	69	72	88	90	59	7	30	36	18
40	93	76	91	69	72	71	72	89	90	59	7	30	36	19
48	94	76	91	69	72	71	72	89	91	59	7	30	36	19
60	93	76	91	69	73	71	73	90	91	59	7	30	36	19
72	93	77	91	69	73	71	73	90	91	59	7	30	36	19

Tabla 11. Resultados de análisis de cinética de lixiviación.

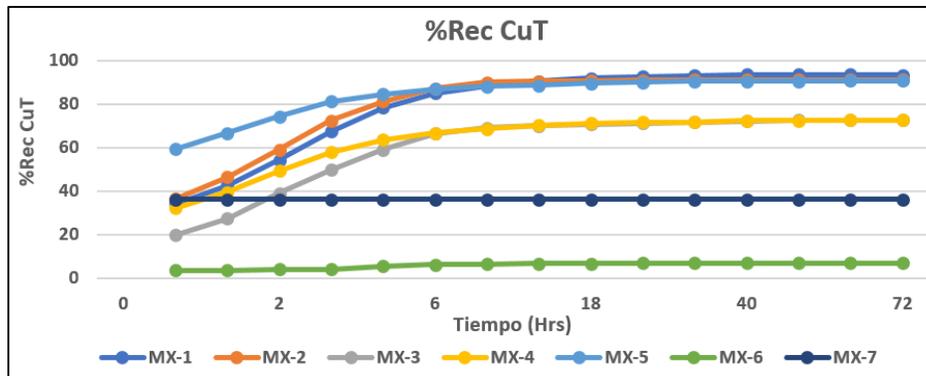


Gráfico 4. Porcentaje de Recuperación CuT.

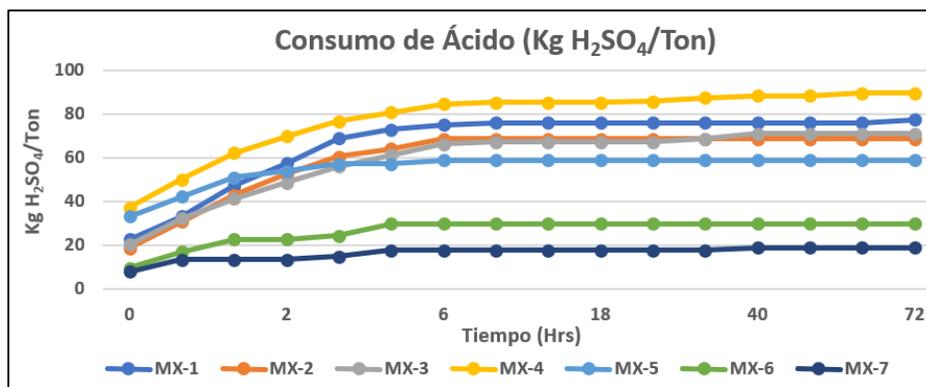


Gráfico 5. Consumo de ácido.

El % de consumo de ácido se tiene que la muestra que evidencia un mayor consumo de ácido es la muestra MLX4 con un % de 37 KgH/Ton al inicio de la prueba, seguido por un % de 85 KgH/Ton a las 6 hrs y manteniéndose hasta un % de un 90 KgH/Ton a las 72 horas. La muestra MLX1 tiene un consumo de ácido de un % de 23 KgH/Ton, seguido por un % de 75 KgH/Ton a las 6 hrs y manteniendo valores de un % de 77 KgH/Ton a las 72 horas. Las muestras MLX2 y MLX3 indican un consumo de ácido parecido, al inicio del análisis evidencian un % de 31 y 32 KgH/Ton respectivamente, seguido de un % entre 69 - 66 KgH/Ton a las 6 horas y manteniendo un % de 69 - 71 KgH/Ton a las 72 horas. Las muestras MLX 6 y MLX7 presentan un menor consumo de ácido, con un % de 10 - 8 KgH/Ton respectivamente, seguido con un % de 30 - 18 KgH/Ton a las 4 horas, siendo el consumo estable con % entre los 30 y 19 KgH/Ton a las 72 horas.

Los resultados del % Recuperación de CuT en las pilas de lixiviación se observan en el Gráfico 6. En septiembre 2018 y abril 2019 la recuperación supera el 80%. Entre mayo y junio del 2019

disminuye en un 15%, alcanzando valores de recuperación entre un 71 - 70%, luego la recuperación comenzó a aumentar levemente hasta un 78% de recuperación en agosto y septiembre 2019.

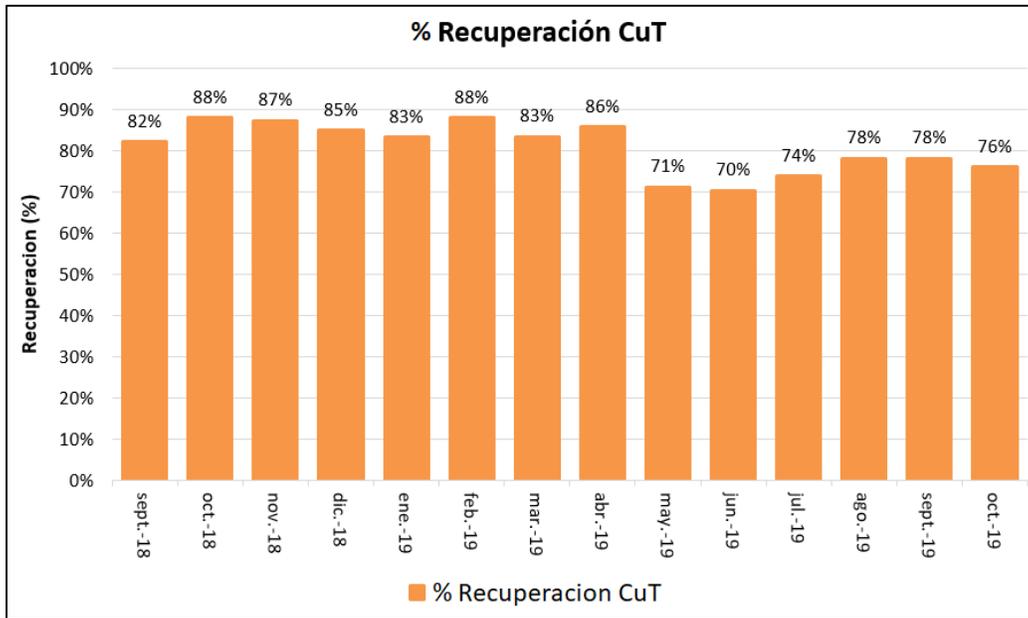


Gráfico 6. Porcentaje de Recuperación CuT en lixiviación entre septiembre 2018 a octubre de 2019.

El Gráfico 7 compara el porcentaje recuperación CuT v/s cantidad de ácido utilizado v/s contenido de alteración argílica que ingresó en la planta hidrometalúrgica durante septiembre del 2018 y octubre del 2019. Entre mayo y junio del 2019 hay una caída de un 15% en la recuperación, aumentando la cantidad de ácido utilizado, esto se asocia con el incremento de un 9% de alteración argílica que ingresó a la planta en el mes de mayo del 2019. Durante julio - septiembre del 2019 el contenido de arcillas disminuyó hasta un 35%, generando un aumento en la recuperación CuT en un 78%, sin embargo la cantidad de ácido es alta producto de las arcillas. En mayo del 2019 se identifica una disminución de la recuperación producto del aumento de la cantidad de ácido y de arcillas. En julio del 2019 la cantidad de arcillas disminuyó levemente aumentando la recuperación, pero la cantidad de ácido utilizado se mantuvo.

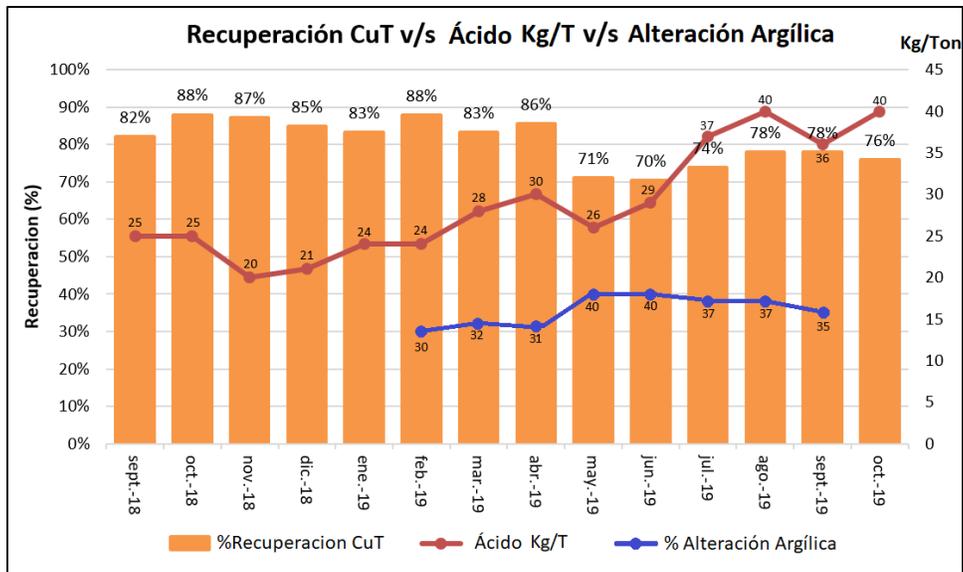


Gráfico 7. Valores de recuperación CuT vs Cantidad de ácido Kg/Ton y alteración argílica.

4.5 Gastos antes y después del ingreso de las arcillas al proceso hidrometalúrgico

En el Gráfico 8 se representan los valores de los gastos utilizados antes (marzo – mayo 2019) y después (junio – octubre 2019) del ingreso de material con alteración argílica a la planta hidrometalúrgica. Respecto a los gastos de la energía, hay un leve aumento de un 6%, sin embargo, los gastos del ácido tienen un aumento de un 68%. Se deduce que los aumentos de los gastos de la energía y del ácido son debido a la existencia de arcillas, siendo el ácido la variable más afectada en el negocio.

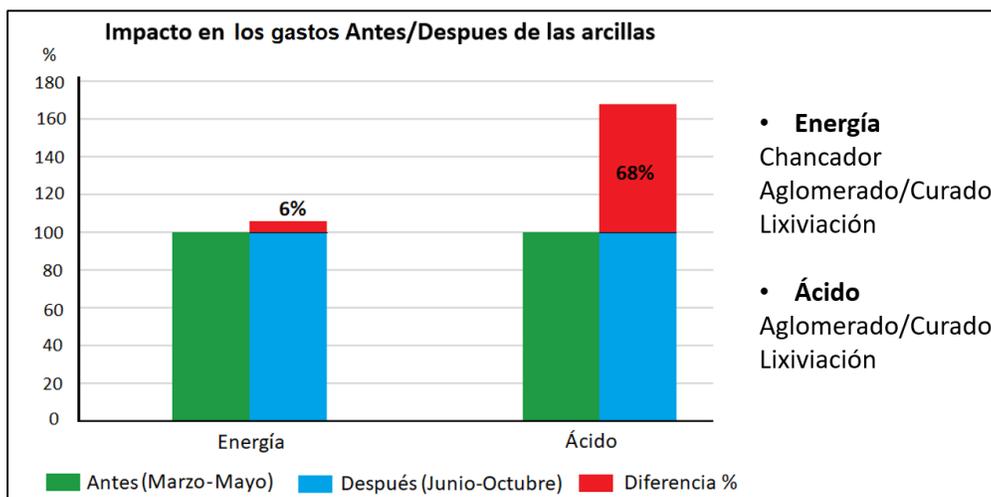


Gráfico 8. Diferencia de los gastos de energía y ácido sulfúrico antes y después del ingreso de arcillas al proceso hidrometalúrgico.

4.6 Modelamiento geológico de la alteración argílica

Debido a la problemática hidrometalúrgica con sus respectivos costos económicos que ocasiona la alteración argílica es necesario modelarla para entender sus i) dimensiones; ii) su distribución espacial y iii) para programarse en el corto y largo plazo, evitando que se repitan problemas similares a futuro. 34+90+54

El modelo antiguo de alteración argílica de mina San Antonio está realizado con la información de los mapeos históricos (1913-2009) de 1177 sondajes (AR y DDH) (Figura 22A). El modelo desarrollado en esta memoria se basa en información de los mapeos históricos de sondajes, pozos de tiro y de bancos sumando un total de 10688 sondajes (Figura 22B).

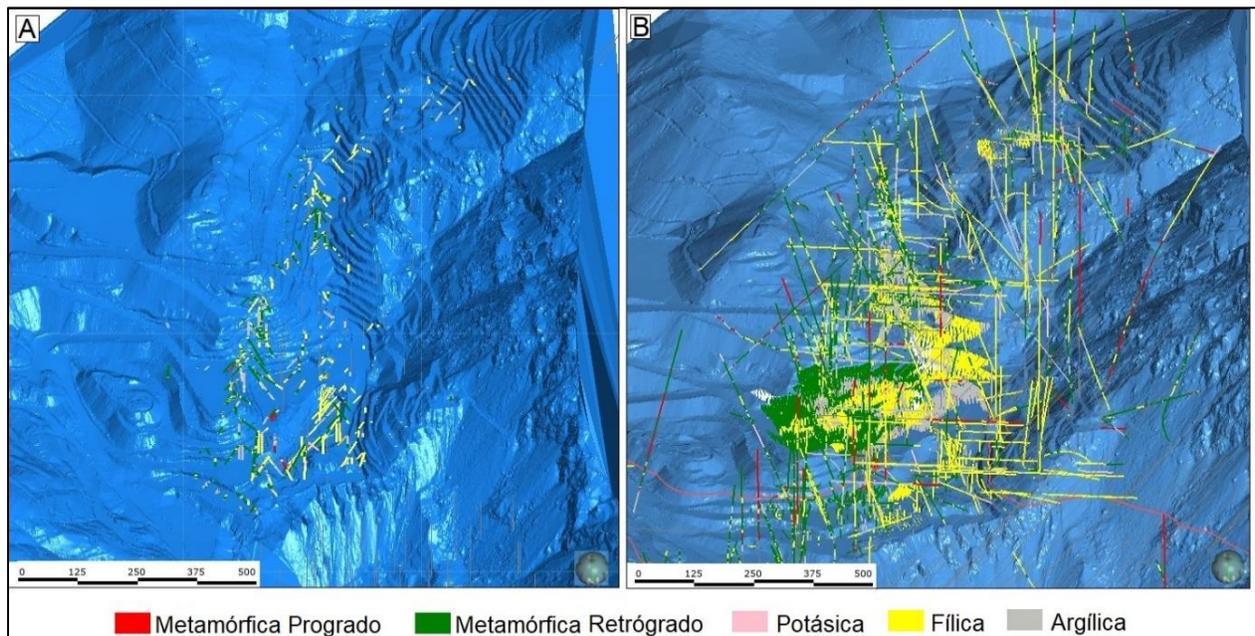


Figura 22. Mina San Antonio Óxidos. (A) Ubicación de sondajes históricos. (B) Ubicación de sondajes, mapeos de pozos de tiro y bancos.

El modelo antiguo (2016) de la alteración argílica (Figura 23 A y B) presenta una distribución y dimensiones exageradas debido a la escasa cantidad de sondajes realizados hasta el 2016. Al usar los planificadores de corto y largo plazo el modelo antiguo, se extrajeron y enviaron rocas al proceso hidrometalúrgico con más arcillas o alteración argílica que la indicada por el modelo.

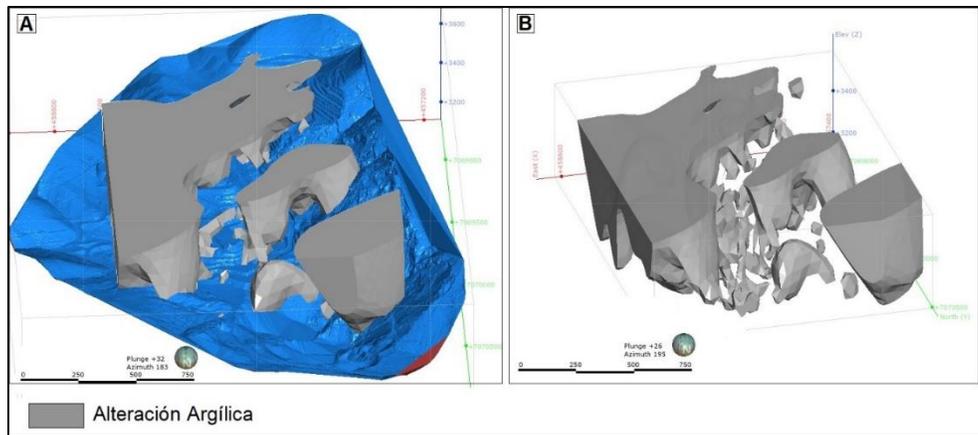


Figura 23. Modelo antiguo (2016) alteración argílica. (A) Modelo Alteración Argílica sobre topografía mina. (B) Modelo alteración argílica sin topografía.

El modelo de alteración argílica realizado en esta memoria (Figura 24A y B) es distinto al modelo antiguo debido a la mayor cantidad de datos utilizados en el modelamiento (10.688 entre sondajes, pozos de tiro y mapeos de bancos). El nuevo modelo indica con mayor exactitud las zonas de alteración argílica, diferenciándose del modelo antiguo, en sus distribuciones, dimensiones y direcciones preferenciales NE - SW. Para entender la importancia de la actualización del modelo de alteración argílica de mina San Antonio Óxidos, se compara como ejemplo el modelo antiguo versus el modelo nuevo en el banco 3320 el cual se explotó durante los meses de enero - marzo del 2020. La cantidad de datos entre cada modelo se observa en la Figura 25 A y B.

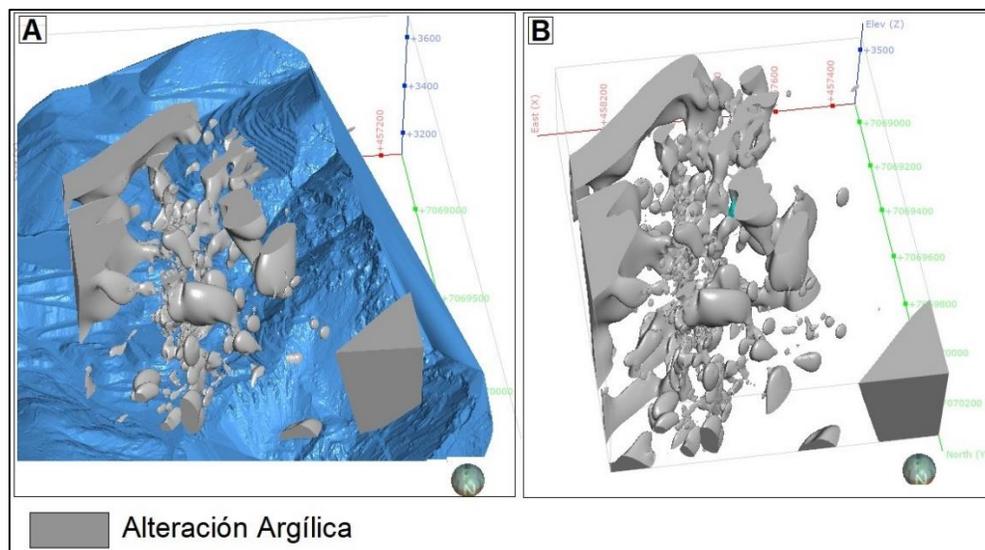


Figura 24. Modelo alteración argílica de esta memoria. (A) Modelo alteración argílica con topografía. (B) Modelo alteración argílica sin topografía.

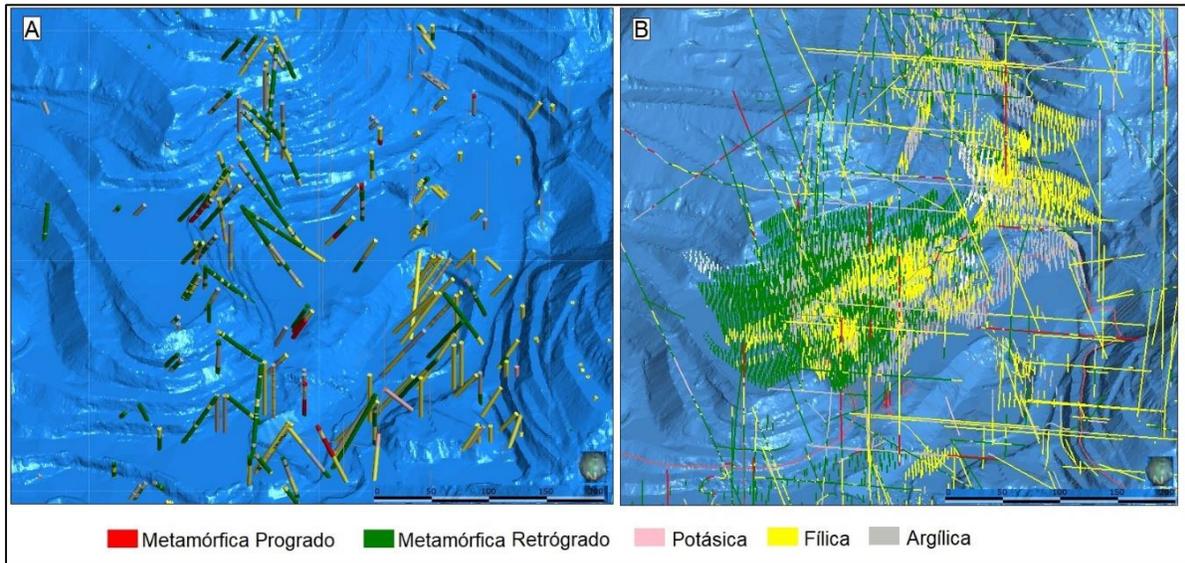


Figura 25. Topografía de la mina San Antonio Óxidos a la altura del banco 3320. (A) Ubicación de sondajes. (B) Ubicación de sondajes, mapeos de pozos de tiro y bancos.

Los modelos de alteraciones del banco 3320 (Figura 26 A y B) son distintos, observándose zonas de alteración argílica (en el modelo nuevo) que no fueron identificadas en el modelo antiguo, en cambio en el modelo antiguo hay zonas con alteración argílica sobredimensionada. Se identifica en el modelo nuevo una tendencia estructural NE - SW de la alteración argílica producto del emplazamiento del pórfido orientación N - S y al contacto entre el metasedimento y el pórfido (Figura 27). La tendencia NE - SW de la alteración argílica está fuertemente influenciada por el control estructural del yacimiento, controlando la mineralización secundaria y la alteración, representada por la Falla Desquite - Estanque y un tramo de la Falla Manto Oliva, ambas con manteos 60 - 80° W. Este sistema de fallas aparentemente controla además el emplazamiento de varias apófisis tipo diques que el Pórfido Cobre genera hacia el Noreste de su núcleo central. Actualmente la división no tiene un modelo estructural dinámico del yacimiento San Antonio Óxidos del cual se pueda realizar un interpretación estructural de la zona que se está explicando (Banco 3320), el único modelo estructural es el mostrado en la Figura 11.

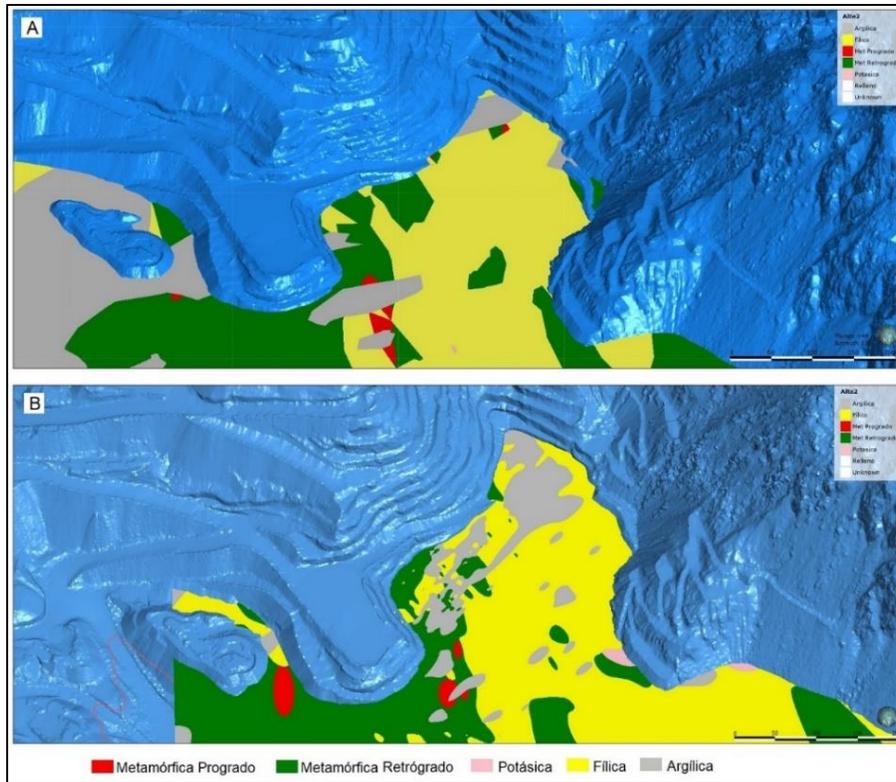


Figura 26. Modelo de alteraciones en el banco 3320. (A) Modelo de alteraciones con base de datos antigua. (B) Modelo de alteraciones con la base de datos realizada en la memoria.

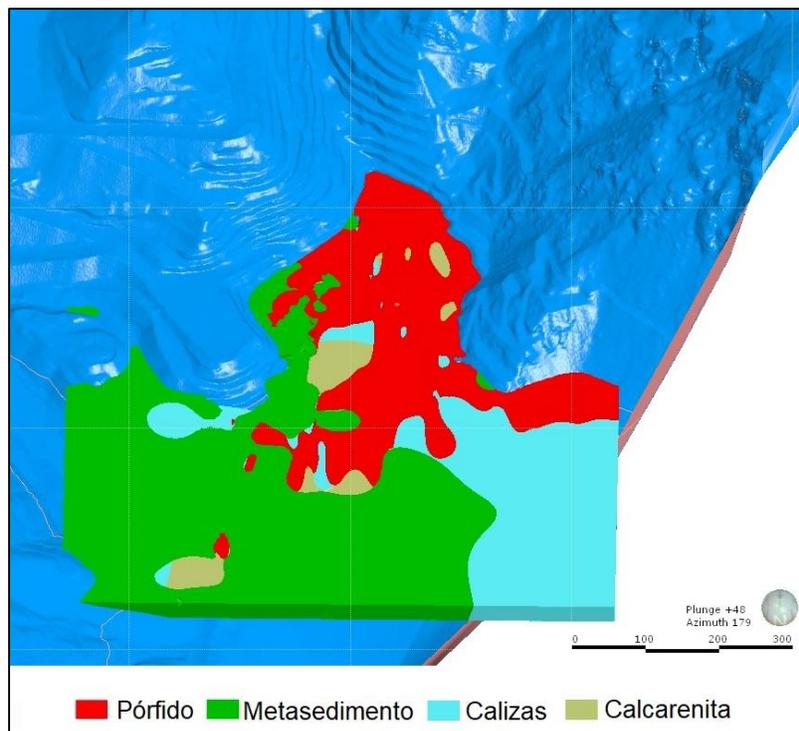


Figura 27. Modelo geológico de litologías de la mina San Antonio Óxidos.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Las muestras para análisis de DRX fueron capturadas desde las principales litologías con alteración argílica que ingresan al procesamiento hidrometalúrgico (Pórfido de cobre, Metasedimento y Brechas) con la finalidad de identificar las arcillas que componen a cada una de ellas, sin embargo, la muestra M3 fue capturada donde se encuentran 6 estructuras ubicadas en el banco 3370 debido a que las arcillas además de encontrarse en las litologías se encuentran relleno de estructuras.

Las muestras capturadas para análisis de consumo de ácido corresponden a las principales menas y gangas del yacimiento (Crisocolas, Arcillas con Cobre, Libethenita, Limonita, Goethita, Jarosita, Caolinita, Montmorillonita y Sericita). En el muestreo se dio prioridad a muestras monomineral, sin embargo para algunos minerales (Goethita, Jarosita, Arcillas con Cobre, Libethenita, Sericita) el muestreo se realizó en rocas con la mayor cantidad del mineral y poca alteración. El resultado del análisis a la muestra de Libethenita (M8) no es lo más representativo de ese mineral debido a su poco porcentaje en la roca (<10%). También hay dudas sobre los resultados de la muestra de Montmorillonita (M6), debido a que este mineral al ser una arcilla absorbente se esperaba un resultado de consumo de ácido alto, sin embargo, sus resultados fueron bajos (9 KgH/Ton) surgiendo dudas sobre su correcta identificación y muestreo.

Las muestras capturadas para análisis de cinética de lixiviación fueron realizadas a Pórfido de Cobre y Metasedimento con una intensidad alta de alteración argílica (>50% de arcillas). Los resultados de las muestras MLX1, MLX6 Y MLX7, no fueron correctos debidos a errores en su muestreo e identificación. La alteración de la muestra MLX1 no fue bien reconocida en el momento del muestreo teniendo 50% de alteración fílica y 50% de alteración argílica. La captura de las muestras MLX6 y MLX7 no fue correcta debido a la poca cantidad de menas en ellas (<5%) por lo tanto el análisis (%RecCuT) salió muy bajo y sin variación.

La descripción macroscópica de las muestras de consumo de ácido y cinética de lixiviación son similares, debido a que en ambos muestreos las rocas son las mismas litologías (Pórfido de Cobre y Metasedimento) con alteración argílica, por lo tanto, los porcentajes en su mineralogía primaria y de alteración son parecidos. Debido a su alto grado de alteración la identificación y porcentaje

de sus minerales fue difícil de definir al igual que sus texturas. También hubo dificultad en el reconocimiento de los tipos de arcillas por lo tanto solo se definió su % en la roca. Para solucionar estos problemas se realizaron Cortes Trasparentes, sin embargo, debido a su intensidad de alteración, los cortes se deshacían imposibilitando su confección.

El reconocimiento entre las esmécticas (Montmorillonita) y las arcillas con cobre fue complejo debido a su similitud, sin embargo Bobenrieth y Zamora (2008) sostienen que las Arcillas con Cobre son una mezcla de minerales arcillosos correspondientes principalmente a esmectita en su variedad de montmorillonita y secundariamente a caolinita las cuales contienen variables porcentajes de cobre en sus estructuras moleculares, por lo tanto, para este trabajo la montmorillonita fue considerada como arcilla con cobre.

La ubicación espacial de las muestras recolectadas para los 3 análisis se encuentra en la Figura 28 donde se compara sus ubicaciones en las fases de producción (Fase 1A, 1B, 1C) entre el modelo realizado en esta memoria (A) y el modelo antiguo (B). Las muestras recolectadas para DRX en la Fase 1A presentan diferencias de las zonas de alteración argílica entre un modelo y otro, donde el modelo nuevo identificó las zonas de muestreo con esta alteración y el modelo antiguo no. Además, no se realizaron muestreos de cinética de lixiviación en esta Fase (1A) debido a que no se explotara esta zona en el corto plazo (6 meses). En la Fase 1C fue donde se concentró la mayor parte de los muestreos debido a que es una zona compleja entre litologías y alteraciones, además es la zona de mayor ley en el yacimiento. En la Fase 1C, la muestra M3 (DRX) en ambos modelos no se encuentra en una zona de alteración argílica debido a que las arcillas se asocian a las estructuras, en cambio la muestra M5 (DRX) presenta diferencias entre los modelos donde el modelo antiguo exagera la zona de alteración argílica, las muestras de cinética de lixiviación (MLX1, MLX2 Y MLX3) se encuentra dentro de una zona de alteración argílica no identificada en el modelo antiguo. Finalmente, en la Fase 1B, las muestras de DRX (M6 y M7) y cinética de lixiviación (MLX6 y MLX7) se encuentran en una zona de alteración argílica no identificada en el modelo antiguo.

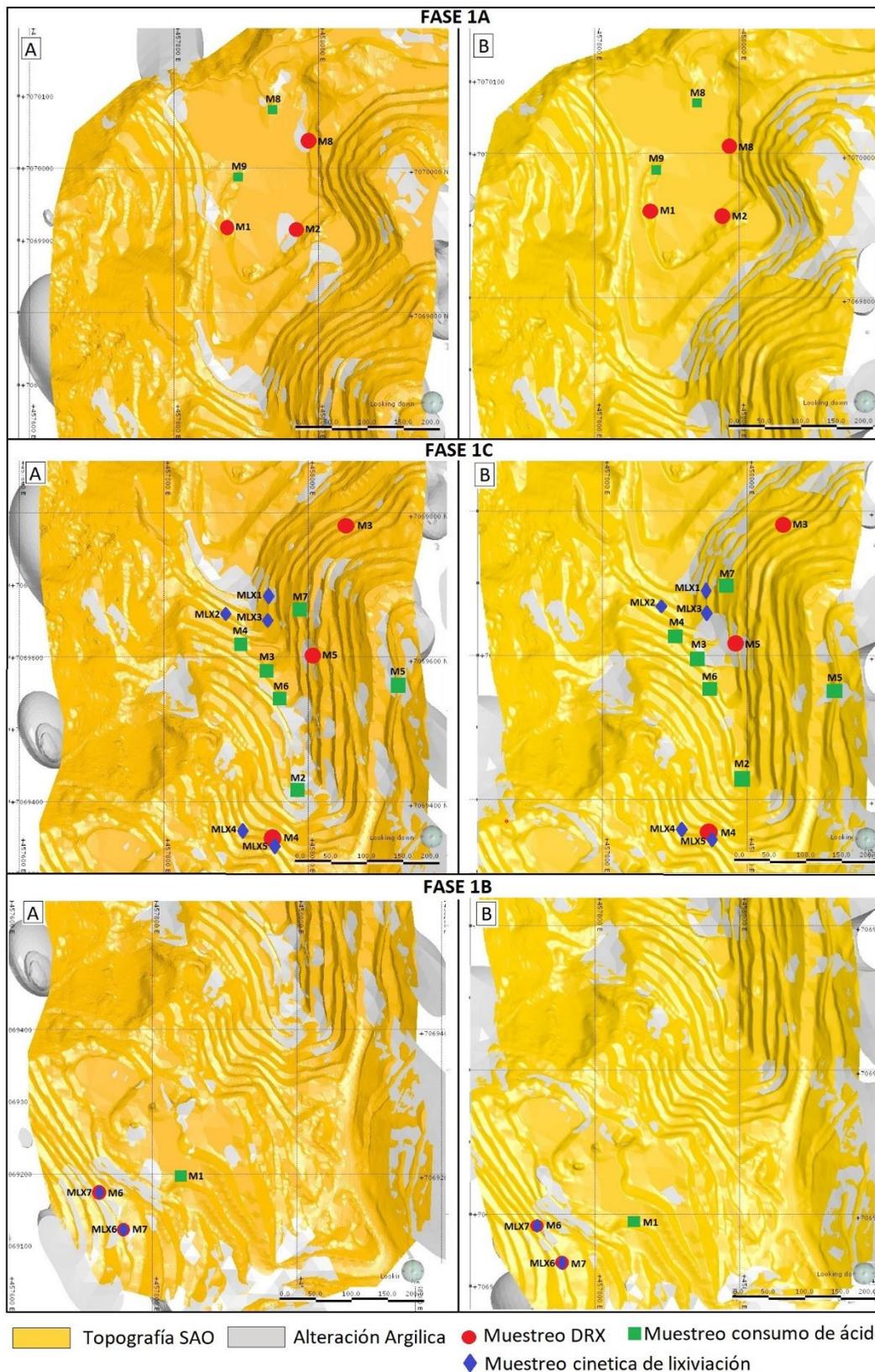


Figura 28. Mapa de ubicación espacial de las muestras recolectadas. (A) Modelo nuevo. (B) Modelo Antiguo (2016).

La Difractometría de Rayos X identificó en mayor cantidad a Illita y Caolinita seguidas de Sepiolita, Halloysita, Pirofilita, Berlinita, Alunita, Montmorillonita y Vermiculita. Estas arcillas se forman en un rango de pH 3 – 6 con T° < ~ 300 °C (Corbett y Leach 1998). La Illita se forma entre los 200 - 250°C con un pH 4 – 6. La Caolinita se forma entre 150 – 200 °C con un pH 3 – 4. La Pirofilita se forma entre 200 - 250°C y la Montmorillonita a T° <100 – 150 °C. La formación de minerales de arcilla se debe a un metasomatismo de H⁺ (lixiviación ácida) o a una hidrólisis de feldespatos, micas y arcillas. Los cationes K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ entre otros, son lixiviados de los minerales formadores de roca y son transferidos a la solución, mientras que el H⁺ entra en las fases sólidas. Con esta información y según la clasificación de Corbett y Leach (1998) (Figura 29) las arcillas identificadas son producto del proceso de alteración hidrotermal argílico que mediante hidrólisis destruye los minerales formadores de rocas (feldespatos).

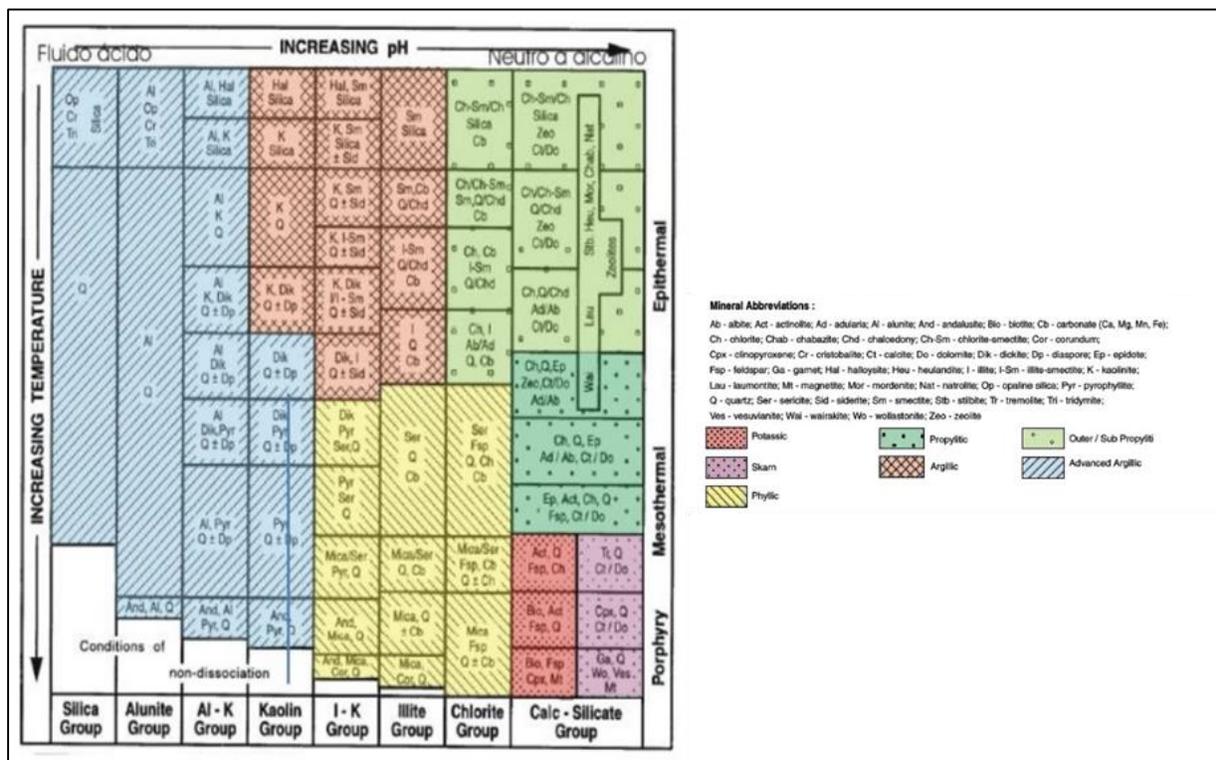


Figura 29. Clasificación para alteraciones hidrotermales (Corbett y Leach, 1998).

Estos resultados al ser comparados con los de Briceño (2011) del yacimiento Radomiro Tomic (principales arcillas identificadas fueron la esméctica, caolinita, clorita y arcillas con cobre) que señala que la génesis de las arcillas de Radomiro Tomic es producto la alteración supérgena debido

a que sus condiciones de formación son de bajas temperaturas (Esmectitas $T^{\circ} < 100^{\circ} \text{C}$), en comparación con las arcillas identificadas en esta memoria (Illita, Caolinita, Pirofilita, Halloysita, Montmorillonita) que son formadas a $T^{\circ} > 200^{\circ} \text{C}$ generadas por la acción de los fluidos hidrotermales sobre las rocas, sin embargo debido a la identificación de esmectitas (Montmorillonita) en el yacimiento no se descarta la formación de las arcillas también producto de la alteración supérgena. Por otra parte, al ser comparados estos resultados con los resultados de Guiliano (2018) (caracterización mineralógica de arcillas en el yacimiento Gaby mediante Difractometría de Rayos X: Illita, Caolinita, Clorita y Esmectitas en concentración variada), se evidencia una similitud con las arcillas identificadas en esta memoria, sin embargo sus resultados no son representativos de todo el yacimiento debido al bajo número de muestras analizadas, pero marcan un inicio en la caracterización de este tipo de minerales en Mina Gaby.

Los minerales que tienen el consumo de ácido más alto corresponden a las arcillas con cobre (115 KgH/Ton) debido a su alto contenido de esmectitas (montmorillonita) cuya propiedad principal es su capacidad de hidratación e hinchamiento, también la Crisocola (109 KgH/Ton) por ser un mineral generado de la mezcla de varios elementos, además son las principales menas extraídas del yacimiento. La limonita es la ganga con mayor consumo de ácido (54 KgH/Ton). Estos minerales afectan principalmente en la etapa de aglomerado y curado. El consumo de ácido de las arcillas favorece a la formación de glómeros de mayor tamaño debido a su capacidad de hidratación e hinchamiento. Las Arcillas con Cobre consumen ácido hinchándose y aumentando el tamaño de los glómeros que encapsulan a los minerales y al tener una estructura cristalina laminar no permiten que el ácido sulfúrico tenga contacto con ellos disminuyendo y/o imposibilitando la sulfatación de los minerales.

Esta información también coincide con las menas y gangas que ingresan en mayor cantidad al procesamiento hidrometalúrgico (Gráfico 9), las arcillas con cobre y la crisocola fueron las menas que entraron en mayor cantidad y de las gangas fueron las arcillas blancas con las limonitas. Esta información es obtenida de los mapeos geológicos que realiza personal de geología a los stocks de acopio de mineral. Los mapeos se realizaron a partir de junio de 2019 como respuesta a la problemática presentada en esta memoria surgiendo la necesidad de saber la mineralogía que ingresa al proceso hidrometalúrgico.

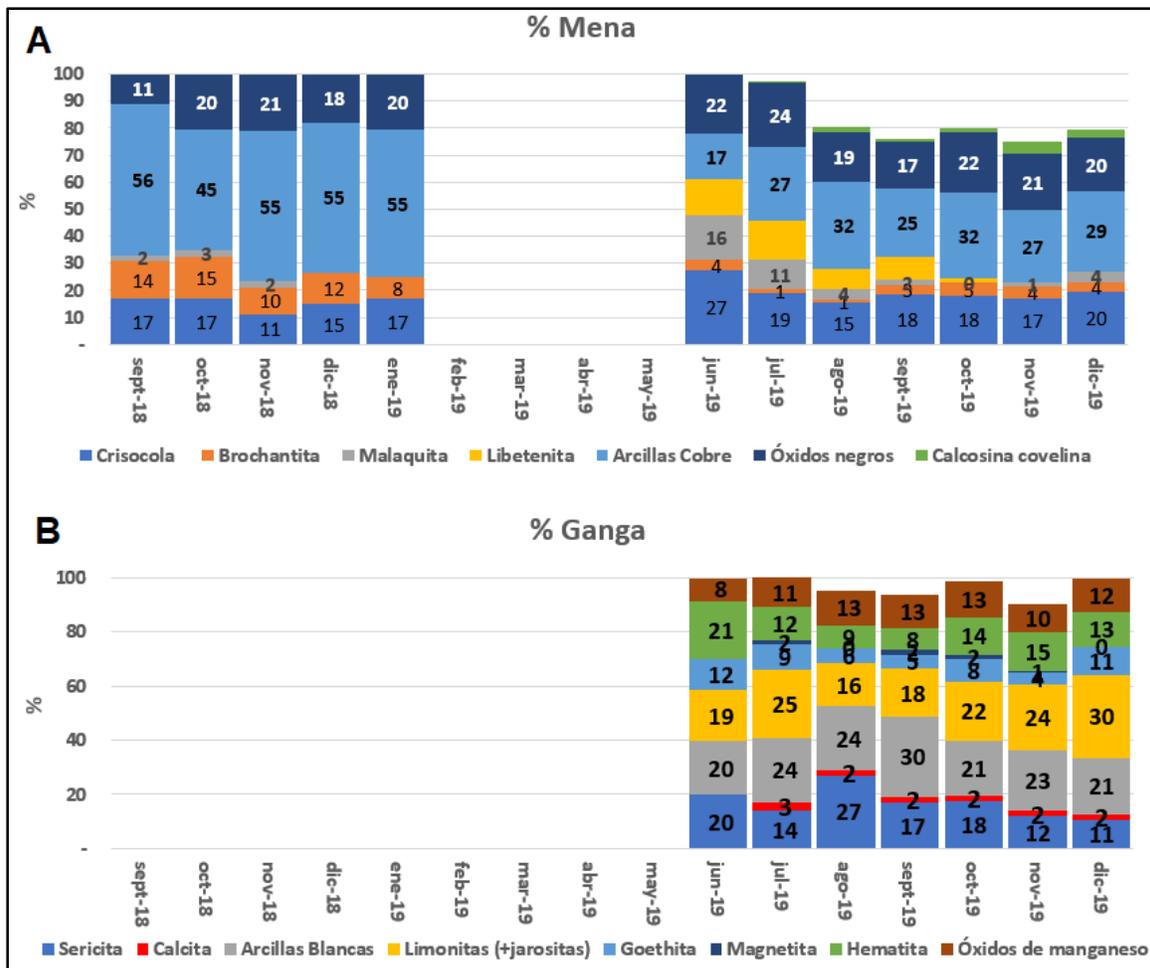


Gráfico 9. Cantidad de minerales que ingresaron al procesamiento hidrometalúrgico. (A) Cantidad de menas. (B) Cantidad de gangas. Información entregada por Superintendencia de Planta Hidrometalúrgica.

Briceño (2011) en sus resultados al igual que en esta memoria, concluye que la capacidad de hinchamiento de las esmectitas (específicamente Montmorillonita), produce un mayor consumo de ácido sulfúrico, ya que este, disuelto en agua, es incorporado a la estructura en capas de la arcilla. También sugiere que no sólo las Arcillas influyen en el consumo de ácido sino también el resto de las gangas como las limonitas.

Rojas (2010) en su memoria realizó un análisis del efecto de arcillas/finos en el proceso de lixiviación del yacimiento Radomiro Tomic, los resultados en su columna unitaria #005 indican que el consumo de ácido aumenta 2,22 KgH/Ton debido a la presencia de arcillas específicamente montmorillonita concluyendo que este tipo de arcillas incide en el aumento del consumo de ácido en el sistema debido a que incorpora el ácido a su estructura.

Las rocas con una cinética de lixiviación muy baja corresponden a las muestras de pórfido MLX6 y MLX7 de la fase 1B debido a no tener menas, por lo tanto, la recuperación de cobre es casi nula y no varía, entonces sus resultados no son considerados. Las muestras MLX3 y MLX4 tienen una cinética de lixiviación moderada y son las muestras con recuperación de cobre más bajas, debido a su (i) litología, ambas muestras corresponden a metasedimento y (ii) mineralogía, siendo las arcillas con cobre su mena principal. Con estos resultados se concluye que la mineralogía de arcillas (mena y ganga) y el metasedimento con alteración argílica son las variables geológicas que más impactan en la cinética de lixiviación. Esto se ve reflejado en los resultados de recuperación de cobre total en la pila de lixiviación (Gráfico 7) donde a partir de mayo 2019 hubo una caída en la recuperación producto del ingreso de rocas con mayor cantidad de metasedimento a la lixiviación (Gráfico 10) y el aumento de arcillas (Gráfico 8).

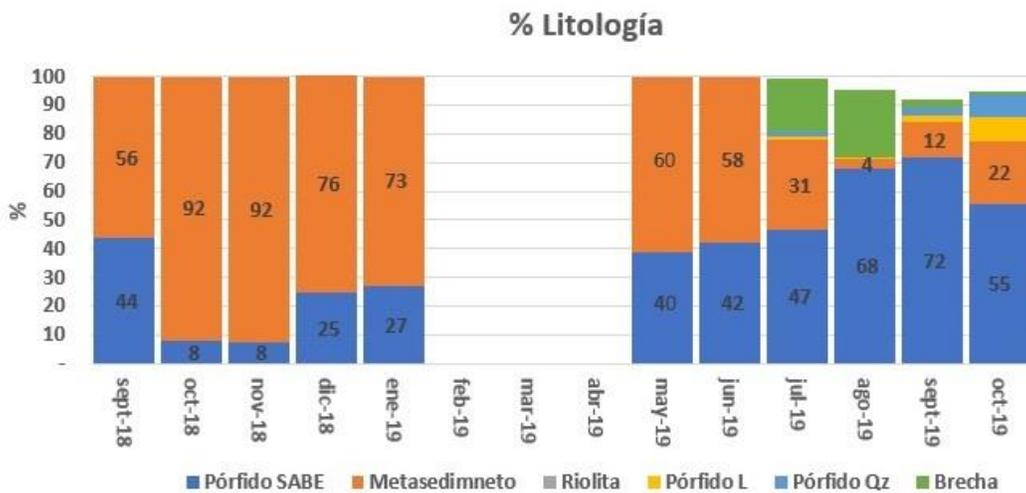


Gráfico 10. Porcentaje de litologías que ingresaron al procesamiento hidrometalúrgico. Información entregada por Superintendencia de Planta Hidrometalúrgica.

En la lixiviación las arcillas debido a su capacidad de hidratación e hinchamiento aumentan su tamaño sellando los espacios entre los granos comportándose como matriz impermeable entre ellos, no permitiendo que la solución lixivante traspase entre los minerales, incluso logrando sellar zonas de hasta varios metros generando el llamado “Efecto paraguas” el cual no permite que los minerales que se encuentren por debajo se lixivien disminuyendo la recuperación de CuT.

Briceño (2011) concluyó que el tamaño y forma de las arcillas (Caolinita y Montmorillonita) generan zonas impermeables al interior de la pila, promoviendo la disminución de la dinámica de las soluciones reduciendo la porosidad canalizando las soluciones al igual que en mina San Antonio Óxidos donde la disminución en la percolación es generado por la capacidad de hidratación e hinchamiento de las arcillas (Illita, Caolinita, Montmorillonita), también concluye que la disminución en la recuperación de cobre en las pilas de lixiviación es producto de la alta capacidad de intercambio catiónico de algunas arcillas, específicamente las esmectitas (Montmorillonita) las cuales absorben y adsorben cationes de interés económico (Cu^{2+}) en comparación con los resultados de este trabajo que asocian que la disminución en la recuperación de cobre es producto de la nula percolación de la solución lixivante en zonas de la pila producto de su impermeabilización generada por las arcillas (Illita, Caolinita, Montmorillonita) y el metasedimento.

Rojas (2010) concluyó que el deterioro de las propiedades hidrodinámicas de las pilas de lixiviación (percolación, canalización, aposamientos) se debe principalmente por la capacidad de hidratación e hinchamiento de las arcillas al igual que en esta memoria.

Una de las limitaciones de los resultados de consumo de ácido y cinética de lixiviación es la nula información de otros estudios/yacimientos para compararlos, sin embargo, realizar una comparación de los resultados con el de otros yacimientos es complicado ya que el comportamiento metalúrgico, de acuerdo a sus características mineralógicas, nunca es igual entre un yacimiento y otro (Domic, 2001). Por lo tanto, se recomienda realizar análisis hidrometalúrgicos en los disparos producción periódicamente para entender el comportamiento metalúrgico de sus minerales.

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis general que establece que los minerales que componen a la alteración argílica (illita, caolinita, montmorillonita) son los causantes de los problemas hidrometalúrgicos, incluso podrían provocar el cierre del yacimiento debido a sus implicancias en el procesamiento hidrometalúrgico e impacto económico en el negocio minero. Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Briceño (2011) y Rojas (2010), quienes realizan un estudio similar en el yacimiento Radomiro Tomic y señalan que las arcillas de la alteración argílica provocan diversos problemas en el procesamiento hidrometalúrgico.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se capturaron 8 muestras para DRX, 9 para consumo de ácido y 7 para cinética de lixiviación, todas relacionadas con la alteración argílica.

Las arcillas identificadas por DRX corresponden a Illita, Caolinita, Halloysita, Pirofilita y Montmorillonita, las cuales se encuentran en los pórfidos y metasedimento, sin embargo, la Montmorillonita se encuentra principalmente en el metasedimento. Estas arcillas son formadas por fluidos hidrotermales asociados a la alteración argílica y actividad supérgena, se formaron en un ambiente ácido en un rango de pH 3 - 6 a temperaturas menores a 300°C.

Las menas con consumo de ácido más alto corresponden a las arcillas con cobre (115 KgH/Ton) debido a su alto contenido de montmorillonita, cuya propiedad principal es su capacidad de hidratación e hinchamiento, también la Crisocola (109 KgH/Ton) por ser un mineral generado por la mezcla de variados elementos. La ganga con mayor consumo de ácido son las limonitas (54 KgH/Ton). Estos minerales a partir de mayo 2019 generaron un aumento en el consumo de ácido hasta 43 KgH/Ton en el mes de agosto 2019 y una disminución de la sulfatación en un 17% y 15% a las 42 y 72 horas, además económicamente aumentaron los gastos de ácido sulfúrico en un 68%.

Las muestras con la cinética de lixiviación más baja corresponden a las muestras de Metasedimento debido a que su %RecCuT tiene un aumento moderado, estas muestras tienen arcillas con cobre como mena principal. Esta litología y mena fueron las principales variables que afectaron en el %Rec CuT en la lixiviación, disminuyéndola en un 15% en el mes de mayo 2019.

El modelamiento geológico de la alteración argílica indica con mayor exactitud las zonas de alteración argílica, diferenciándose del modelo antiguo, en sus distribuciones, dimensiones y datos utilizados (10.688). Además, su control de formación está relacionado con las estructuras y los contactos litológicos entre Pórfido y Metasedimento.

Con los resultados obtenidos se concluye que a inicios de mayo 2019 las arcillas comenzaron a generar problemas en el proceso hidrometalúrgico debido al ingreso principalmente de metasedimento con alteración argílica compuesto por Arcillas con Cobre, Caolinita, Illita, como sus arcillas principales.

Cómo recomendaciones se proponen:

Realizar más análisis de DRX a Metasedimento para definir si existen otras especies de arcillas.

Continuar con mapeos geológicos de bancos y pozos de tiro constantemente con el objetivo de actualizar la base de datos que se utiliza para el modelamiento geológico.

Describir visualmente el contenido de arcillas en los stocks, clasificándolos en porcentaje (0 a 100%) y priorizar el envío de rocas a la planta con un porcentaje menor a un 35% de arcillas y un contenido mayor en pórfido que Metasedimento (mayor o igual a 60% Pórfido).

Utilizar para la planificación el modelo de alteraciones realizado en esta memoria y solicitar a geología su actualización semanalmente.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

ALMONACID, T. 2007. Geología de la zona de alteración hidrotermal de Domeyko y del yacimiento de cobre Dos Amigos, Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 16p.

BOBENRIETH, L. ZAMORA, A. 2008. Informe mapeo geológico de superficie. Informe Inédito División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 35 - 106 págs.

BRANTT, J. 2011. Informe estimación de recursos geológicos óxidos. Informe Inédito. División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 50p.

BRICEÑO, C. 2011. Caracterización y distribución de arcillas en el yacimiento Radomiro Tomic y sus impactos en procesos metalúrgicos. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Católica del Norte. 195 - 200p.

CASTILLO, F. 2012. Modelos geológicos y estimaciones de recursos CuT sulfuros 2012 y modelo integrado de estimación CuT Óxidos - Sulfuros 2012. Proyecto San Antonio Óxidos, CODELCO. Informe Inédito. División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 1 - 132.

CASTILLO, F. ZULETA, M. 2012. Informe del modelo geotécnico 3D y estimación del modelo de bloques geotécnico 3D Línea de óxidos, etapa básica. Informe Inédito. División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 1 - 62.

CASTILLO, F. 2013. Modelo geológico y estimación de recursos CuT (%) Cavidad in situ. Informe Inédito. División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 1 - 30p.

CAMUS, F. 2002. The Andean porphyry systems. Vol. 4, de Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration. Australia: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania. 33p.

CÁRDENAS, F. DÍAZ, M. GUAJARDO, C. OLIVA, M. 2000. Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas. Informe de estudiantes. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1 - 8.

CARREÑO, M. 2012. Planificación de producción catódica, área hidrometalurgia, Planta División El Salvador. Gerencia Minas, CODELCO. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. 10 - 13p.

CHARRIER, R. FARIAS, M. MAKSAEV, V, 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. 1 - 32p.

CORNEJO, P. MPODOZIS, C. RAMIREZ, F. TOMLINSON, A. 1993. Estudio geológico de la región de Potrerillos y El Salvador (26 – 27° Lat. S), Santiago, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería – CODELCO, Register report IR - 93 - 01, 258 pp.

CORNEJO, P. TOSDAL, M. MPODOZIS, C. RAMIREZ, F. TOMLINSON, 1997. El Salvador, Chile Porphyry Copper Deposit Revisited: Geologic and Geochronologic Framework. 1 - 34p.

CORNEJO, P. MPODOZIS, C. MATTHEWS, S. 1999. Geología y Evolución Magmática del Distrito Indio Muerto y Yacimiento El Salvador. Servicio Nacional de Geología y Minería - CODELCO, Informe Registrado, IR - 98 - 14. 99 p., 1 mapa escala 1:25.000. Santiago. 8p.

CORBETT, G. J., & LEACH, T. M. 1998. Southwest pacific rim gold–copper systems: structure, alteration and mineralization. Society of Economic Geologists, Special Pu (May 1997). 126 - 177.

DOMIC, M. 2001. Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones. 140p.

- GARCIA, E. SUAREZ, M. 2000.** Las arcillas: Propiedades y usos. (Diapositiva) Universidad Complutense Madrid. 3 - 8.
- GARREAUD, R. RUTLLANT, J. 2003.** Coastal lows in north - central Chile: Numerical simulation of a typical case. Mon. Wea. Rev. Investigacion, Department of Geophysics, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 1 - 18p.
- GEOESTIMA, 2016.** Modelo de recursos minerales PSAI. Informe Inédito. División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 85 - 135.
- GIULIANO, M. 2018.** Caracterización mineralógica de arcillas en yacimientos del norte de Chile mediante difracción de rayos x. Memoria para optar al título de Geólogo. Facultad de ingeniería y ciencias geológicas, Universidad Católica del Norte. 112p.
- GUSTAFSON, B. AND HUNT, J. 1975.** The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: Econ. Geol., v. 70, p. 857 - 912.
- HARRINGTON, H. 1961.** Geology of parts of Antofagasta and Atacama Provinces, Northern Chile. American Association Petroleum Geologists, Bulletin 45(2): 169 - 197.
- JULIÁ, C. MONTECINOS, S. MALDONADO, A. 2008.** Características Climáticas de la Región de Atacama. Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 32p.
- KÖPPEN, W. 1948.** Climatología. Fondo de Cultura Económica, México. Primera Ed. 478 pp.
- MARCH, W. 1933.** Ore deposits at Potrerillos, Chile. - XVI International Geological Congress, "Copper resources of the world", p. 485 - 500. Washington.
- MARSH, T. EINAUDI, M. AND MCWILLIAMS, M. 1995.** Ar/Ar geochronology of gold and copper mineralization in the Potrerillos district, Atacama region, Chile [abs.]: Geol. Soc. Amer., Abs. Prog., v. 27, no. 6, p. A - 329.
- MARTICORENA, L. TAPIA, L. 1981.** Geología, facies y bioestratigrafía de la mina de Potrerillos. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 244 p., 4 Láms. Santiago.
- MAKSAEV, V. 2001.** Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. 38p.
- MAKSAEV, V. TOWNLEY, B. PALACIOS, C. Y CAMUS, F. 2007.** «Metallic ore deposits.» En Geology of Chile, editado por Teresa Moreno y Wes Gibbons, 179 - 1999. Londres: The Geological Society.
- MILLER, A. 1976.** The Climate of Chile. Climates of Central and South America. W. Schwerdtfeger. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company: 113 - 145.
- MORTIMER, C. 1973.** The cenozoic history of the southern atacama desert, Chile. Journal of Geological society of London, Vol. 129, p. 505 - 526.
- MÜLLER, G. Y PERELLÓ, L. 1982.** Geología regional y bioestratigrafía del Jurásico marino al occidente del Salar de Pedernales (26°15' - 26°24'S, 69°15' - 69°30'W). 316p.
- MUNCHMEYER, C. 1996.** Exotic Deposit - Products of lateral migration of supergene solutions from Porphyry Copper Deposits. 1 - 16p.
- NIEMEYER, H. MUNIZAGA, R. 2008.** Structural control of the emplacement of the Portrerillos porphyry copper, central Andes of Chile. 1 - 10p.
- OLSON, S. 1983.** Geology of the Potrerillos district, Atacama, Chile. Ph.D. Thesis.

Stanford University, 190 p.

OLSON, S. 1989. The stratigraphic and structural setting of the potrerillos porphyry copper district, northern Chile. *Revista Geológica de Chile* 16 (1), 3–29p.

OYARZÚN, J. 2009. Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. [En línea] *Geología y Yacimientos Minerales*. <aulados.net>. [Consulta: 5 y 6 de Julio 2010].

ROJAS, F. 2010. Análisis del efecto de arcillas/finos en el proceso de lixiviación de Radomiro Tomic. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Universidad Católica de Valparaíso. 14p

SILLITOE, R. 1981. «Regional aspects of the Andean porphyry copper belt in Chile and Argentina.» *Institution of Mining and Metallurgy Transactions* 90: 15 - 36p.

SULLIVAN, J. 2011. Modelo De Recursos Geológicos. (Informe Inédito) Proyecto San Antonio Óxidos, CODELCO. 1 - 108p.

TOMLINSON, A. 1994. Relaciones entre el Porfido Cuprifero y la falla inversa de la mina de potrerillos: un caso de intrusión sintectónica. 1 - 5p.

TOMLINSON, A. CORNEJO, P. MPODOZIS, C. 2003. Geología de la Hoja Potrerillos, región de Atacama: Escala 1:100.000. Versión 1.0 Santiago: Sernageomin.

THOMAS, B. AND RIQUELME, R. 2009. Contrasting Landscape Evolution and Development of Supergene Enrichment in the El Salvador Porphyry Cu and Potrerillos - El Hueso Cu - Au Districts, Northern Chile. 5p.

WOLF, D. 1980. La difracción de rayos x y su aplicación en la geología y el estudio de materias primas. *El Ingeniero Geólogo*, 17p.

ZULETA, M. 2011. Informe modelo geológico Óxidos. Informe Inédito, División El Salvador, CODELCO, Proyecto San Antonio Óxidos. 1 - 61p.

ANEXOS

	Superintendencia de Geología y Geotecnia Mina San Antonio Óxidos		Geólogo/a: _____	Hoja: _____ De: _____
	N° Banco: _____ Escala 1:500		Fecha : _____	Fase: _____

Cartilla Mapeo Geológico de bancos

ANEXO B

• **DESCRIPCION MINERALES PARA ANALISIS DE CONSUMO DE ÁCIDO**

	Mineral	Crisocola
	Formula	$(Cu,Al)_4H_4(OH)_8Si_4O_{10} \cdot nH_2O$
	Litología	Indeterminada
	Alteración	indeterminada
	Zona mineral	Zona de oxidos
	Habito	Masivo, nodular, botroidal
	Color	Verde a azul
	Brillo	vitreo
	Raya	blanca
	Dureza	2,5 - 3,5
	Clivaje/fractura	Fractura concoidal
M1	Observación	En conjunto con arcillas y limonitas

	Mineral	Limonitas
	Formula	variable
	Litología	Indeterminada
	Alteración	indeterminada
	Zona mineral	Zona lixiviada
	Habito	Botroidal, terroso
	Color	Amarillo rojizo, pardo anaranjado.
	Brillo	Mate, terroso
	Raya	Pardo amarillento
	Dureza	3,5 - 4 (varia)
	Clivaje/fractura	Fractura desigual
M2	Observación	

	Mineral	Goethita
	Formula	$HFeO_2$
	Litología	Indeterminada
	Alteración	indeterminada
	Zona mineral	Zona lixiviada
	Habito	Acicular radial, reniforme, hojoso,masivo
	Color	Pardo amarillento a pardo oscuro
	Brillo	Adamantino a mate
	Raya	Pardo amarillento
	Dureza	5 - 5,5
	Clivaje/fractura	Fractura desigual
M3	Observación	En conjunto con jarosita y hematita.

	Mineral	Jarosita
	Formula	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
	Litología	indeterminada
	Alteración	indeterminada
	Zona mineral	Zona lixiviada
	Habito	Costras cristalinas, tabular, fibroso, granular, terroso,
	Color	Amarillo ambar a marron oscuro
	Brillo	Vitreo, subadamantino, resinoso
	Raya	Amarillo palido
	Dureza	2,5 – 3
	Clivaje/fractura	Fractura desigual a concoidal
M4	Observación	En conjunto con limonitas

	Mineral	Caolinita
	Formula	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	Litología	Indeterminada
	Alteración	Argílica
	Zona mineral	Zona de oxidos
	Habito	Terroso
	Color	Blanco, pardo, grisaceo, amarillento
	Brillo	terroso
	Raya	Blanca
	Dureza	1,5 - 2
	Clivaje/fractura	Clivaje perfecto
M5	Observación	

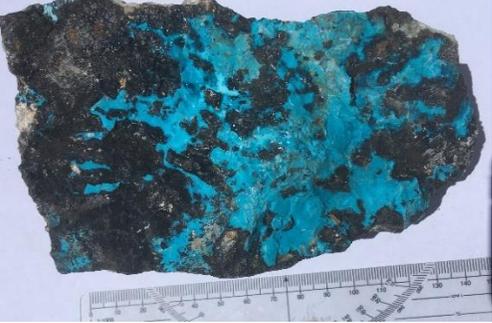
	Mineral	Montmorillonita
	Formula	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$
	Litología	Porfido
	Alteración	Argílica
	Zona mineral	Zona de oxidos
	Habito	Terroso
	Color	Blanco, gris, amarillo, verdoso, pardo
	Brillo	Terroso
	Raya	Blanca
	Dureza	1,5 – 2
	Clivaje/fractura	Clivaje perfecto
M6	Observación	Su color varia

	Mineral	Arcillas con Cu
	Formula	Variada
	Litología	Metasedimento
	Alteración	Argílica
	Zona mineral	Variada
	Habito	Terroso
	Color	Verdoso, amarillento, pardo
	Brillo	Terroso
	Raya	Variada
	Dureza	2
	Clivaje/fractura	Indeterminada
	M7	Observación	Minerales de arcilla absorbentes

	Mineral	Libethenita
	Formula	$Cu_2PO_4(OH)$
	Litología	Porfido
	Alteración	Indeterminada
	Zona mineral	Zona de oxidos
	Habito	Cristales prismaticos
	Color	Verde oscuro
	Brillo	Vitreo, adamantino
	Raya	Verde brillante
	Dureza	4
	Clivaje/fractura	Fractura concoidal
	M8	Observación

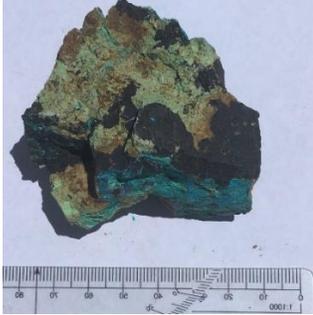
	Mineral	Sericita
	Formula	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
	Litología	Pórfido
	Alteración	Fílica
	Zona mineral	Variada
	Habito	Laminar
	Color	Blanco amarillento
	Brillo	Sedoso a perlado
	Raya	Blanca
	Dureza	2
	Clivaje/fractura	Exfoliacion perfecta
	M9	Observación	En conjunto con cuarzo

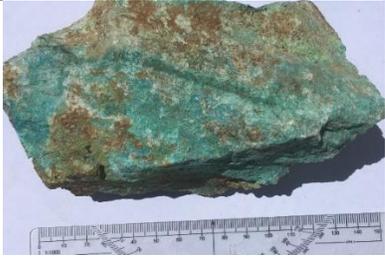
• DESCRIPCION MUESTRAS DE ANALISIS CINETICA DE LIXIVIACION

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Negro, celeste
	Minerales principales	Cuarzo - Plagioclasa - Sericita
	Minerales mena	Crisocola - Psemaludomalaquita - Calcosina
MLX1	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco azulado
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales mena	Crisocola - Arcillas con Cu - Linarita
MLX2	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Metasedimento
	Alteración	Argílica
	Textura	Granoblastica
	Color	Verde grisáceo
	Minerales principales	Actinolita, clorita, biotita, epidota
	Minerales mena	Arcillas con Cobre - Wad
MLX3	Clasificación	Hornfels de clorita y actinolita

	Litología	Metasedimento
	Alteración	Argílica
	Textura	Granoblástica
	Color	Gris con tonalidades verdosas
	Minerales principales	Actinolita, clorita, biotita, epidota
	Minerales mena	Arcillas con Cu - Wad - Crisocola
MLX4	Clasificación	Hornfels de clorita y actinolita

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco celeste
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales mena	Crisocola - Pseudomalaquita
MLX5	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco verdoso
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales mena	Arcillas con cobre
MLX6	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco amarillento
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Sericita
	Minerales mena	Ganga
MLX7	Clasificación	Granodiorita

• DESCRIPCION MUESTRAS DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco grisáceo
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Sericita
	Minerales mena	Sericita, limonitas
M1	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Gris Verdoso
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales mena	Arcillas con cobre
M2	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Vetas
	Alteración	Argílica
	Textura	
	Color	Blanco
	Minerales principales	Arcillas
	Minerales mena	ganga
M3	Clasificación	Vetas de arcillas

	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco grisáceo
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales de mena	Arcillas con Cobre
M4	Clasificación	Granodiorita

	Litología	Metasedimento
	Alteración	Argílica
	Textura	Granoblástica
	Color	Gris con tonalidades verdosas
	Minerales principales	Actinolita, clorita, biotita, epidota
	Minerales de mena	Arcillas con Cobre
M5	Clasificación	Hornfels de clorita y actinolita

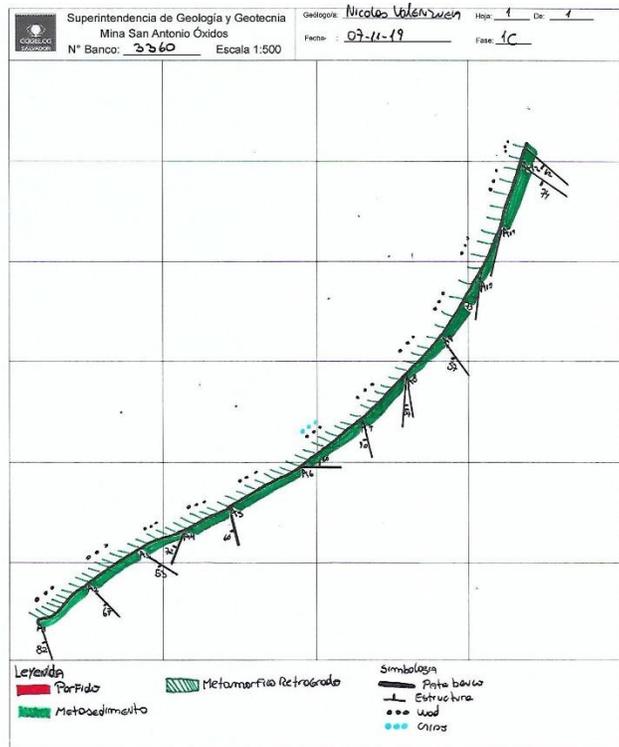
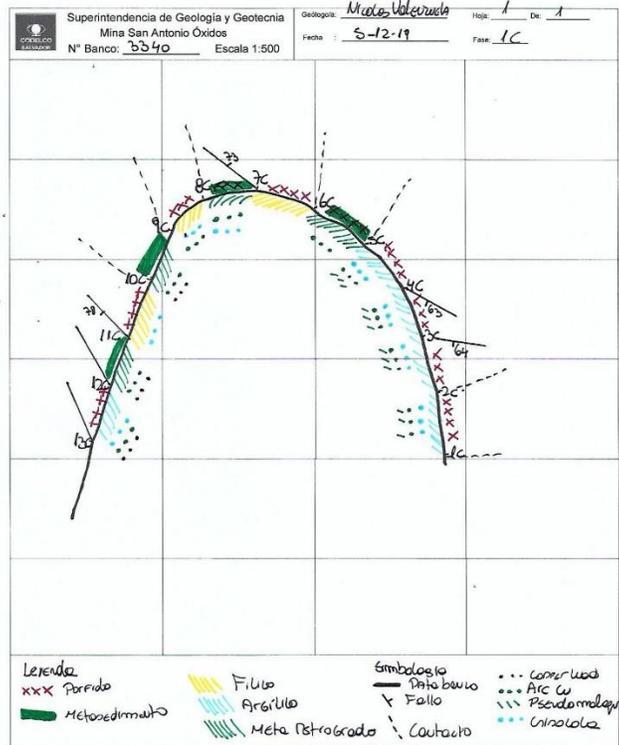
	Litología	Metasedimento
	Alteración	Argílica
	Textura	Granoblástica
	Color	Gris con tonalidades verdosas
	Minerales principales	Actinolita, clorita, biotita, epidota
	Minerales de mena	Arcillas con cobre
M6	Clasificación	Hornfels de clorita y actinolita

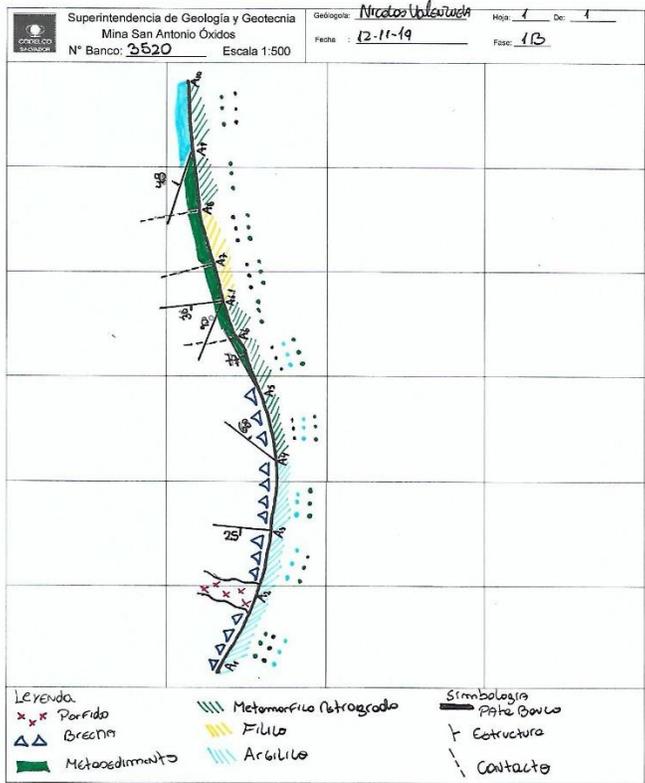
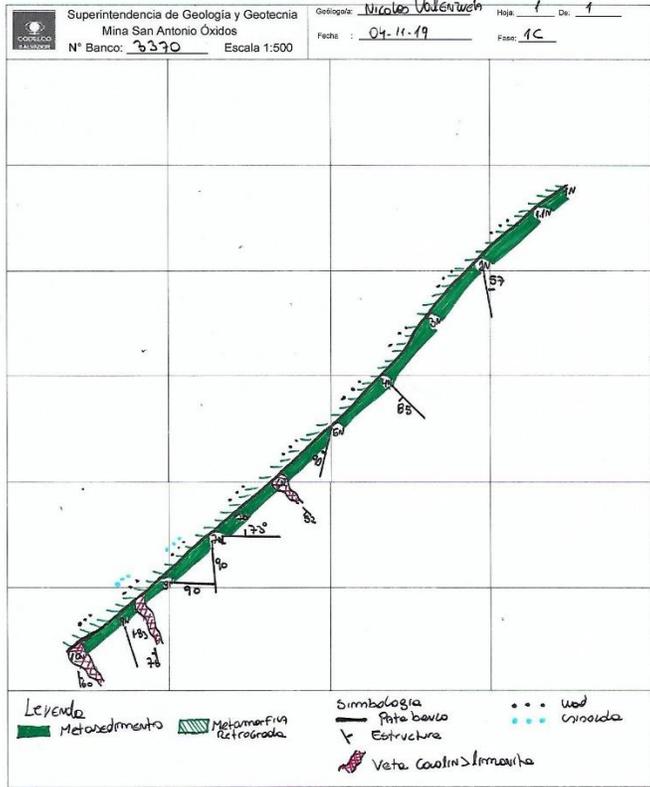
	Litología	Pórfido
	Alteración	Argílica
	Textura	Porfídica
	Color	Blanco grisáceo
	Minerales principales	Plagioclasa, Cuarzo, Biotita
	Minerales de mena	Libethenita
M7	Clasificación	Granodiorita

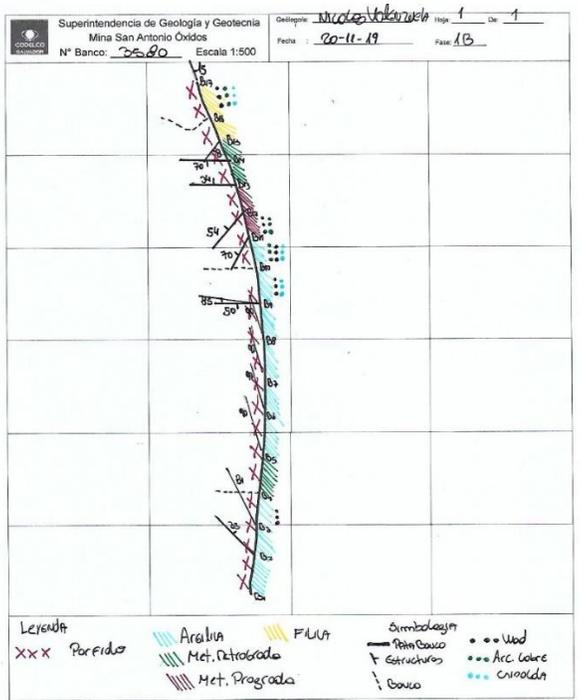
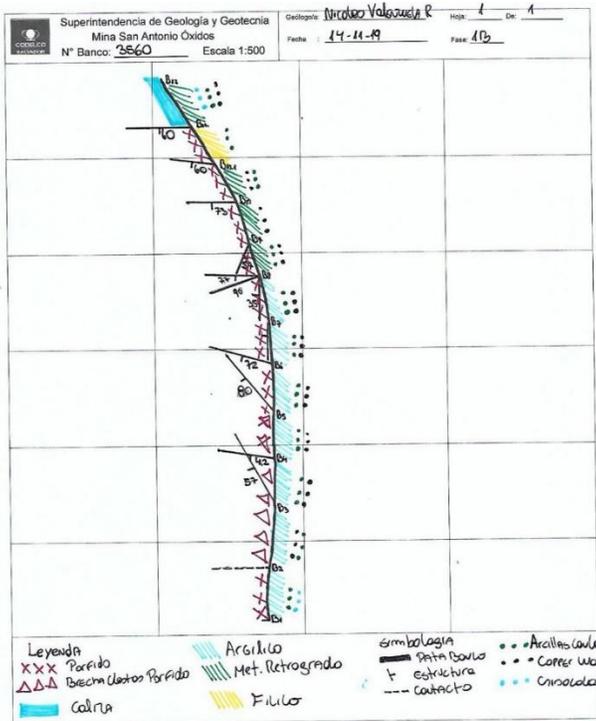
	Litología	Brechas
	Alteración	Argílica
	Textura	Brechosa
	Color	Blanco grisáceo
	Minerales principales	Biotita, especularita, clorita
	Minerales de mena	Ganga
M8	Clasificación	Brecha Ígnea

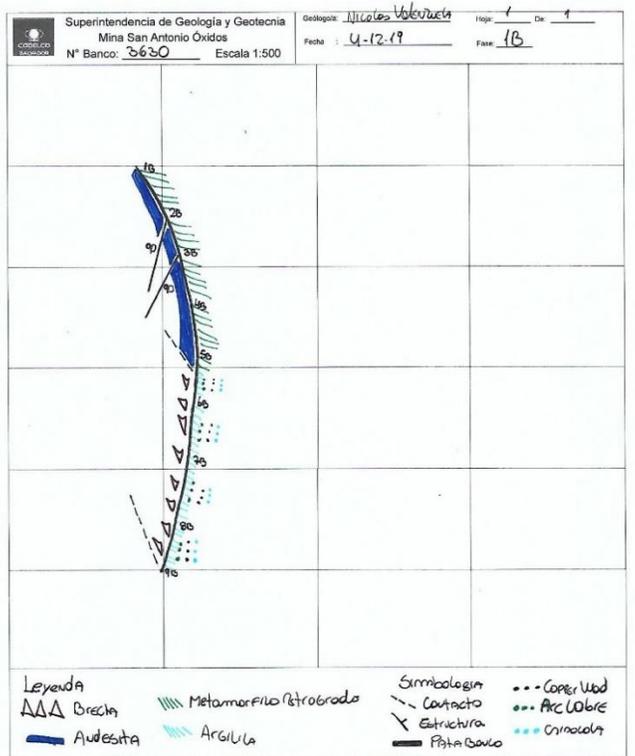
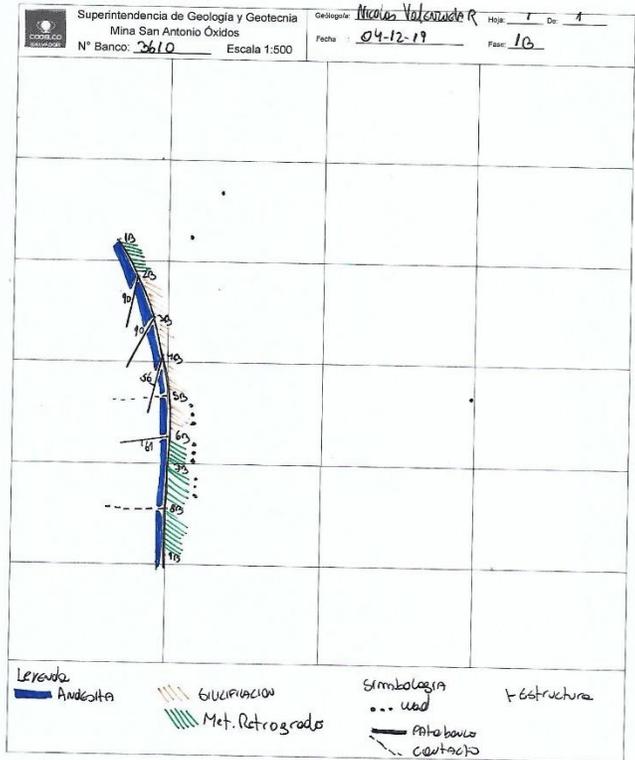
ANEXO C

MAPEOS DE BANCOS









ANEXO D

RESULTADOS CONSUMO DE ÁCIDO

• **M1 Crisocola**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M1							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				41		
0.5	25.88	25.88	46	48	54	2	2
1.0	30.56	28.22	50	53	68	2	2
1.5	36.28	32.25	57	60	77	2	2
2	41.48	36.87	66	69	86	2	2
4	45.24	41.05	73	77	94	2	2
6	50.84	45.95	82	86	103	2	2
8	52.92	49.43	88	92	109	2	2
12	54.22	51.83	92	97	110	2	2
22	54.22	53.02	94	99	113	2	2
32	54.74	53.88	96	101	115	2	2
42	54.34	54.11	96	101	117	2	2
52	54.60	54.36	97	102	117	2	2
62	54.60	54.48	97	102	117	2	2
72	54.86	54.67	97	102	118	2	2

Tabla 1. Resultados consumo de ácido en Crisocola.

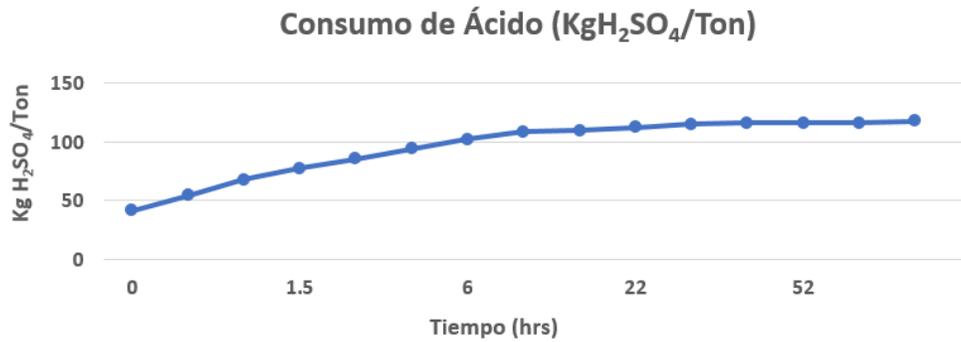


Gráfico 1. Resultados consumo de ácido de la Crisocola según tiempo (Hrs) de análisis.

La Crisocola es una de las menas principales del yacimiento. Dentro de la primera hora de análisis la Crisocola tiene un consumo de ácido alto de 41 - 68 KgH/Ton, luego a las 6 horas de análisis el consumo de ácido aumenta el doble hasta 103 KgH/Ton y finalmente a las 42 horas el consumo de ácido se estabiliza hasta valores de 118 KgH/Ton.

• **M2 Limonitas**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M2							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				28		
0.5	6.38	6.38	26	47	39	4	4
1.0	7.42	6.90	29	51	43	6	6
1.5	7.68	7.29	30	54	43	6	6
2	8.20	7.75	32	57	46	6	6
4	8.58	8.16	34	60	47	6	6
6	8.72	8.44	35	62	49	6	6
8	9.10	8.77	36	64	50	6	6
12	9.10	8.94	37	66	50	6	6
22	9.30	9.12	38	67	54	5	5
32	9.50	9.31	39	68	54	6	6
42	9.76	9.53	40	70	56	6	6
52	10.02	9.78	41	72	56	6	6
62	10.08	9.93	41	73	58	6	6
72	10.14	10.03	42	74	59	6	6

Tabla 2. Resultados consumo de ácido en Limonitas.

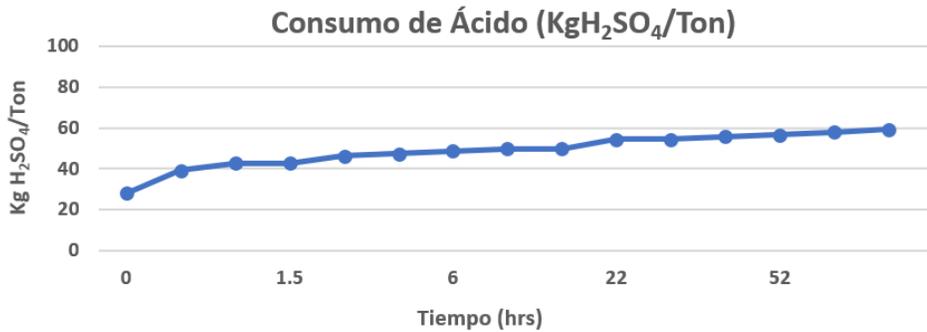


Gráfico 2. Resultados consumo de ácido de las Limonitas según tiempo (Hrs) de análisis.

Las Limonitas corresponden a una de las mineralogías de ganga de mayor abundancia en el yacimiento, se encuentran estructuras producto de la actividad supérgena. Dentro de la primera hora de análisis las Limonitas tiene un consumo de ácido moderado de 28 - 43 KgH/Ton, luego a las 6 horas de análisis el consumo de ácido aumenta hasta 49 KgH/Ton y finalmente a partir de las 22 hrs el consumo de ácido comenzó a aumentar lentamente desde los 54 KgH/Ton hasta las 59 KgH/Ton.

- **M3 Goethita**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M3							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				17		
0.5	1.44	1.44	10	16	26	12	12
1.0	1.44	1.44	10	16	31	18	18
1.5	1.70	1.57	11	17	35	20	20
2	1.82	1.70	12	19	39	20	20
4	2.46	2.08	15	23	45	19	19
6	2.48	2.28	17	25	46	20	20
8	2.72	2.50	18	28	47	18	18
12	3.00	2.75	20	30	47	17	17
22	3.00	2.87	21	32	47	16	16
32	3.00	2.94	21	32	48	16	16
42	3.00	2.97	22	33	48	16	16
52	3.12	3.04	22	34	48	16	16
62	3.26	3.15	23	35	50	15	15
72	3.52	3.34	24	37	50	15	15

Tabla 3. Resultados consumo de ácido en Goethita.

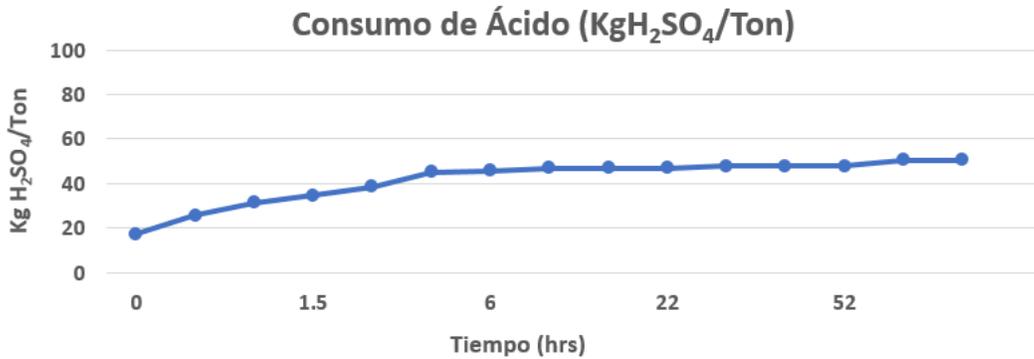


Gráfico 3. Resultados consumo de ácido de la Goethita según tiempo (Hrs) de análisis.

La Goethita corresponde a un mineral perteneciente a las Limonitas, sin embargo hay zonas en la mina donde este mineral se encuentra solo y en abundancia, abarcando zonas que cubren gran porcentaje de los disparos de producción. En las primeras horas de análisis (0 - 4hrs) la Goethita tiene un consumo de ácido que va aumentando gradualmente de 17 - 45 KgH/Ton, luego a partir de las 6 horas de análisis el consumo de ácido aumenta lentamente desde 46 KgH/Ton hasta 50 KgH/Ton a las 72 hrs.

- **M4 Jarosita**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M4							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				9		
0.5	0.26	0.26	33	87	9	33	33
1.0	0.40	0.33	41	110	9	26	26
1.5	0.40	0.37	46	122	9	24	24
2	0.40	0.38	48	128	9	23	23
4	0.40	0.39	49	130	9	22	22
6	0.40	0.40	49	132	9	22	22
8	0.40	0.40	50	133	9	22	22
12	0.40	0.40	50	133	9	22	22
22	0.40	0.40	50	133	9	22	22
32	0.40	0.40	50	133	9	22	22
42	0.40	0.40	50	133	10	22	22
52	0.40	0.40	50	133	10	26	26
62	0.40	0.40	50	133	10	26	26
72	0.40	0.40	50	133	10	26	26

Tabla 4. Resultados consumo de ácido de la Jarosita.

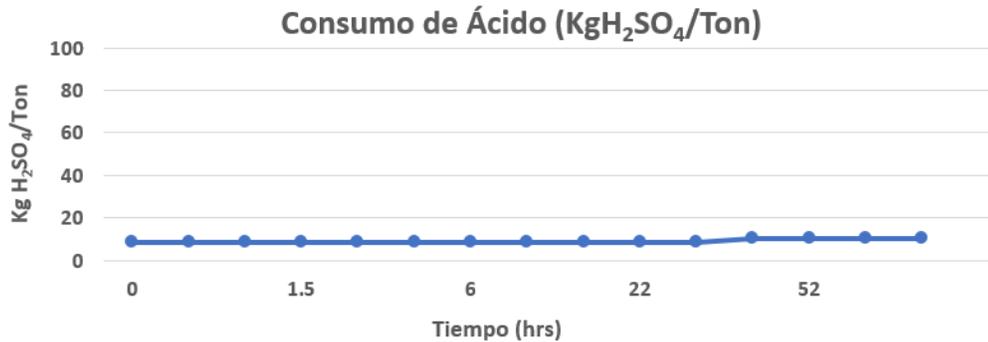


Gráfico 4. Resultados consumo de ácido de la Jarosita según tiempo (Hrs) de análisis.

La Jarosita es un mineral perteneciente a las Limonitas, dentro de las cuales tiene un porcentaje considerable en algunas zonas siendo necesario conocer su consumo de ácido. Los valores de consumo de ácido de la Jarosita son relativamente bajos y lineares desde 9 KgH/Ton a las 0 hrs y 10 KgH/Ton a las 72 hrs.

- **M5 Caolinita**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M5							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				9		
0.5	0.40	0.40	33	80	12	23	23
1.0	0.52	0.46	38	92	14	27	27
1.5	0.84	0.65	54	130	14	21	21
2	0.84	0.75	62	149	14	18	18
4	0.86	0.80	67	161	14	17	17
6	0.92	0.86	72	172	14	16	16
8	0.92	0.89	74	178	14	15	15
12	0.92	0.91	75	181	14	15	15
22	0.92	0.91	76	183	15	15	15
32	0.92	0.92	76	183	15	17	17
42	0.98	0.95	79	190	15	16	16
52	1.00	0.97	81	195	15	16	16
62	1.04	1.01	84	201	15	15	15
72	1.04	1.02	85	205	15	15	15

Tabla 5. Resultados consumo de ácido en Caolinita.

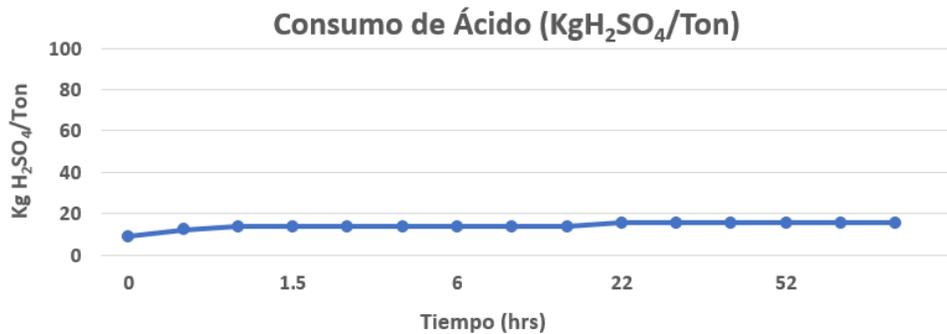


Gráfico 5. Resultados consumo de ácido de la Caolinita según tiempo (Hrs) de análisis.

La Caolinita es un mineral arcilloso que produce problemas en la planta hidrometalúrgica, se ubica en gran parte del yacimiento principalmente en las rocas con alteración argílica y estructuras. Dentro de la primera hora de análisis la Caolinita tiene un consumo de ácido bajo de 9 - 14 KgH/Ton, estabilizándose en 14 - 15 KgH/Ton durante todo el análisis.

- **M6 Esmectitas**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M6							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				6		
0.5	0.26	0.26	27	76	10	25	25
1.0	0.26	0.26	27	76	10	40	40
1.5	0.52	0.39	40	115	10	26	26
2	0.52	0.46	47	134	10	23	23
4	0.52	0.49	50	143	17	21	21
6	0.52	0.50	52	148	17	34	34
8	0.52	0.51	53	151	17	34	34
12	0.52	0.52	53	152	17	34	34
22	0.52	0.52	53	152	17	33	33
32	0.52	0.52	54	153	17	33	33
42	0.52	0.52	54	153	17	33	33
52	0.52	0.52	54	153	17	33	33
62	0.52	0.52	54	153	17	33	33
72	0.52	0.52	54	153	17	33	33

Tabla 6. Resultados consumo de ácido en Esmectitas.



Gráfico 6. Resultados consumo de ácido en Esmectitas según tiempo (Hrs) de análisis.

Las Esmectitas corresponden a minerales arcillosos pertenecientes a la alteración argílica. Dentro de las dos primera horas de análisis las Esmectitas tienen un consumo de ácido bajo de 6 - 10 KgH/Ton, luego a las 4 horas de análisis el consumo de ácido aumenta hasta 17 KgH/Ton estabilizándose hasta el final del análisis.

• **M7 Arcillas con Cu**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M7							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				27		
0.5	10.66	10.66	20	22	41	3	3
1.0	13.26	11.96	22	24	53	3	3
1.5	18.20	15.08	28	31	63	3	3
2	22.10	18.59	35	38	72	3	3
4	27.04	22.82	43	46	82	3	3
6	31.34	27.08	51	55	90	3	3
8	34.84	30.96	58	63	98	3	3
12	38.10	34.53	65	70	108	3	3
22	42.90	38.71	73	79	118	3	3
32	43.42	41.07	77	83	118	3	3
42	43.04	42.05	79	85	118	3	3
52	43.04	42.55	80	86	118	3	3
62	43.08	42.81	80	87	121	3	3
72	43.16	42.99	81	87	123	3	3

Tabla 7. Resultados consumo de ácido en las Arcillas con Cobre.

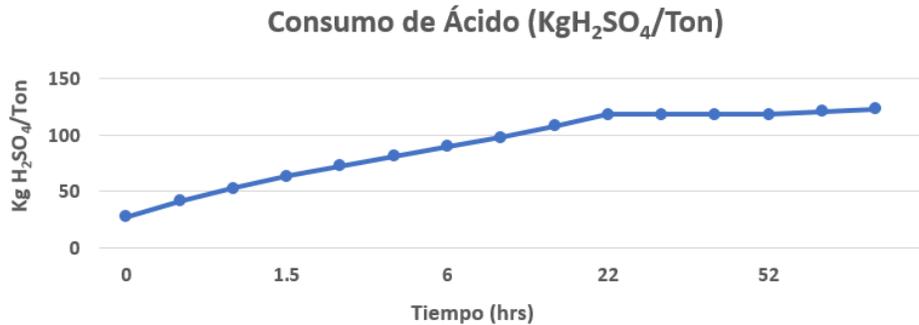


Gráfico 7. Resultados consumo de ácido en Arcillas con Cobre según tiempo (Hrs) de análisis.

Las arcillas con cobre corresponden a la mena de mayor abundancia en el yacimiento, se presentan principalmente en el metasedimento y zonas con alteración argílica. En las primeras horas de análisis las Arcillas con Cobre tienen un consumo de ácido alto, que aumenta fuertemente desde 27 KgH+/Ton al inicio del análisis hasta 118 KgH+/Ton a las 22 horas, luego a partir de las 22 horas el consumo de ácido se estabiliza aumentando paulatinamente hasta los 123 KgH+/Ton a las 72 horas.

• **M8 Libethenita**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M8							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				13		
0.5	4.68	4.68	67	78	20	3	3
1.0	4.94	4.81	69	80	23	4	4
1.5	5.34	5.08	73	85	24	5	5
2	5.98	5.53	79	92	24	4	4
4	5.86	5.69	81	95	24	4	4
6	5.86	5.78	83	96	24	4	4
8	6.40	6.09	87	101	26	4	4
12	6.40	6.24	89	104	26	4	4
22	6.40	6.32	90	105	26	4	4
32	6.40	6.36	91	106	29	4	4
42	6.40	6.38	91	106	29	4	4
52	6.40	6.39	91	107	29	4	4
62	6.40	6.40	91	107	29	4	4
72	6.40	6.40	91	107	31	5	5

Tabla 8. Resultados consumo de ácido en Libethenita.

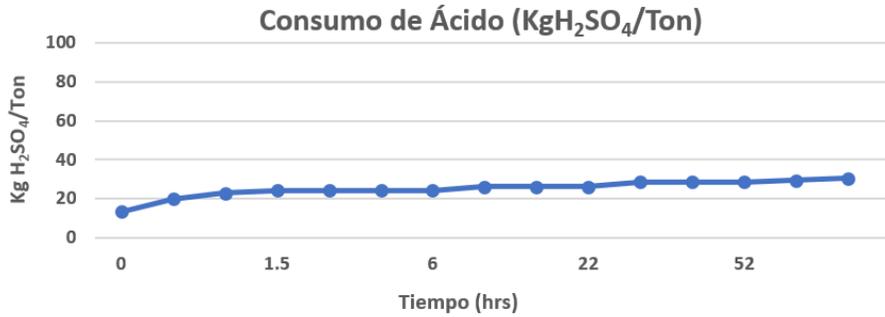


Gráfico 8. Resultados consumo de ácido en Libethenita según tiempo (Hrs) de análisis.

La Libethenita es un mineral de mena que tiene poca abundancia en el yacimiento, solo se ubica en sectores de la fase 1A. Dentro de la primera media hora de análisis la Libethenita tiene un consumo de ácido bajo - moderado de 13 - 20 KgH/Ton, luego a partir de la primera hora de análisis el consumo de ácido aumenta paulatinamente desde 23 KgH/Ton hasta 31 KgH/Ton en las 72 horas.

- **M9 Sericita**

Cuadro de recuperación y consumo muestra M9							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				5		
0.5	0.26	0.26	260	260	8	19	19
1.0	0.26	0.26	260	260	8	29	29
1.5	0.26	0.26	260	260	8	29	29
2	0.26	0.26	260	260	8	29	29
4	0.26	0.26	260	260	8	29	29
6	0.40	0.33	330	330	8	23	23
8	0.40	0.37	365	365	8	21	21
12	0.40	0.38	383	383	8	22	22
22	0.40	0.39	391	391	8	21	21
32	0.40	0.40	396	396	8	21	21
42	0.40	0.40	398	398	10	21	21
52	0.40	0.40	399	399	10	25	25
62	0.40	0.40	399	399	10	25	25
72	0.40	0.40	400	400	10	25	25

Tabla 9. Resultados consumo de ácido en Sericita.

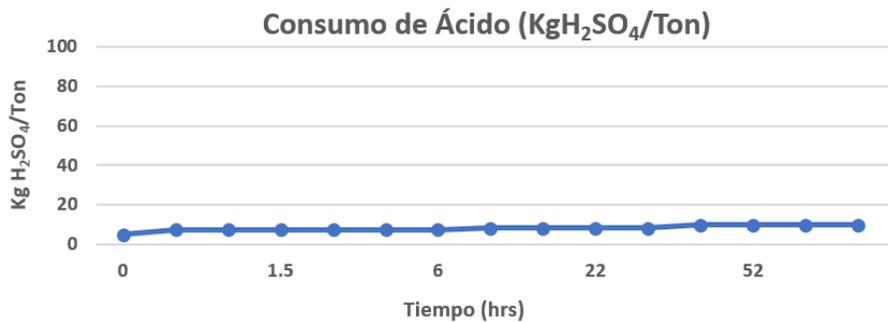


Gráfico 9. Resultados consumo de ácido en Sericita según tiempo (Hrs) de análisis.

La Sericita es un mineral perteneciente a la alteración fílica. Su consumo de ácido es relativamente bajo, al momento de comenzar el análisis tiene un consumo de ácido de 5 KgH+/Ton, luego después de la media hora de análisis el consumo aumenta a 8 KgH+/Ton hasta las 32 hrs, finalmente a partir de las 42 horas hasta las 72 el consumo de ácido aumenta a 10 KgH+/Ton.

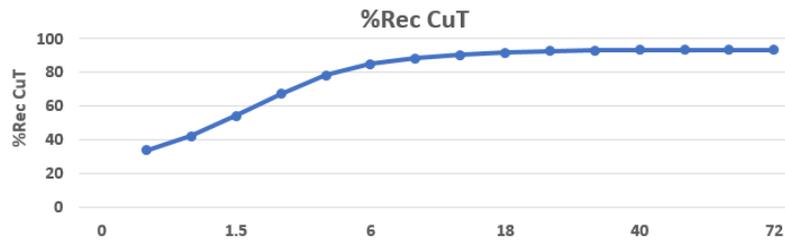
ANEXO E

RESULTADOS CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN

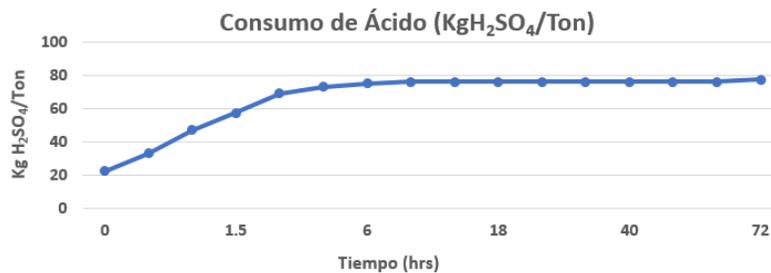
• MLX1

Cuadro de cinética de lixiviación muestra MXL1							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				23		
0.5	14.04	14.04	34	36	33	2	2
1.0	20.94	17.49	42	45	47	2	2
1.5	27.30	22.40	54	58	58	2	2
2	33.16	27.78	67	72	69	2	2
4	36.78	32.28	78	84	73	2	2
6	37.70	34.99	85	91	75	2	2
8	37.74	36.36	88	94	76	2	2
12	38.22	37.29	91	97	76	2	2
18	38.36	37.83	92	98	76	2	2
26	38.48	38.15	93	99	76	2	2
34	38.62	38.39	93	99	76	2	2
40	38.62	38.50	93	100	76	2	2
48	38.60	38.55	94	100	76	2	2
60	38.48	38.52	93	100	76	2	2
72	38.40	38.46	93	100	77	2	2

Tabla 1. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX1.



Gráfica 1A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX1.



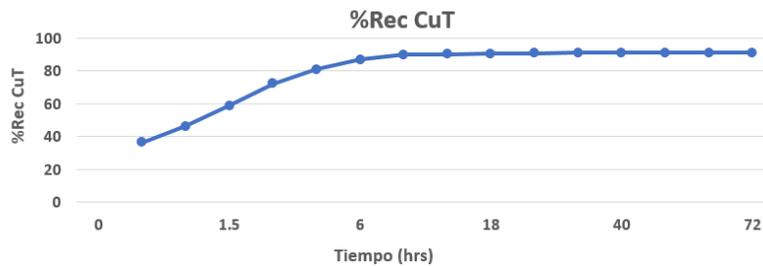
Gráfica 1B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX1.

Esta muestra de pórfido presenta una cinética de lixiviación buena. En un comienzo libera poco Cobre (34%Rec CuT), sin embargo, a medida que van pasando las horas el %Rec CuT aumenta rápidamente hasta estabilizarse a las 12 hrs con un 91%Rec CuT, finalmente alcanza valores de 93%Rec CuT a las 72 hrs. Respecto al consumo de ácido y %Rec CuT la muestra presenta un comportamiento similar al análisis realizado a la Crisocola, la cual es el principal mineral de esta muestra.

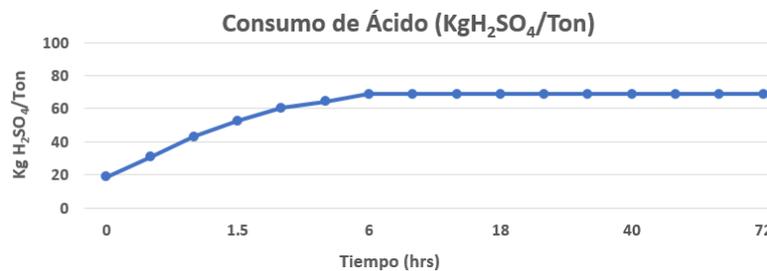
- MLX2

Cuadro de Recuperación muestra MLX2							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				19		
0.5	13.26	13.26	36	38	31	1	1
1.0	20.42	16.84	46	49	43	2	2
1.5	26.14	21.49	59	62	53	2	2
2	31.20	26.35	72	76	61	2	2
4	32.76	29.55	81	86	64	2	2
6	33.80	31.68	87	92	69	2	2
8	33.90	32.79	90	95	69	2	2
12	33.02	32.90	90	95	69	2	2
18	33.16	33.03	91	96	69	2	2
26	33.20	33.12	91	96	69	2	2
34	33.20	33.16	91	96	69	2	2
40	33.20	33.18	91	96	69	2	2
48	33.20	33.19	91	96	69	2	2
60	33.20	33.19	91	96	69	2	2
72	33.20	33.20	91	96	69	2	2

Tabla 2. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX2.



Gráfica 2A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX2.



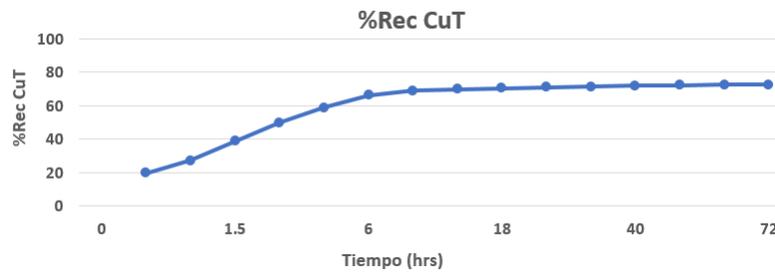
Gráfica 2B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX2.

Esta muestra de pórfido presenta una cinética de lixiviación buena, igual a MLX1. En un comienzo libera poco Cobre (36%Rec CuT), sin embargo, a medida que van pasando las horas el %Rec CuT aumenta rápidamente hasta estabilizarse a las 8 hrs con un 90%Rec CuT, finalmente alcanza valores de 91%Rec CuT a las 72 hrs. Respecto al alto consumo de ácido y %Rec CuT buena, la muestra presenta un comportamiento similar al análisis realizado a la Crisocola, la cual es el principal mineral de esta muestra.

- MLX3

Cuadro de Recuperación muestra MLX3							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				20		
0.5	3.78	3.78	20	22	32	5	5
1.0	6.76	5.27	27	30	41	6	6
1.5	9.76	7.52	39	43	49	6	6
2	11.70	9.61	50	55	56	5	5
4	13.14	11.37	59	65	61	5	5
6	14.30	12.84	67	74	66	5	5
8	13.78	13.31	69	76	67	5	5
12	13.66	13.48	70	77	67	5	5
18	13.78	13.63	71	78	67	5	5
26	13.82	13.73	71	79	67	5	5
34	13.92	13.82	72	79	69	5	5
40	14.04	13.93	72	80	71	5	5
48	14.04	13.99	72	80	71	5	5
60	14.04	14.01	73	81	71	5	5
72	14.04	14.03	73	81	71	5	5

Tabla 3. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX3.



Gráfica 3A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX3.



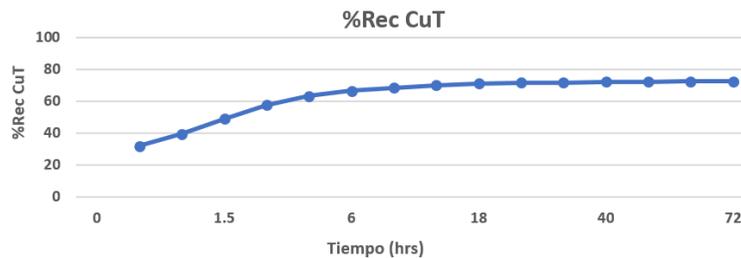
Gráfica 3B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX3.

Esta muestra de pórfido presenta una cinética de lixiviación lenta. En un comienzo libera poco Cobre (20%Rec CuT), sin embargo, a medida que van pasando las horas el %Rec CuT aumenta moderadamente hasta estabilizarse a las 8 hrs con un 69%Rec CuT, finalmente alcanza valores de 73%Rec CuT a las 72 hrs. Respecto al alto consumo de ácido y % Rec CuT buena, la muestra presenta un comportamiento similar a los análisis realizados a las Arcillas con Cobre.

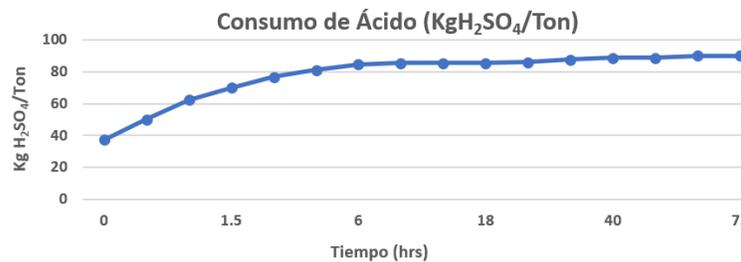
- **MLX4**

Cuadro de Recuperación muestra MLX4							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				37		
0.5	12.54	12.54	32	36	50	3	3
1.0	18.46	15.50	40	44	62	3	3
1.5	23.02	19.26	49	55	70	3	3
2	26.00	22.63	58	64	77	3	3
4	27.16	24.90	64	71	81	3	3
6	27.30	26.10	67	74	85	3	3
8	27.70	26.90	69	77	85	3	3
12	28.08	27.49	70	78	85	3	3
18	28.34	27.91	71	80	85	3	3
26	28.34	28.13	72	80	86	3	3
34	28.08	28.10	72	80	88	3	3
40	28.54	28.32	72	81	89	3	3
48	28.48	28.40	72	81	89	3	3
60	28.48	28.44	73	81	90	3	3
72	28.48	28.46	73	81	90	3	3

Tabla 4. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX4.



Gráfica 4A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX4.



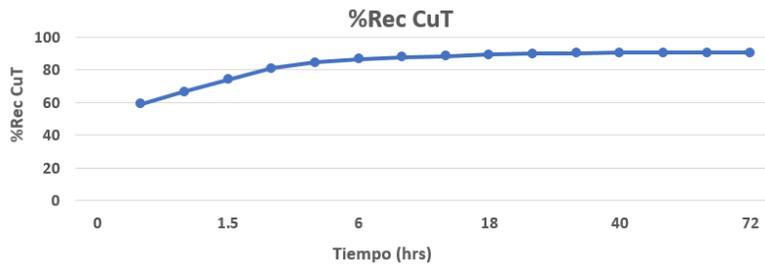
Gráfica 4B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX4.

Esta muestra de metasedimento presenta una cinética de lixiviación lenta. En un comienzo libera poco Cobre (32%Rec CuT), sin embargo, a medida que van pasando las horas el %Rec CuT aumenta moderadamente hasta estabilizarse a las 8 hrs con un 69%Rec CuT, finalmente alcanza valores de 73%Rec CuT a las 72 hrs. Respecto al alto consumo de ácido y % Rec CuT baja la muestra, presenta un comportamiento similar a los análisis realizados a las Arcillas con Cobre.

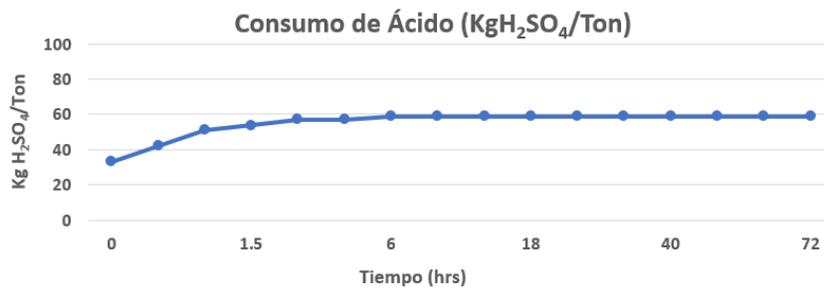
• MLX5

Cuadro de Recuperación muestra							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				33		
0.5	18.34	18.34	59	65	42	2	2
1.0	22.88	20.61	67	73	51	2	2
1.5	25.22	22.92	74	82	54	2	2
2	27.18	25.05	81	89	57	2	2
4	27.18	26.11	85	93	57	2	2
6	27.56	26.84	87	96	59	2	2
8	27.56	27.20	88	97	59	2	2
12	27.56	27.38	89	97	59	2	2
18	27.96	27.67	90	98	59	2	2
26	28.00	27.83	90	99	59	2	2
34	28.00	27.92	90	99	59	2	2
40	28.00	27.96	90	99	59	2	2
48	28.00	27.98	91	100	59	2	2
60	28.00	27.99	91	100	59	2	2
72	28.00	27.99	91	100	59	2	2

Tabla 5. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX5.



Gráfica 5A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX5.



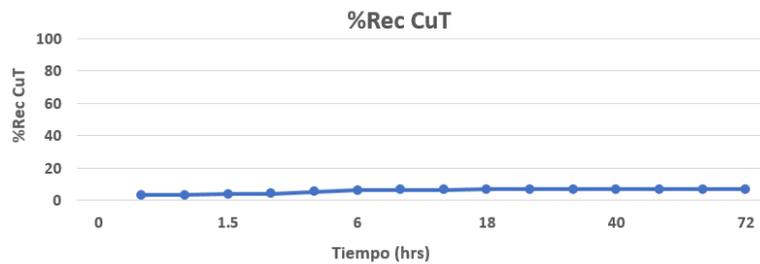
Gráfica 5B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX5.

Esta muestra de Pórfido presenta una cinética de lixiviación lenta. En un comienzo libera mucho Cobre (59%Rec CuT), sin embargo, a medida que van pasando las horas el %Rec CuT aumenta moderadamente hasta estabilizarse a las 8 hrs con un 88%Rec CuT, finalmente alcanza valores de 91%Rec CuT a las 72 hrs. Respecto al consumo de ácido moderado y cinética de lixiviación lenta, la muestra presenta un comportamiento similar a los análisis realizados a la Crisocola.

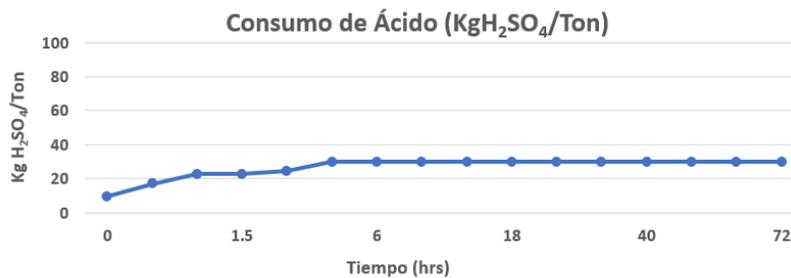
- **MLX6**

Cuadro de Recuperación muestra							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				10		
0.5	0.52	0.52	3	24	17	18	18
1.0	0.52	0.52	3	24	23	33	33
1.5	0.66	0.59	4	27	23	38	38
2	0.66	0.63	4	28	24	36	36
4	1.04	0.83	5	38	30	29	29
6	1.04	0.94	6	42	30	32	32
8	1.04	0.99	6	45	30	30	30
12	1.04	1.01	7	46	30	30	30
18	1.04	1.03	7	46	30	29	29
26	1.04	1.03	7	47	30	29	29
34	1.04	1.04	7	47	30	29	29
40	1.04	1.04	7	47	30	29	29
48	1.04	1.04	7	47	30	29	29
60	1.04	1.04	7	47	30	29	29
72	1.04	1.04	7	47	30	29	29

Tabla 6. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX6.



Gráfica 6A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX6.



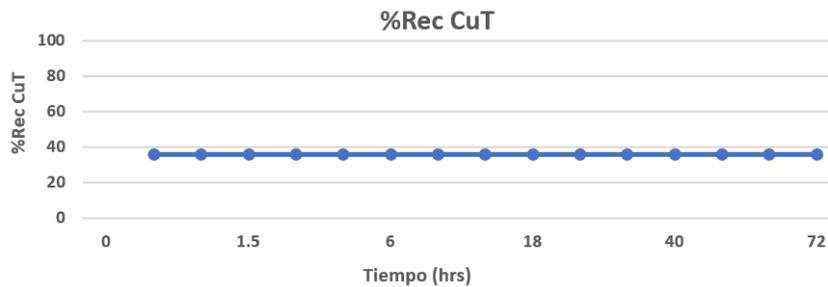
Gráfica 6B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX6.

Esta muestra de Pórfido presenta una cinética de lixiviación muy lenta liberando entre 3 y 7 %Rec CuT, esto debido a la poca mineralogía de mena y alto contenido de arcillas. Respecto al consumo de ácido bajo y cinética de lixiviación lenta, la muestra presenta un comportamiento similar a los análisis realizados a la Caolinita y Esmectitas.

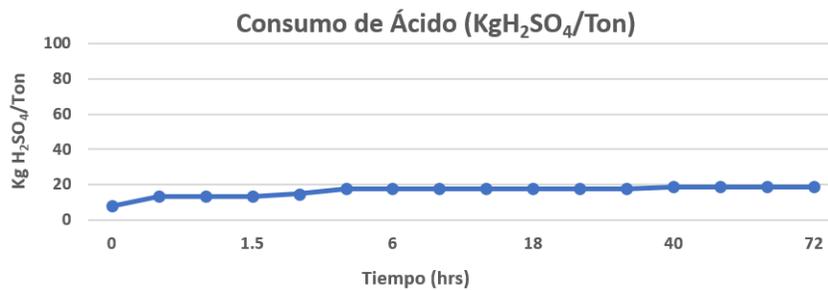
• MLX7

Cuadro de Recuperación muestra							
Control (Hr)	Cu fino (g)	Media móvil Cu fino (g)	%Rec CuT	%Rec CuSF	Consumo (KgH+/Ton)	KgH+/KgCu	Media móvil KgH+/KgCu
0	0.00				8		
0.5	0.26	0.26	36	100	13	30	30
1.0	0.26	0.26	36	100	13	52	52
1.5	0.26	0.26	36	100	13	52	52
2	0.26	0.26	36	100	15	52	52
4	0.26	0.26	36	100	18	57	57
6	0.26	0.26	36	100	18	68	68
8	0.26	0.26	36	100	18	68	68
12	0.26	0.26	36	100	18	68	68
18	0.26	0.26	36	100	18	68	68
26	0.26	0.26	36	100	18	68	68
34	0.26	0.26	36	100	18	68	68
40	0.26	0.26	36	100	19	68	68
48	0.26	0.26	36	100	19	73	73
60	0.26	0.26	36	100	19	73	73
72	0.26	0.26	36	100	19	73	73

Tabla 7. Información de los análisis de cinética de lixiviación para la muestra MLX7.



Gráfica 7A. Recuperación CuT v/s Tiempo (hrs) de la muestra MLX7.



Gráfica 7B. Consumo de ácido v/s Tiempo (hrs) muestra MLX7.

Esta muestra de Pórfido presenta una cinética de lixiviación muy lenta (36% Rec CuT) debido a la poca mineralogía de mena que presenta y alto contenido de arcillas. Respecto al consumo de ácido bajo y cinética de lixiviación lenta, la muestra presenta un comportamiento similar a los análisis realizados a la Caolinita y Esmectitas.

ANEXO F

RESULTADOS DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X

- M1

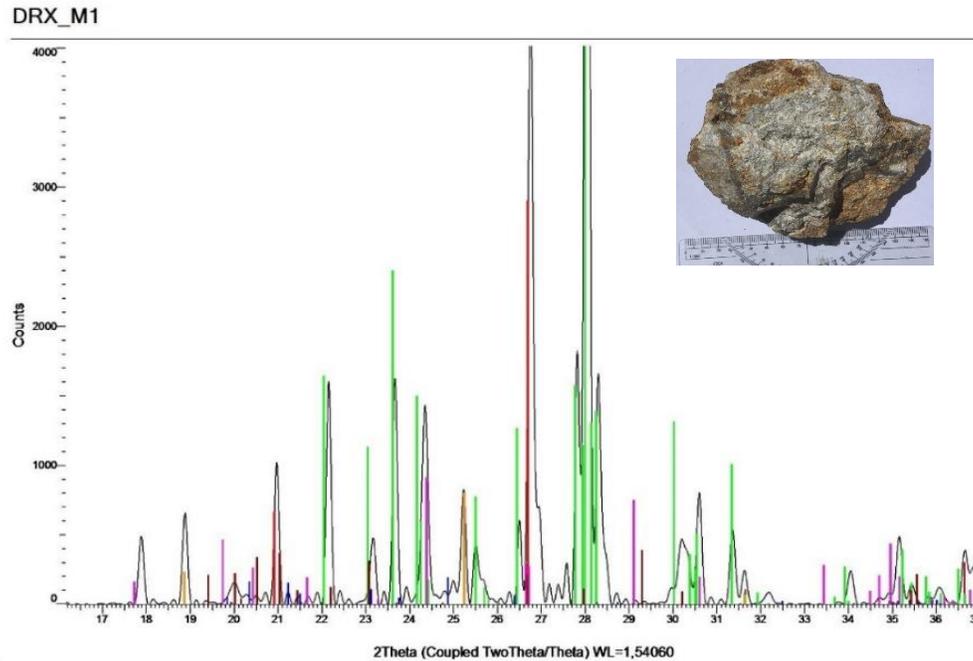


Gráfico 1. Difractograma muestra M1.

Color	Pattern #	Compound Name	Formula	Y-Scale	S-Q	Wavelength
Lime	COD 9002199	Albite	Al Na O8 Si3	40,2124 %	58,28 %	1,5406 Cu KA1
Dark...	PDF 52-1044	Chlorite-serpentine	(Mg , Al)6 (Si , Al)4 O10 (O H)8	10,6534 %	12,81 %	1,5406 Cu KA1
Mag...	COD 9013723	Illite	Al2 H2 K O12 Si4	8,4974 %	11,11 %	1,5406 Cu KA1
Dark...	COD 9008041	Pyrophyllite	Al H O6 Si2	4,3636 %	8,20 %	1,5406 Cu KA1
Red	COD 1011176	Quartz low	O2 Si	27,0161 %	6,74 %	1,5406 Cu KA1
Blue	COD 9009230	Kaolinite	Al2 H4 O9 Si2	2,8993 %	2,86 %	1,5406 Cu KA1

Tabla 1. Minerales identificados con DRX.

El principal mineral identificado corresponde a la Albite (58,28%), seguido de la Clorita - Serpentina (12,81%), Illita (11,11%), Pirofilita (8,2%), Cuarzo (6,74%) y la Caolinita (2,86%). Siendo la Clorita - Serpentina, Illita, Pirofilita y la Caolinita los principales minerales arcillosos identificados abarcando un 35% del total de la muestra.

- M2

DRX_M2

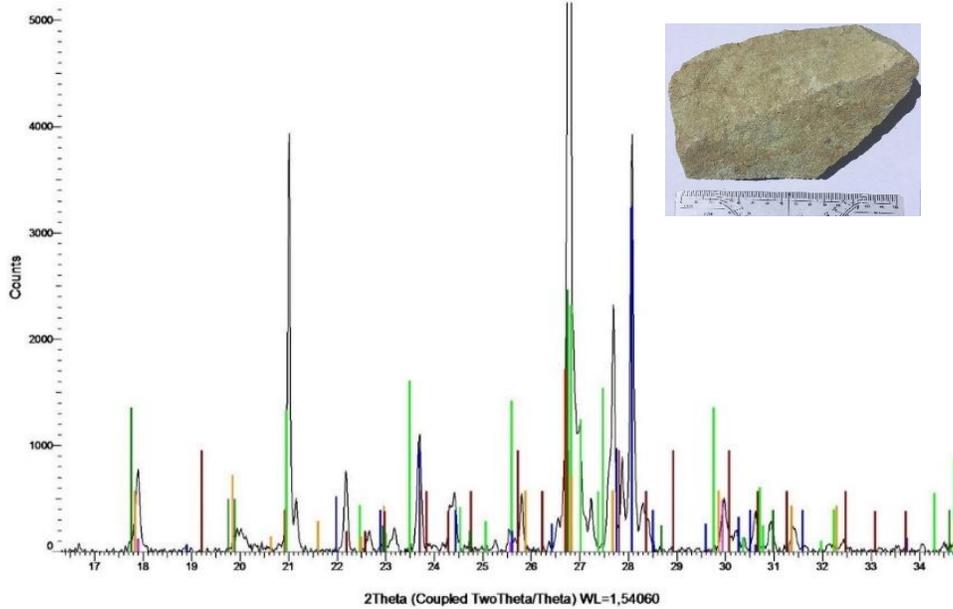


Gráfico 2. Difractograma muestra M3.

Color	Pattern #	Compound Name	Formula	Y-Scale	S-Q	System
Blue	PDF 10-0393	Albite, disordered	Na (Si3 Al) O8	19,6349 %	30,48 %	Tridinic
Lime	COD 1011205	Orthodase	Al K O8 Si3	14,0157 %	25,30 %	Monoclinic
Green	PDF 07-0042	Muscovite-3T	(K , Na) (Al , Mg , Fe)2 (Si3.1 Al0.9) O10 (OH)2	14,8812 %	23,10 %	Hexagonal
Dark...	PDF 46-1440	Biotite-4M#3, titanian	(K , Na) (Mg , Fe , Ti)3 (Si , Al)4 O10 (OH , O)2	5,7412 %	8,91 %	Monoclinic
Dark...	PDF 02-0056	Illite	K Al2 Si3 Al O10 (OH)2	4,3313 %	6,72 %	Monoclinic
Red	COD 1011176	Quartz low	O2 Si	10,3787 %	3,34 %	Hexagonal
Mag...	COD 9000013	Alunite	Al3 H6 K O14 S2	2,9353 %	2,13 %	Hexagonal

Tabla 2. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados corresponden a la Albite (30,48%), Ortoclasa (25,3%) y la Muscovita (23,1%) principalmente, seguidos de la Biotita (8,91%), Illita (6,72%), Cuarzo (3,34%) y Alunite (2,13%). Siendo la Illita y la Alunite los principales minerales arcillosos identificados abarcando el 8,9% del total de la muestra.

- **M3**
DRX_M3

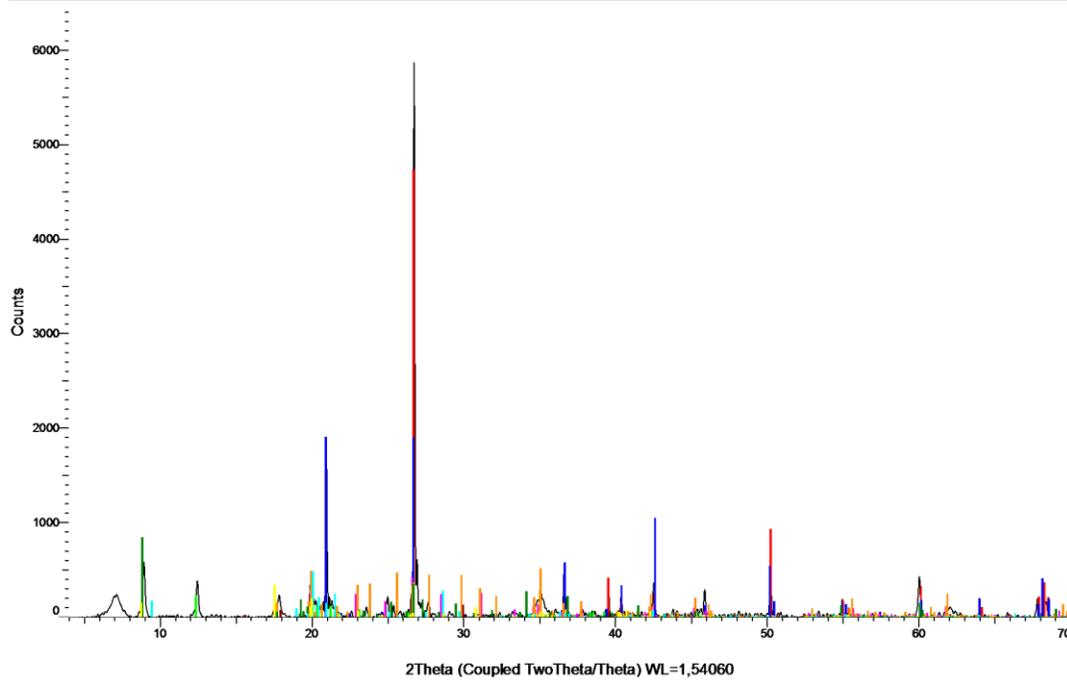


Gráfico 3. Difractograma muestra M3.

Color	Pattern #	Compound Name	Formula	Y-Scale	S-Q	
Dark...	COD 1000042	Muscovite 2M1	Al ₃ H ₂ K O ₁₂ Si ₃	8,7033 %	25,17 %	
Red	COD 1011176	Quartz low	O ₂ Si	80,6887 %	20,33 %	
Blue	COD 9006549	Berlinite	Al O ₄ P	32,5255 %	14,53 %	
Green	COD 9000468	Biotite	Al _{1.999} K _{0.5} Mg _{2.001} O ₁₂ Si ₃	14,3963 %	12,58 %	
Mag...	COD 9013732	Illite	Al ₂ H ₂ K O ₁₂ Si ₄	7,1832 %	11,63 %	
Cyan	COD 9000277	Pyrophyllite-1Tc	Al ₂ O ₁₁ Si ₄	8,2183 %	6,70 %	
Lime	COD 9009230	Kaolinite	Al ₂ H ₄ O ₉ Si ₂	3,9216 %	3,90 %	
Yellow	COD 1011246	Halloysite	Al ₂ H ₈ O ₁₁ Si ₂	5,7609 %	3,80 %	
Dark...	COD 9010877	Alunite	Al _{2.967} H ₆ K _{0.805} Na _{0.132} O _{14.063} S ₂	2,2194 %	1,35 %	

Tabla 3. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados corresponden a la Muscovita (25,17%), Cuarzo (20,33%), Berlinita (14,53%), Biotita (12,58%) y la Illita (11,63) principalmente, seguidos de la Pirofilita (6,7%), Caolinita (3,9%), Halloysita (3,8%) y la Alunita (1,35%). Siendo la Berlinita, Illita, Pirofilita, Caolinita, Halloysita y la alunita los principales minerales arcillosos identificados abarcando el 41,9% del total de la muestra.

- **M4**
DXR_M4

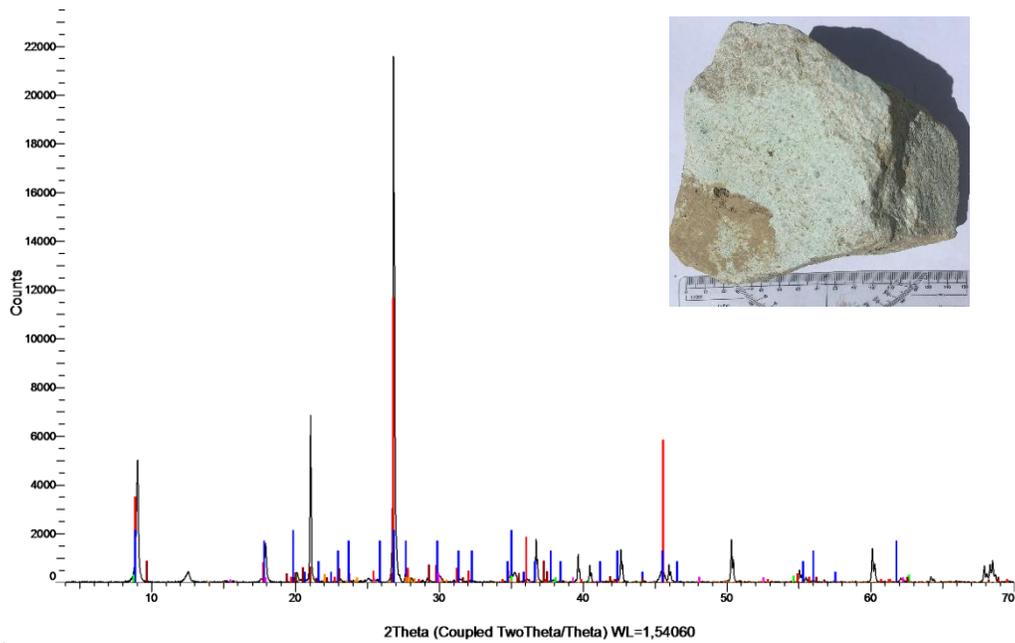


Gráfico 4. Difractograma muestra M4.

Color	Pattern #	Compound Name	Formula	Y-Scale	S-Q	θ	System
Red	PDF 46-1409	Muscovite-2M#1, vanadian barian	$(K, Ba, Na)_{0.75} (Al, Mg, Cr, V)_2 (Si, Al, V)_4 O_{10} (OH, O)_2$	54,1197 %	72,87 %		Monoclinic
Blue	PDF 02-0056	Illite	$K Al_2 Si_3 Al O_{10} (OH)_2$	9,9114 %	13,34 %		Monoclinic
Dark...	COD 1011153	Pyrophyllite 2M1	$Al_2 H_2 O_{12} Si_4$	4,0484 %	8,26 %		Monoclinic
Mag...	PDF 01-0879	Alunite	$K Al_3 (OH)_6 (SO_4)_2$	1,7959 %	2,42 %		Rhombo.H.axes
Lime	PDF 09-0451	Halloysite-10A	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4 \cdot 2H_2 O$	1,5535 %	2,09 %		Hexagonal
Dark...	PDF 19-1184	Albite, ordered	$Na Al Si_3 O_8$	1,5938 %	1,02 %		Tridinic

Tabla 4. Minerales identificados con DRX.

El principal mineral identificado corresponde a la Muscovita (72,8%), seguido de la Illita (13,3%), Pirofilita (8%), Alunita (2,4%), Halloysita (2%) y Albita (1%). Siendo la Illita, Pirofilita, Alunita y Halloysita los principales minerales arcillosos identificados abarcando un 26% del total de la muestra.

- M5

DXR_M5

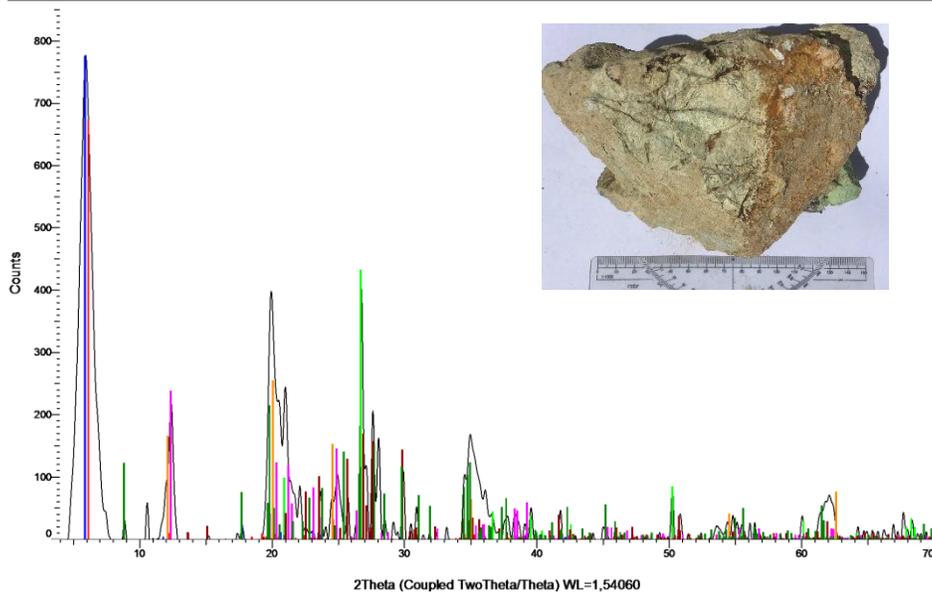


Gráfico 5. Difractograma muestra M5.

	Show	Color	Pattern #	Compound Name	Formula	Y-Scale	S-Q	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Green	COD 9009665	Illite	Al ₄ K O ₁₂ Si ₂	27,5382 %	34,37 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Dark...	PDF 29-1487	Halloysite-7A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	32,7727 %	20,45 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Dark...	COD 9000162	Orthoclase	Al K O ₈ Si ₃	21,7562 %	16,97 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Mag...	COD 9009230	Kaolinite	Al ₂ H ₄ O ₉ Si ₂	30,6893 %	15,70 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Lime	COD 1011176	Quartz low	O ₂ Si	55,5948 %	7,20 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Blue	COD 9002779	Montmorillonite	Al ₂ Ca _{0.5} O ₁₂ Si ₄	99,7366 %	3,04 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Red	COD 1000036	Vermiculite	H ₂ Mg ₃ O ₁₂ Si ₄	86,5521 %	2,28 %	

Tabla 5. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados son la Illita (34,37%), Halloysita (20,45%), Ortoclasa (16,97%), Caolinita (15,7%) en mayor cantidad, seguidos del Cuarzo (7,2%), Montmorillonita (3%) y la vermiculita (2,28%). Siendo la Illita, Halloysita, Caolinita, Montmorillonita y la vermiculita los principales minerales arcillosos identificados abarcando un 75,8% de la muestra.

• M6

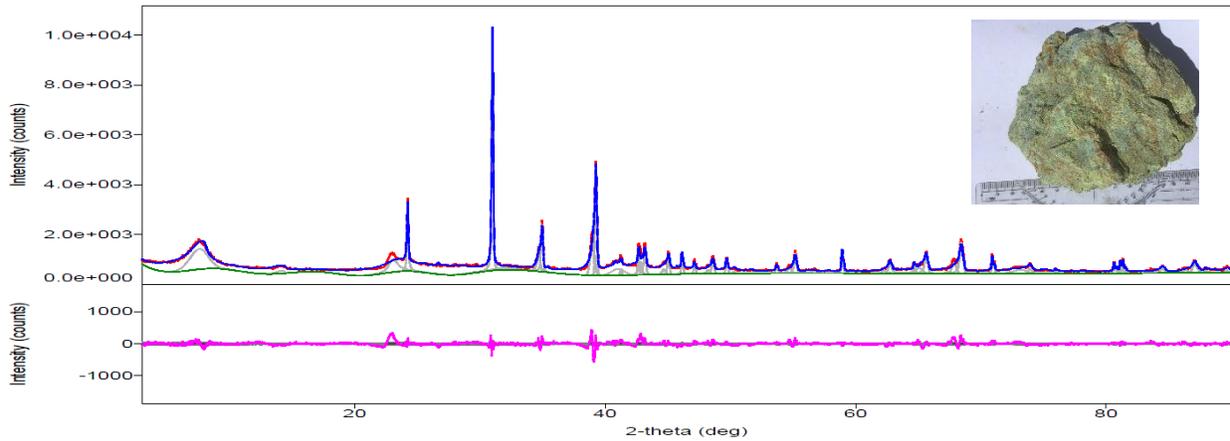


Gráfico 6. Difractograma muestra M6.

	Phase name	Content(%)
-	quartz, low	12.9(3)
-	Grossular	21.7(5)
-	Muscovite 2M1	0.89(5)
-	Kaolinite 2M	31.4(14)
-	Sepiolite	31.1(12)
-	Calcite, magnesian	1.02(6)
-	Diopside	0.52(6)
-	Hematite	0.37(3)
-	Brucite	0.12(3)

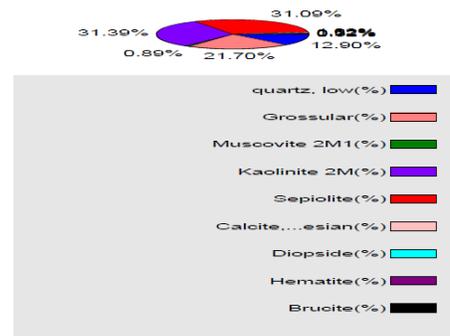


Tabla 6. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados son la Caolinita (21.7%), la Sepiolita (31.1%), la Grosularia (21.7%) y el Cuarzo (12.9%) en mayor cantidad, seguidos de la Calcita (1.02%), Muscovita (0.89%), Diopside (0.52%), Hematita (0.37%) y la Brucita (0.12%). Siendo la Caolinita, Sepiolita los principales minerales arcillosos identificados, abarcando el 62,5% de la totalidad de la muestra.

• M7

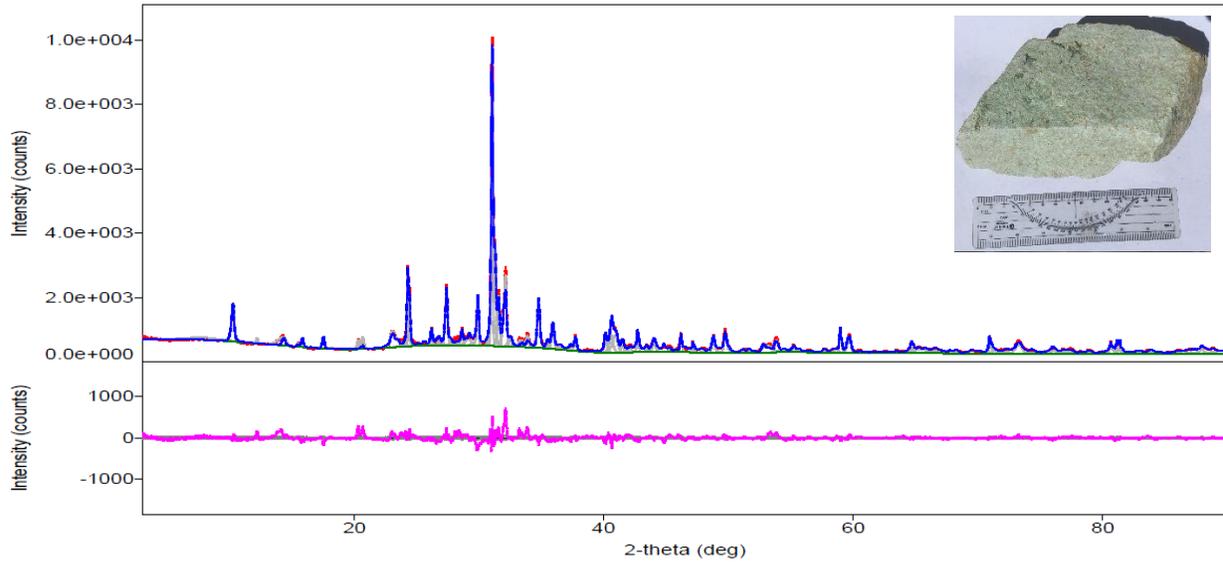


Gráfico 7. Difractograma muestra M7.

	Phase name	Content(%)
-	Orthoclase	36.6(4)
-	Quartz	23.1(3)
-	Anorthite	3.11(15)
-	Muscovite 2M1	20.3(6)
-	Biotite	12.2(4)
-	Kaolinite 2M	4.70(14)

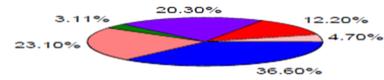


Tabla 7. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados son la Ortoclasa (36,6%), el Cuarzo (23,1%), la Muscovita (20,3%) y la Biotita (12,2%) en mayor cantidad, seguidos de la Caolinita (4,7%) y la Anortita (3,11). Siendo la Caolinita el principal mineral arcilloso identificado abarcando el 4,7% de la muestra.

• **M8**

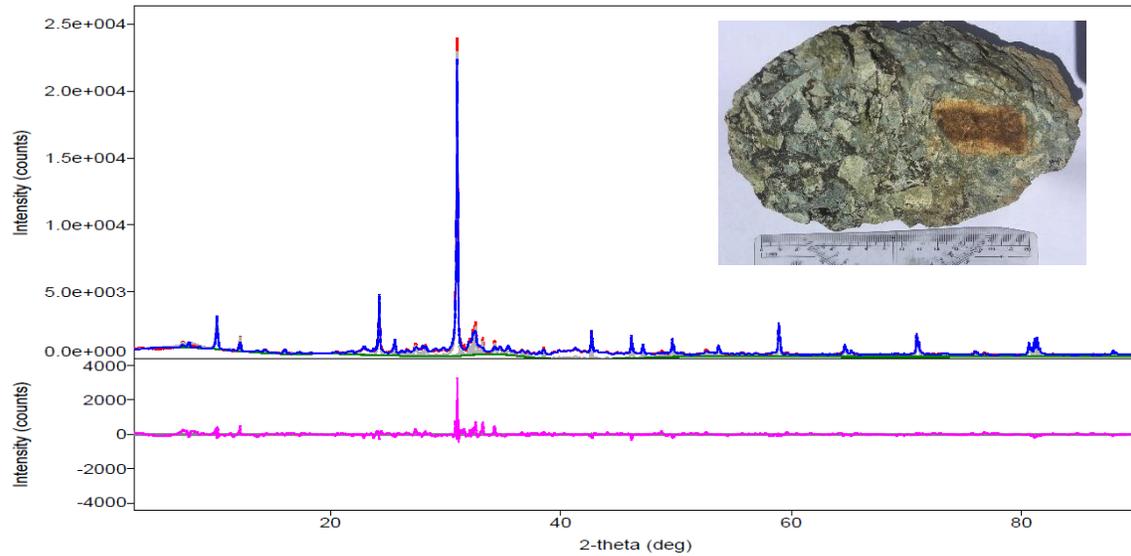


Gráfico 7. Difractograma muestra M7.

Phase name	Content(%)			
Prehnite	1.70(12)	-		
Quartz	28.1(3)	-	Diopside	2.31(11)
Albite	22.4(4)	-	Calcite	0.53(5)
Orthoclase	1.42(13)	-	Gypsum	0.57(2)
Muscovite 2M1	20.0(6)	-	Anhydrite	1.03(8)
Biotite	4.4(3)	-	Hematite	0.58(5)
Chlorite	2.6(3)	-	Magnetite	0.39(3)
Kaolinite 2M	4.6(3)	-	Pyrite	0.94(8)
Montmorillonite	0.174(11)	-	Chalcopyrite	0.00(2)
Epidote	1.65(13)	-	Chalcanthite	0.27(3)
Actinolite	1.76(10)	-	Brochantite	0.135(15)
Alunite	0.48(8)	-	Dioptase	0.24(4)
Augite	1.58(10)	-	Turquoise	1.21(10)
Andradite	0.94(6)	-		

Tabla 7. Minerales identificados con DRX.

Los principales minerales identificados son el Cuarzo (28,1%), Albita (22,4%), Muscovita (20%) principalmente, seguidos de Caolinita (4,6%), Biotita (4,4%), Clorita (2,6%), Diopsido (2,31%), Actinolita (1,76%), Prehnita (1,7%), Epidota (1,65%), Augita (1,58%), Ortoclasa (1,42%), Turquesa (1,21%), Anhidrita (1,03%), Pirita (0,94%), Andradita (0,94%), Hematita (0,58%), Yeso (0,57%), Calcita (0,53%), Alunita (0,48%), Magnetita (0,39%), Chalcantita (0,27%), Diopsido (0,24%), Montmorillonita (0,174%), Brocantita (0,135%), Calcopirita (0%). Siendo la Caolinita, Montmorillonita, Clorita y Alunita los principales minerales arcillosos identificados abarcando el 8% de la muestra.