



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ESTUDIO DE LAS REACCIONES QUÍMICAS QUE  
OCURREN AL CONTACTO ENTRE UNIDADES  
LITOLÓGICAS DE DIFERENTES ÁREAS DE MINA LOS  
BRONCES CON EXPLOSIVOS DE BASE ANFO EN LOS  
POZOS DE TRONADURA.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

**Benjamín Ignacio Larenas Barra**

**Profesor Patrocinante:** MSc. Abraham Elías González Martínez

**Profesional Guía:** Sr. Pablo Andrés Cabello González

**Profesores Comisión:** Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

**Concepción, 2018.**

*A mi familia, quienes siempre estuvieron apoyando.*

*A Karen, mi principal motivación.*



# ÍNDICE

	Página
<b>Resumen</b> .....	
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>1.1. Generalidades</b> .....	1
<b>1.2. Hipótesis del Trabajo</b> .....	2
<b>1.3. Objetivos</b> .....	2
1.3.1. <b>Objetivo General</b> .....	2
1.3.2. <b>Objetivos Específicos</b> .....	3
<b>1.4. Ubicación y Accesos</b> .....	3
<b>1.5. Trabajos Anteriores</b> .....	3
<b>1.6. Agradecimientos</b> .....	6
<b>2. Marco Teórico</b> .....	8
<b>2.1. Explosivos de Base ANFO</b> .....	8
2.1.1. <b>Referencia Histórica del Nitrato de Amonio</b> .....	8
2.1.2. <b>Desarrollo de Explosivos con Base de Nitrato de Amonio</b> .....	8
<b>2.2. Reacción de Sulfuros Metálicos con Nitrato de Amonio</b> .....	9
2.2.1. <b>Generalidades</b> .....	9
2.2.2. <b>Química de la Reacción</b> .....	10
2.2.3. <b>Factores que Afectan la Reactividad</b> .....	13
<b>3. Marco Geológico</b> .....	15
<b>3.1. Marco Geológico Regional</b> .....	15
3.1.1. <b>Generalidades</b> .....	15
3.1.2. <b>Unidades Estratigráficas</b> .....	17
3.1.2.1. <b>Formación Abanico</b> .....	17
3.1.2.2. <b>Formación Farellones</b> .....	17
3.1.2.3. <b>Depósitos No Consolidados</b> .....	18
3.1.3. <b>Unidades Intrusivas</b> .....	18
3.1.3.1. <b>Unidad Batolito San Francisco</b> .....	18
3.1.3.2. <b>Intrusivos Mioceno tardío – Plioceno</b> .....	19
3.1.4. <b>Tectónica Regional y Marco Metalogenético</b> .....	19
<b>3.2. Marco Geológico Distrital</b> .....	20

<b>3.2.1. Generalidades</b> .....	20
<b>3.2.2. Unidades Pre-Mineral</b> .....	22
<b>3.2.2.1. Andesitas</b> .....	22
<b>3.2.2.2. Batolito San Francisco</b> .....	23
A. Unidad Cuarzo Monzonita (QM) .....	23
B. Unidad Cuarzo Monzodiorita (QMD) .....	24
C. Unidad Pórfido Cuarzo Monzodiorítico (PQMD) ...	24
<b>3.2.3. Unidades Intra-Mineral</b> .....	25
<b>3.2.3.1. Pórfidos Intra-mineral</b> .....	25
A. Pórfido Cuarzo Monzonítico (PQM) .....	25
B. Pórfido Don Luis (PDL) .....	25
<b>3.2.3.2. Complejo de Brechas Los Bronces</b> .....	26
A. Brecha Fantasma .....	28
B. Brecha Central .....	28
C. Brecha Occidente .....	28
D. Brecha Infiernillo .....	29
E. Brecha Anhidrita .....	30
F. Brecha Gris Fina .....	30
G. Brecha Donoso .....	30
<b>3.2.4. Unidades Post-Mineral</b> .....	31
<b>3.2.4.1. Complejo Riolítico La Copa</b> .....	31
<b>3.2.5. Marco Estructural del Distrito</b> .....	31
<b>3.2.6. Alteración Hidrotermal</b> .....	36
<b>3.2.6.1. Alteración Potásica</b> .....	36
<b>3.2.6.2. Alteración Fílica</b> .....	37
<b>3.2.6.3. Alteración Propilítica</b> .....	38
<b>4. Metodología</b> .....	39
<b>4.1. Generalidades</b> .....	39
<b>4.2. Revisión de Antecedentes</b> .....	39
4.2.1. Enero 2016 .....	39
4.2.2. Octubre 2016 .....	40
4.2.3. Marzo 2017 .....	41
<b>4.3. Geología de la Mina y Estado de la Operación</b> ....	41
<b>4.4. Definición de Zonas de Muestreo</b> .....	43
4.4.1. Zona 1 .....	45
4.4.2. Zona 2 .....	45
4.4.3. Zona 3 .....	45
4.4.4. Zona 4 .....	46
4.4.5. Zona 5 .....	46
4.4.6. Zona 6 .....	47
<b>4.5. Preparación de las Muestras</b> .....	47

4.5.1. Reducción de Muestras para Descripción Macroscópica .....	47
4.5.2. Preparación Mecánica .....	47
4.6. Descripción de Muestras y Estimación Mineralógica .....	48
4.6.1. Descripción Macroscópica .....	48
4.6.2. Análisis Químico .....	49
4.6.3. Análisis de Briquetas Pulidas .....	49
4.7. Ensayos de Reactividad Mineral-ANFO .....	49
4.7.1. Ensayo de Reactividad .....	49
4.7.2. Ensayo de “ <i>Sleep-Time</i> ” .....	53
4.8. Alcances y Limitaciones .....	55
<b>5. Resultados .....</b>	<b>57</b>
5.1. Resultados de Ensayos .....	57
5.1.1. Ensayo de Reactividad .....	57
5.1.2. Ensayo de <i>Sleep-Time</i> .....	59
5.2. Descripción de las Muestras .....	61
5.2.1. Descripción Macroscópica .....	61
5.2.2. Estimación Mineralógica por Briquetas .....	61
5.3. Resumen de Resultados .....	62
<b>6. Discusiones .....</b>	<b>65</b>
6.1. Fase Infiernillo 5 .....	65
6.2. Fase Casino .....	71
6.3. Fase Infiernillo 7 .....	74
<b>7. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>75</b>
7.1. Conclusiones .....	75
7.2. Recomendaciones .....	77
<b>8. Referencias .....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1. Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de Cuarzo Monzonita de Fase Infiernillo 5. ....	67
2. Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de Brecha Infiernillo de Fase Infiernillo 5. ....	68
3. Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de la Zona 4 de Fase Casino. ....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de Chile con la ubicación y vías de acceso a la mina Los Bronces.	4
2. Progresión en el tiempo simplificada de la temperatura de la reacción entre el nitrato de amonio y los sulfuros de hierro. ....	11
3. Microfotografía de la interfase reactiva entre la emulsión y la pirita, al final de la etapa de inducción, donde se forman las burbujas de NO gaseoso.	12
4. Ubicación del depósito Los Bronces-Río Blanco en el cinturón de pórfidos de Cu del Mioceno tardío en Chile central. ....	15
5. Geología regional simplificada. ....	16
6. Geología del distrito Río Blanco-Los Bronces. ....	21
7. Distribución del Complejo de Brechas Los Bronces. ....	27
8. Fallas principales en mina Los Bronces. ....	33
9. Dominios estructurales en mina Los Bronces. ....	35
10. Mapa geológico de mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016...	40
11. Mapa de la distribución estimada de pirita en mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016. ....	41
12. Mapa de la distribución estimada de calcopirita en mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016. ....	42
13. Mapa de la distribución de zonas para el muestreo de pozos de tronadura en mina Los Bronces. ....	44
14. Ejemplo del registro del termograma en una reacción auto-sostenida. ....	52
15. Ejemplo del registro del termograma en una reacción no auto-sostenida.	53
16. Ejemplo del registro del termograma en un Ensayo de <i>Sleep-Time</i> . ....	54
17. Mapa de la mina con la distribución de las 85 muestras y el tipo de reacción que presentan. ....	58

18. Distribución de los resultados del Ensayo de Reactividad en Fase Infiernillo 5. ....	66
19. Distribución de los resultados del Ensayo de Reactividad en fases Casino e Infiernillo 7. ....	72

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
1. Testigo de sondaje diamantino con muestra de la unidad Cuarzo Monzonita. ....	24
2. Testigo de sondaje diamantino con muestra de Brecha Infiernillo. ....	29
3. Montaje del Ensayo de Reactividad. ....	50
4. Inicio de reacción, con liberación de burbujas y espuma en un Ensayo de Reactividad. ....	51
5. Reacción avanzada, con liberación de humos y espuma en un Ensayo de Reactividad. ....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Descripción de las fallas principales Norte, Central, Sur, Infiernillo, Infiernillo 2 y Contacto Cizallado Riolita. ....	34
2. Número de polos asociados a estructuras mayores y menores. ....	36
3. Resultados de Ensayo de Reactividad. ....	57
4. Temperaturas registradas en el Ensayo de Reactividad. ....	59
5. Resultados de Ensayo de <i>Sleep-Time</i> . ....	60
6. Resumen de la descripción macroscópica de las muestras. ....	61
7. Resultados resumidos de la descripción de briquetas pulidas. ....	62
8. Resumen de los resultados más importantes, entre los ensayos de Reactividad y de <i>Sleep-Time</i> , y la descripción mineralógica por briquetas. ....	63

# Resumen

El ciclo de vida de una mina depende, en gran parte, de los procesos de perforación y tronadura, sin embargo, estos traen muchos riesgos asociados. Durante la perforación de pozos de tronadura y su posterior carguío con explosivos, existe la posibilidad de que ocurra una reacción exotérmica entre los sulfuros de hierro de la roca y los explosivos de base ANFO (mezcla entre nitrato de amonio y petróleo). En la mina Los Bronces (Región Metropolitana, Chile), se detectaron, en 3 ocasiones, anomalías en pozos de tronadura cargados con explosivos relacionadas a esta reacción exotérmica. Este trabajo tiene por objetivo determinar qué sectores de la mina Los Bronces son más propensos a tener estas reacciones.

Bajo ciertas condiciones del medio, los sulfuros de hierro como la pirita, pueden oxidarse y liberar ácido sulfúrico que, al estar en contacto con el nitrato de amonio de los explosivos ANFO, generan ácido nitroso y óxido nítrico. Estas reacciones son auto-catalíticas y exotérmicas, por lo tanto, a medida que aumenta la concentración de reactivos (sulfuros de hierro oxidados), aumenta la tasa de la reacción y el calor generado que, al estar confinado en un pozo de tronadura, favorece la detonación prematura de los explosivos.

Las propiedades de la reacción entre las rocas de la mina con los explosivos ANFO se determinan mediante dos ensayos de laboratorio: el Ensayo de "Reactividad", que define si una muestra de pozo de tronadura es capaz o no de generar la reacción exotérmica con el nitrato de amonio, y el Ensayo de "*Sleep-Time*", que estima el tiempo que le toma a la muestra para reaccionar con el explosivo. En este estudio se definen 6 zonas de muestreo, desde donde se extraen 85 muestras de pozos de tronadura distribuidas en 3 fases de explotación: Infiernillo 5, Casino e Infiernillo 7. Para ello, se revisa la geología del yacimiento, cuyo fin es identificar diferentes litologías, estructuras y sectores con mayor o menor presencia de sulfuros de hierro.

Los resultados del Ensayo de Reactividad indican, por un lado, que en 81% de las muestras de la Fase Infiernillo 5 ocurre reacción auto-sostenida, lo que significa que, una vez iniciada la reacción, esta se mantiene en el tiempo. En la Fase Casino, este valor es de 64%, mientras que en Infiernillo 7 ninguna muestra (0%) es auto-sostenida. Por otro lado, en Infiernillo 5 se registran Temperaturas Máximas mayores (indicio de mayor peligro) comparadas con las otras fases, con un promedio de 114°C, mientras que en Casino e Infiernillo 7 promedian 82°C y 72°C respectivamente. De acuerdo al Ensayo de *Sleep-Time*, las muestras de Infiernillo 5 requieren menos tiempo para que ocurra reacción con el ANFO (0,1 días mínimo), a diferencia de la Fase Casino (0,2 días mínimo). Paralelamente, se estima la concentración de minerales metálicos de cada muestra mediante briquetas pulidas, y el mayor promedio de porcentaje en peso (% p/p) de pirita se observa en la Fase Infiernillo 5 (1,83% p/p), seguido de la Fase Casino (1,05% p/p) y, finalmente, de la Fase Infiernillo 7 (0,61% p/p). Estas estimaciones son congruentes con los resultados de los ensayos, puesto que, a mayor concentración de pirita, la reacción tiende a ocurrir en menos tiempo y a alcanzar mayores temperaturas, sin embargo, existen otros factores que influyen en la reacción, como la cantidad de estructuras, que aumentan la permeabilidad de las rocas, lo que significa mayor oxidación de los sulfuros de hierro. Esta conjugación de factores genera condiciones más óptimas para la reacción.



# 1. Introducción

## 1.1. Generalidades

En minería, la etapa de perforación y tronadura es fundamental para el desarrollo, explotación y expansión de un yacimiento. El procedimiento consiste en perforar pozos de tronadura de largo y diámetro determinados, que se rellenan con explosivos a granel. Posteriormente, los pozos cargados se detonan, lo que libera gases con tanta velocidad que la roca se fragmenta. El objetivo de este proceso es reducir el tamaño y consolidación de las rocas, permitiendo una extracción *in situ* de los minerales de interés económico, o bien remover material estéril para fines de la operación.

Los explosivos utilizados se fabrican mediante la combinación de dos mezclas separadas. Por un lado, el ANFO (mezcla de nitrato de amonio en formato *prill* o gránulos con petróleo) y, por otro lado, una emulsión matriz, compuesta por una mezcla de una solución de nitrato de amonio puro con agua y aditivos (que actúa como fase oxidante) con petróleo, emulsificantes y/o aceites minerales (fase combustible). Se les denomina comúnmente como explosivos de base ANFO.

Desde la implementación de los explosivos de este tipo en la industria minera, han ocurrido numerosos eventos de peligrosidad variable, pero considerable, producto de la interacción que ocurre entre el componente principal de los explosivos de base ANFO (el nitrato de amonio) con suelos “reactivos” o “calientes” (AEISG, 2017). Ejemplos de ello son los casos de Faro (Canadá, 1989), Century (Australia, 1998), Gaisky (Rusia, 2009), Collahuasi (Chile, 2014), entre otros. Estos suelos reactivos o “calientes” consisten en rocas con una cantidad no menor de sulfuros de hierro (principalmente pirita, marcasita y pirrotina) que, bajo condiciones de humedad y oxidación, generan calor y acidez. Cuando estos suelos entran en contacto con el nitrato de amonio de los explosivos, comienzan una serie de reacciones auto catalíticas asociadas a la descomposición del nitrato, que liberan más acidez, calor y gases nitrosos. Si es que la concentración de sulfuros de hierro es suficientemente alta, la tasa de las reacciones llega a un nivel en que la generación de calor es tal que la columna de explosivos en el pozo de tronadura puede deflagrar e incluso detonar prematuramente.

En la mina Los Bronces (Región Metropolitana, Chile), propiedad de Anglo American, se detectan en tres ocasiones condiciones anormales en pozos de tronadura, con y sin carga de explosivos. La primera de ellas (enero de 2016), se caracteriza por involucrar emanación de gases nitrosos en un pozo de tronadura de la Fase Infiernillo 5, cargado 3 días antes con explosivos. En octubre de 2016 se identifica un segundo evento en la Fase Infiernillo 5, donde se registran temperaturas por sobre 35°C en cuatro pozos de tronadura sin carga de explosivos, donde las temperaturas normales no superan los 15°C. En el tercer evento, a fines de marzo de 2017, se detectan temperaturas sobre 30°C en cuatro pozos de tronadura sin cargar en una malla de tronadura de la Fase Casino.

A raíz de estas situaciones, la Superintendencia de Perforación y Tronadura, de la División Los Bronces de Anglo American, dirigida por el Sr. Michael Armstrong, le solicita a la Superintendencia de Investigación Aplicada de Enaex Servicios S.A., un estudio más acabado para identificar los sectores de la mina con mayor potencial para generar las reacciones exotérmicas involucradas en la descomposición del nitrato de amonio, y recomendaciones asociadas al mejoramiento de las prácticas de carguío de explosivos en pozos de tronadura. Cabe mencionar que este es un estudio pionero dentro de la industria minera, debido a que estos fenómenos y su problemática rara vez se difunden, por lo que se destaca a la Superintendencia de Perforación y Tronadura de Los Bronces por incentivar el enfoque técnico-profesional a esta investigación.

## **1.2. Hipótesis del Trabajo**

Altas concentraciones de minerales sulfurados de hierro podrían aumentar el potencial de generación de una reacción exotérmica acelerada con el componente principal de los productos explosivos (nitrato de amonio) bajo ciertas condiciones del medio.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar cuáles sectores de la mina Los Bronces son más propensos a acelerar las reacciones químicas exotérmicas entre explosivos de base ANFO y minerales sulfurados en pozos de tronadura.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Explicar la fenomenología de la reacción entre sulfuros de hierro y el nitrato de amonio.
- Sectorizar la mina en zonas de muestreo de acuerdo a criterios geológicos y operacionales.
- Caracterizar el comportamiento reactivo de cada zona de muestreo y correlacionarlo con los contenidos de sulfuros de cada muestra.
- Detectar zonas o condiciones de alerta en las cuales exista riesgo de reacción química exotérmica acelerada en pozos de tronadura.

### 1.4. Ubicación y Accesos

La mina Los Bronces se ubica en la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana, a 65 km al NE de la ciudad de Santiago (Figura 1). Se emplaza en la Cordillera de los Andes, a una altura que oscila entre 3.000 y 4.000 m s.n.m. El yacimiento se enmarca dentro de las coordenadas UTM 6.330.000 N - 6.334.000 N y 381.000 E - 383.000 E, y en las coordenadas geográficas 33°15' S y 70°30' W.

El acceso principal a la mina comienza desde la ciudad de Santiago, a través de la ruta G-21 con dirección al centro de *ski* Farellones, hasta el km 31 (Sector El Corral), donde se debe tomar un desvío en dirección norte por la ruta G-245 que sigue el valle del Río San Francisco, durante 34 km hasta llegar a las dependencias de la mina.

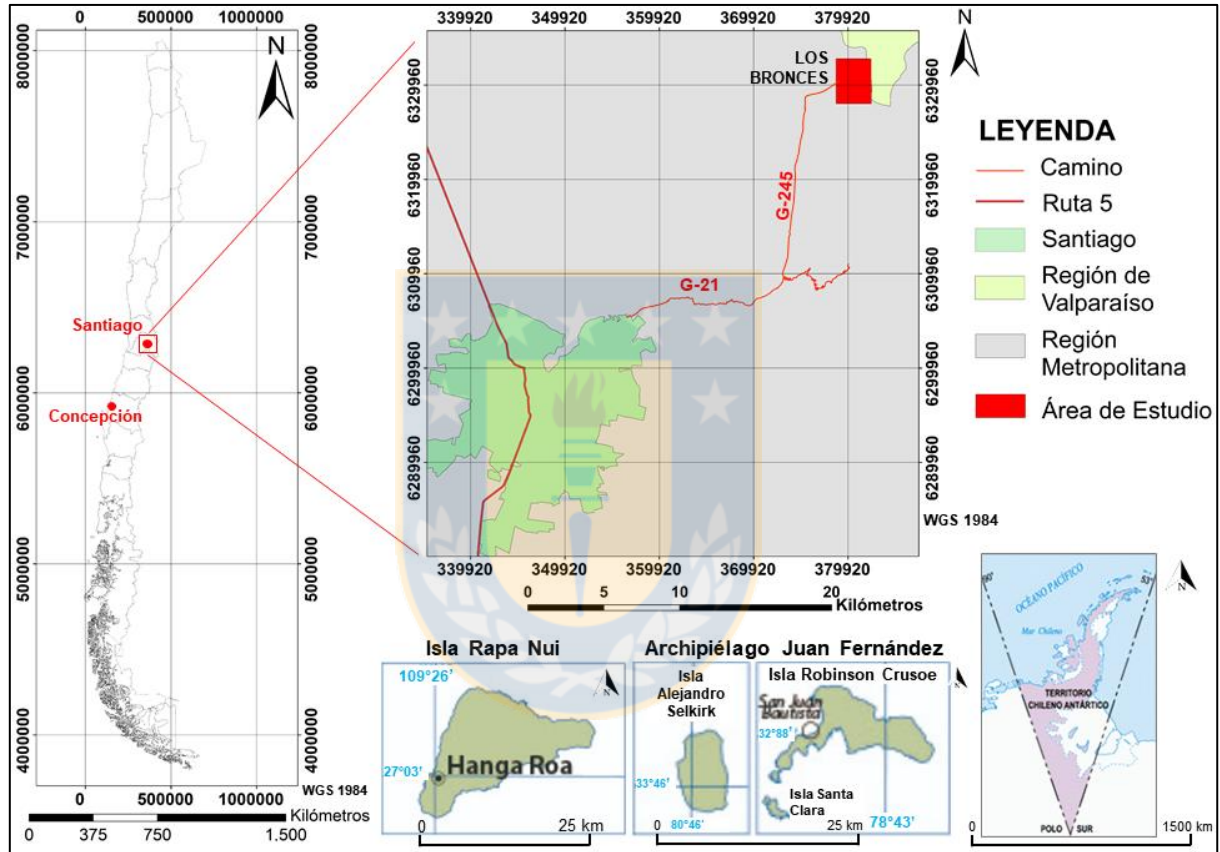
### 1.5. Trabajos Anteriores

Forshey *et al.* (1968) realizan una de las primeras descripciones de la reacción que ocurre entre sulfuros de hierro con el ANFO en laboratorio, donde determinan las temperaturas de inicio de reacción auto-sostenida, y las variaciones de ella bajo diferentes condiciones. También indican que el ANFO en contacto con algunos aditivos, como la urea y el carbonato de calcio, puede retardar la reacción con los sulfuros de hierro.

Lukaszewski (1968) ejecuta experimentos para definir las condiciones críticas para la combustión entre el ANFO y los sulfuros de hierro. Determina temperaturas máximas

durante la reacción, y experimenta con diferentes agentes químicos y metodologías de control para prevenir la oxidación y combustión del sistema ANFO-sulfuro de hierro.

Habashi (1973) en sus estudios determina que, durante la oxidación de la calcopirita, se libera el cobre primordialmente, donde luego el hierro remanente tiende a formar óxidos. Esto descarta que la presencia de calcopirita como sulfuro de hierro y cobre sea relevante para la ocurrencia de la reacción.



**Figura 1:** Mapa de Chile con la ubicación y vías de acceso a la mina Los Bronces.

Miron *et al.* (1979), en base a prolongados experimentos, emulan las condiciones de los pozos de tronadura para determinar la temperatura a la que ocurre una reacción acelerada entre explosivos de base ANFO y la pirita. Definen los rangos de porcentaje de urea como agente inhibidor de la reacción.

Harries *et al.* (1986) ejecutan una serie de experimentos con pozos de tronadura reales en la mina Mt. Whaleback, Australia, donde ponen en contacto nitrato de amonio con y sin inhibidores compuestos de óxido de zinc y carbonato de magnesio. Luego de analizar

las temperaturas y el tiempo de inicio de la reacción entre el pozo y el nitrato de amonio, determinan que esta se cataliza por ácido sulfúrico.

Rumball (1991) en su tesis de doctorado, estudia el detalle de las reacciones químicas que ocurren durante la interacción entre suelos ricos en sulfuros de hierro oxidados y nitrato de amonio en una mina de hierro en el monte McRae, Australia. Propone un perfil de temperatura asociado a cada una de las etapas de la reacción, y, además, resume las ecuaciones balanceadas de la cadena de reacciones químicas.

Miron (1992) resumen las principales causas de la ocurrencia de la reacción entre nitrato de amonio y pirita, en respuesta a una seguidilla de detonaciones prematuras en diferentes minas de EE.UU. Propone recomendaciones prácticas para evitar estos incidentes, entre ellos, una metodología de control de la temperatura de los pozos de tronadura cargados, determinar la cantidad de sulfuros en la zona, y limitar el tiempo para detonar las cargas.

Briggs & Kelso (2001) luego de un incidente en un pozo de tronadura de la mina Century, Australia, realizan un estudio para determinar zonas de la mina en donde puede ocurrir o no la reacción entre los explosivos de base ANFO y sulfuros de hierro. Este estudio concluye que es necesario un lineamiento entre la geología de la mina y los procedimientos de perforación y tronadura para definir condiciones de mayor seguridad, sobre todo en sectores donde hay sulfuros de hierro meteorizados.

Chandra & Gerson (2010) utilizan metodologías electroquímicas para describir el proceso de oxidación de la pirita, con lo que determinan la presencia de especies intermedias durante el desarrollo de las reacciones. También indican que las concentraciones, tamaño de grano, temperatura, presión, variaciones de pH y del Eh son fundamentales en la generación de diferentes productos.

Priyananda *et al.* (2015) definen la ecuación del calentamiento que sufre una emulsión explosiva de nitrato de amonio en contacto con pirita en un pozo de tronadura emulado. Determinan, mediante estudios microscópicos, un aumento en la porosidad de la emulsión debido a la continua generación de burbujas de gas en la interfase emulsión-pirita, lo que disminuye la conductividad termal de la emulsión excesivamente. Este

descubrimiento explica la baja capacidad de la emulsión de disipar el calor mientras se desarrolla la reacción, lo que, en consecuencia, puede provocar que la emulsión detone.

## 1.6. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la gente de Anglo American. A Michael Armstrong por tener la iniciativa de discutir esta problemática con el área de geología de Los Bronces, por aceptar la propuesta de trabajo y recibirme como memorista, y, finalmente, por financiar este estudio. A Pablo Cabello, mi tutor. Su apoyo en diversas situaciones, conocimientos y retroalimentación sobre mi trabajo fueron fundamentales para lograr este estudio. Quiero incluir también al personal de la Superintendencia de Perforación y Tronadura, a don Guillermo, don Froilán, a los Davey Bickford, a todos los que me apoyaron cuando lo necesitaba. Al personal de Guíñez Ingeniería, por la importancia de su trabajo durante la campaña de muestreo. A don Manuel Díaz, Superintendente de Geología, por su ayuda fundamental en este trabajo. A la gente de la Superintendencia de Geología, en especial Ricardo Cretier, Miguel Soto y Rodrigo Rojas. Su ayuda y simpatía durante mi estadía en Los Bronces jamás lo olvidaré. A Marcelo Rocha, por apoyarme con las briquetas, a Miguel Ubilla, muchas gracias por el trabajo de las descripciones. Al personal de Las Tórtolas, Mauricio Carranza, gracias por toda la ayuda durante esa etapa, también a César, Jorge y Gonzalo, por responder a todas mis dudas y por su buen humor en cada desayuno, almuerzo, reunión de desvío, etc.

A la gente de Enaex en Calama, muchas gracias. Hago mención especial a María Virginia Ramírez, por abrirme las puertas y por incentivar e impulsar esta línea de investigación. Al equipo de trabajo que tuve, Alea y Alejandro. Su amistad, ayuda, conocimientos, las conversaciones eternas, las comidas, las sacadas de vuelta, y un sinfín de otras cosas las recordaré siempre. Hicieron que la estadía allá sea mucho más amena. Al personal del laboratorio, a la Maca y al Andrés, muchas gracias por su buena onda y por su ayuda en momentos complicados. Espero que se cumplan todas sus metas.

Le agradezco también a mi Profesor Patrocinante, Abraham González Martínez, por su apoyo y el buen recibimiento que le dio a esta memoria. Durante años, junto al profesor

Luis Quinzio Sinn, nos brindaron muchas enseñanzas que van a perdurar en el tiempo. Esta carrera no sería lo mismo sin ustedes.

Por último, y no menos importante, quiero agradecer a mi familia. A mi madre, pilar fundamental e incondicional en mi vida. Mis hermanos y mi padre, por su constante interés en que logre mis metas. A la Karen, mi compañera por años, por su paciencia infinita, por el apoyo y el cariño infinitos. Finalmente, a mis amigos de siempre y a los de la carrera. Sin duda, estos fueron los mejores años, y eso es gracias a ustedes. Nos vemos para la próxima junta, quizás algún congreso, paseo, o lo que sea que sirva de excusa. Un abrazo para cada uno.



## 2. Marco Teórico

### 2.1. Explosivos de Base ANFO

#### 2.1.1. Referencia Histórica del Nitrato de Amonio

Los orígenes del uso del nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) en explosivos se remontan al siglo XIX cuando Grindel & Robin lo emplean como reemplazo del nitrato de potasio en la pólvora (Akhavan, 2004). Luego, en 1867, los químicos de origen sueco Olhsson & Norrbín descubren que las propiedades explosivas de la dinamita se acentuaban al añadir el nitrato de amonio. Tras esto, Alfred Nobel adquiere las patentes de nitrato de amonio de estos investigadores y comienza a usarlo en sus composiciones explosivas (Akhavan, 2004).

La invención del ANFO (*ammonium nitrate – fuel oil*) surge en la década de 1950, y es una respuesta a la necesidad, en primer lugar, de abaratar los costos de las tronaduras en minas de carbón europeas a mediados del siglo XX (el  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  es un insumo barato), y, en segundo lugar, a la necesidad de solventar el problema del agua en estas minas (Akhavan, 2004). Después de la década de 1970, se desarrollan emulsiones explosivas que contienen una solución de nitrato de amonio en petróleo, más resistentes al agua.

#### 2.1.2. Desarrollo de Explosivos con Base de Nitrato de Amonio

El nitrato de amonio puro por sí solo no es explosivo, además de que es muy soluble en agua. En minería industrial, sobre todo a rajo abierto, se utiliza una mezcla de nitrato de amonio sólido y petróleo (hidrocarburos líquidos), denominado ANFO, con una emulsión matriz compuesta por una disolución sobresaturada de nitrato de amonio puro, agua y aditivos (fase oxidante) con petróleo o aceites minerales, emulsificantes y aditivos (fase combustible). La emulsión matriz por sí sola, al igual que el nitrato de amonio puro, no es explosiva, pero en presencia de ANFO, puede ser sensibilizada, esto conjuntamente con hacerla explosiva, disminuye su densidad. Esta mezcla y sus variantes se clasifican como “ANFO Pesado”.

Las emulsiones explosivas, tienen la ventaja de ser muy resistentes al agua, y poseen una detonación más efectiva gracias a que el nitrato de amonio y el petróleo están en



contacto cercano (lo que le confiere una alta eficiencia energética). Las emulsiones explosivas de base ANFO son más seguras que la dinamita (gracias a su mayor resistencia a la fricción, a los impactos y al fuego) y su fabricación es de bajo costo. Otra ventaja que tienen es que cumplen con una de las obligaciones de la industria, que consiste en que las materias primas no deben tener capacidad de detonación durante el transporte. Gracias a las características de estos productos, es posible mezclarlos directamente en la faena, con el equipamiento adecuado, lo que evita el riesgo de tener que hacerlo antes de transportarlo al lugar de uso. Una vez mezclados, se convierten en producto explosivo, lo que puede significar un gran riesgo, si es que se transportan de esta manera (cualquier incidente podría provocar una detonación).

Dentro de las variantes en los explosivos clasificados como ANFO Pesado, destacan los siguientes productos utilizados en faena:

- Serie Blendex®: producto estándar de bajo costo y de alto poder explosivo para generar fracturas. Se mezcla en faena a proporciones específicas según los requerimientos.
- Serie Pirex®: producto especial de alto poder explosivo para generar fracturas, pero su formulación incluye un aditivo utilizado para prevenir el problema de la reacción de nitrato de amonio con sulfuros de hierro, lo que aumenta su valor en relación a la Serie Blendex®. Se mezcla en faena a proporciones específicas según los requerimientos.

## **2.2. Reacción de Sulfuros Metálicos con Nitrato de Amonio**

### **2.2.1. Generalidades**

Las emulsiones explosivas que contienen nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) usadas en pozos de tronadura pueden reaccionar exotérmicamente con la pirita, causando que la emulsión se caliente intensivamente y detone prematuramente (AEISG, 2017).

Tras la perforación de los pozos de tronadura, proceso que involucra el uso de triconos como cabezales y otras maquinarias para triturar y extraer la roca, se genera polvo de pirita y otros sulfuros de hierro presentes en la roca que se quiere explotar (pirrotina o calcopirita), los que se acumulan en el fondo y en las murallas de los pozos (Priyananda

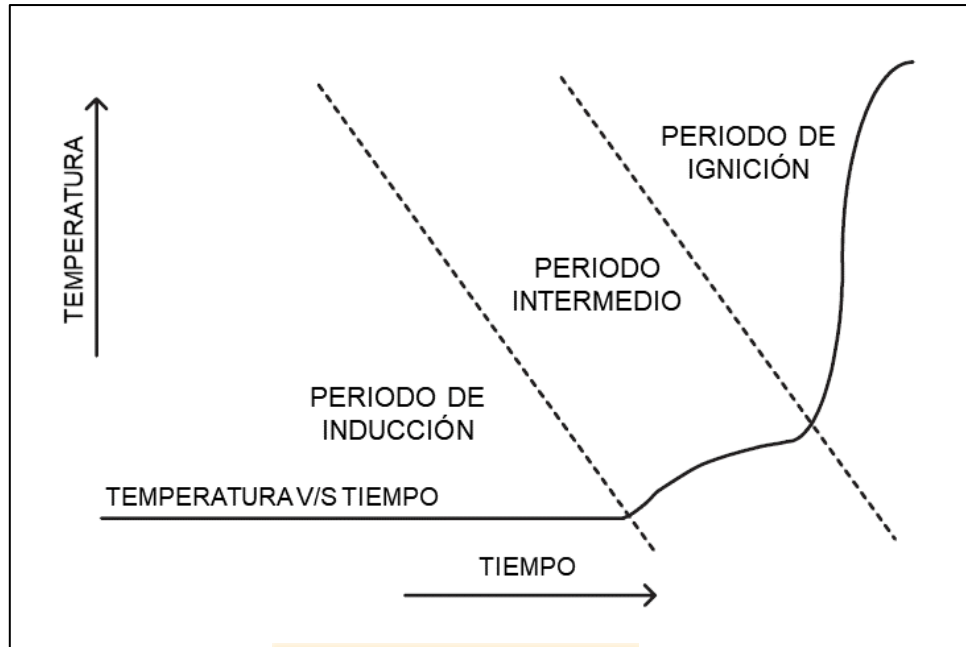
*et al.*, 2015). La reacción entre el nitrato de amonio con sulfuros de hierro (principalmente pirita) es un proceso auto catalítico, que después de un periodo de inducción puede llevar a una descomposición exotérmica. Empíricamente se ha demostrado que la reacción exotérmica entre pirita parcialmente meteorizada, y nitrato de amonio puede iniciarse a temperaturas desde 25°C a 65°C, donde la reacción requiere de un periodo o tiempo de incubación para nutrirse de ácido nitroso como catalizador (Rumball, 1991 *in* Briggs & Kelso, 2001). Bajo la influencia de este ácido, se reduce rápidamente el nitrato de amonio y luego se oxida la pirita, culminando en una descomposición explosiva del nitrato de amonio o en una combustión espontánea del suelo que contiene el sulfuro (Briggs & Kelso, 2001).

### **2.2.2. Química de la Reacción**

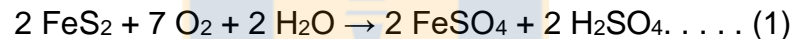
La reacción entre el nitrato de amonio y los sulfuros de hierro parcialmente meteorizados se puede describir mediante 3 etapas fundamentales, presentadas inicialmente por los estudios de Rumball (1991) sobre la materia. La primera etapa se define como el periodo de inducción (el que puede durar de minutos a meses), donde hay muy poca generación de calor. La segunda etapa, llamada intermedia, produce una cantidad moderada de calor. Finalmente, la tercera etapa o etapa de ignición produce mucho calor en un corto periodo de tiempo, que puede aumentar las temperaturas sobre 700°C (Rumball, 1991 *in* Briggs & Kelso, 2001). La Figura 2 representa simplificada la variación de la temperatura con el tiempo al ocurrir la reacción.

La química de estos procesos es compleja e incluye factores externos que contribuyen a una potencial reacción, como el contenido de humedad, abundancia de sulfuros de hierro, presencia de otros minerales en la roca y el tamaño de partículas (Briggs & Kelso, 2001). Rumball (1991) desarrolla las siguientes reacciones para describir estos procesos:

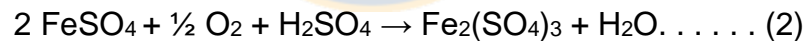
- Cuando se meteorizan o se oxidan naturalmente los sulfuros de hierro como la pirita, se generan soluciones de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y ácido sulfúrico (Reacción 1). Esto ocurre cuando los sulfuros están expuestos a humedad y aire, a través de procesos químicos, electroquímicos e incluso bacteriales (Briggs & Kelso, 2001).



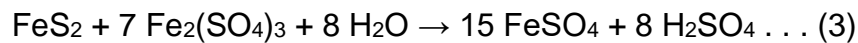
**Figura 2:** Progresión en el tiempo simplificada de la temperatura de la reacción entre el nitrato de amonio y los sulfuros de hierro. Tomado de Briggs & Kelso, 2001.



- El sulfato de hierro (II) [ $\text{FeSO}_4$ ] reacciona a su vez con el oxígeno del aire y con el ácido sulfúrico para generar sulfato de hierro (III) [ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ], el que aporta con iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Reacción 2).

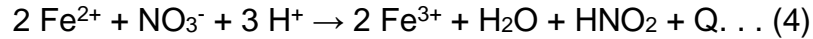


- El sulfato de hierro (III) reacciona con el exceso de pirita para producir más sulfato de hierro (II) y más ácido sulfúrico (Reacción 3).

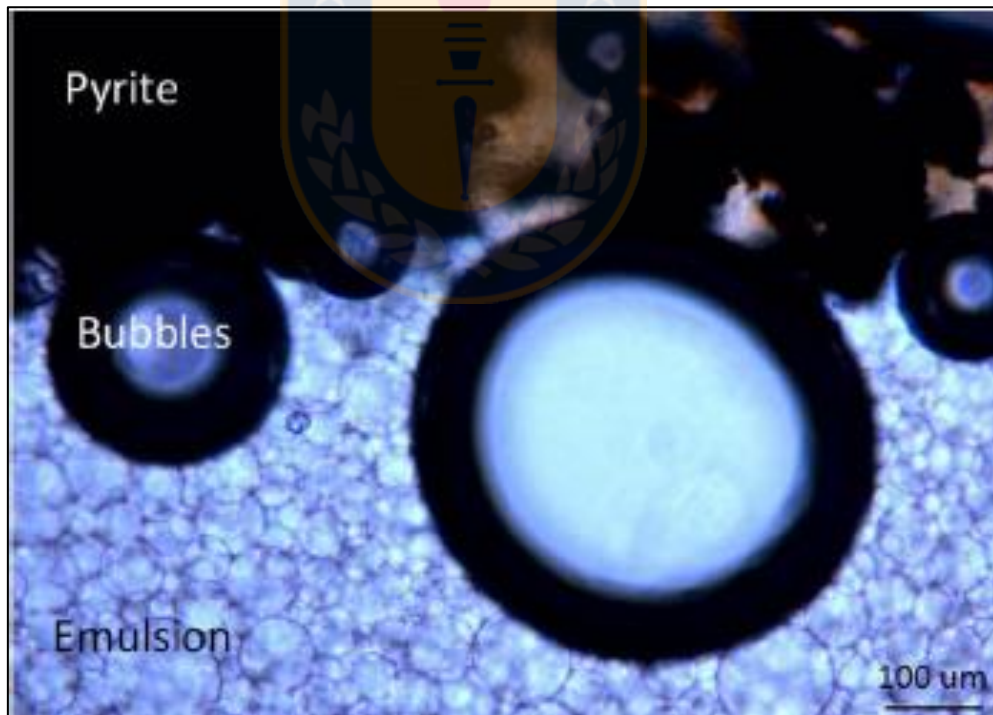


- Con la presencia de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), el ion ferroso y el ácido sulfúrico producto de la meteorización comienzan a catalizar su descomposición (Reacción 4), con lo que se inicia una cadena de reacciones auto-catalíticas. El nitrato se reduce a ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ), inicialmente gracias al sulfato de hierro (II) (Reacción 4), pero también por la pirita una vez que se consumen los iones ferrosos libres ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (Reacción 5). Estas reacciones son exotérmicas, pero con velocidades muy bajas al

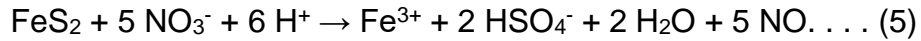
principio, en consecuencia, el aumento de calor es despreciable debido a que las especies catalizadoras se están acumulando aún, hasta llegar a un nivel crítico, lo que equivale a la etapa de inducción (Figura 2) (Briggs & Kelso, 2001).



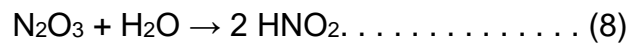
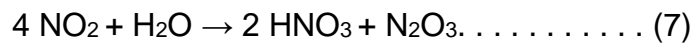
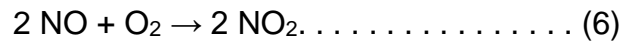
- Donde “Q” es la energía liberada como calor. Otro factor que contribuye al aumento de temperatura, es que la interfase donde ocurre la reacción se vuelve porosa gracias a la formación de burbujas de NO (óxido nítrico) gaseoso (Figura 3). Esta porosidad afecta la disipación del calor generado desde la interfase reactiva, causando que se acumule el calor y acelerando aún más la reacción (Priyananda *et al.*, 2015). La etapa de inducción termina cuando los niveles de ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) son suficientemente altos para catalizar la oxidación de la pirita por los iones nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Reacción 5). Acá, la temperatura puede aumentar a  $100^\circ\text{C}$  en unos pocos minutos (etapa intermedia).



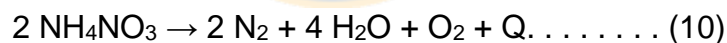
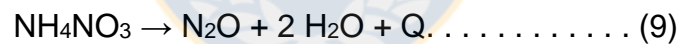
**Figura 3:** Microfotografía de la interfase reactiva entre la emulsión y la pirita, al final de la etapa de inducción, donde se forman las burbujas de NO gaseoso. Tomado de Priyananda *et al.*, 2015.



- El óxido nítrico (NO) facilita la formación de ácido nitroso, el que actúa después como auto catalizador (ecuaciones 6 a 8), ya que disminuye el pH (aumenta la acidez) y acelera la tasa de la reacción, por ende, aumenta la generación de calor (Reacción 5). Una porción del óxido nítrico reacciona con oxígeno del aire para producir dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) (humo color café visible antes de las deflagraciones espontáneas de explosivos ANFO).



- Cuando se forman suficientes cantidades de catalizadores para el HNO<sub>2</sub>, la tasa de la reacción aumenta bruscamente y el calor generado (Reacción 4) hace que la temperatura aumente tanto que es inevitable la rápida y potencialmente violenta descomposición del nitrato de amonio remanente (etapa de ignición). Se debería producir óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) (Reacción 9), pero debido al aumento de la temperatura, se favorece la formación explosiva de nitrógeno gaseoso (N<sub>2</sub>) (Reacción 10).



### 2.2.3. Factores que Afectan la Reactividad

Todos los sulfuros de hierro son inestables termodinámicamente con los nitratos, por lo tanto, pueden ser reactivos (Briggs & Kelso, 2001). Sin embargo, la tasa de la reacción no es directamente dependiente de la cantidad de sulfuros de hierro presente (Forshey *et al.*, 1968 *in* Briggs & Kelso, 2001). Otros factores que afectan la tasa de la reacción incluyen las heterogeneidades del tamaño de grano, así como el tamaño de las partículas del sulfuro de hierro (mayor oxidación gracias a una mayor superficie de contacto). Los otros minerales de la roca igual pueden interactuar con los reactivos o los productos, o afectar el flujo de calor durante las reacciones exotérmicas. Tal es el caso de los carbonatos, que tienen capacidad para neutralizar el pH en el sistema.

El contenido de humedad es uno de los factores que más afectan la reactividad. Cuando el contenido de agua en el sistema está entre 1% y 5%, el potencial para la reacción está en condiciones óptimas (Briggs & Kelso, 2001). Muestras con <1% de agua van a ser más lentas o no se van a calentar lo suficiente, debido a que el agua transporta los reactivos durante las reacciones. Similar consecuencia tiene un contenido de agua >5%, ya que tal cantidad diluye demasiado los reactivos en la solución, y además se pierde calor en el sistema gracias a la alta capacidad calorífica del agua.

Otro factor es el confinamiento, condición que se observa en los pozos de tronadura. En espacios reducidos, las temperaturas aumentan rápidamente, a pesar de los relativamente bajos aportes de calor de las reacciones. Esto se favorece gracias a la baja conductividad termal y las bajas capacidades caloríficas de los sulfuros y del nitrato de amonio, lo que significa que son incapaces de transmitir hacia afuera el calor desde su fuente (Briggs & Kelso, 2001).

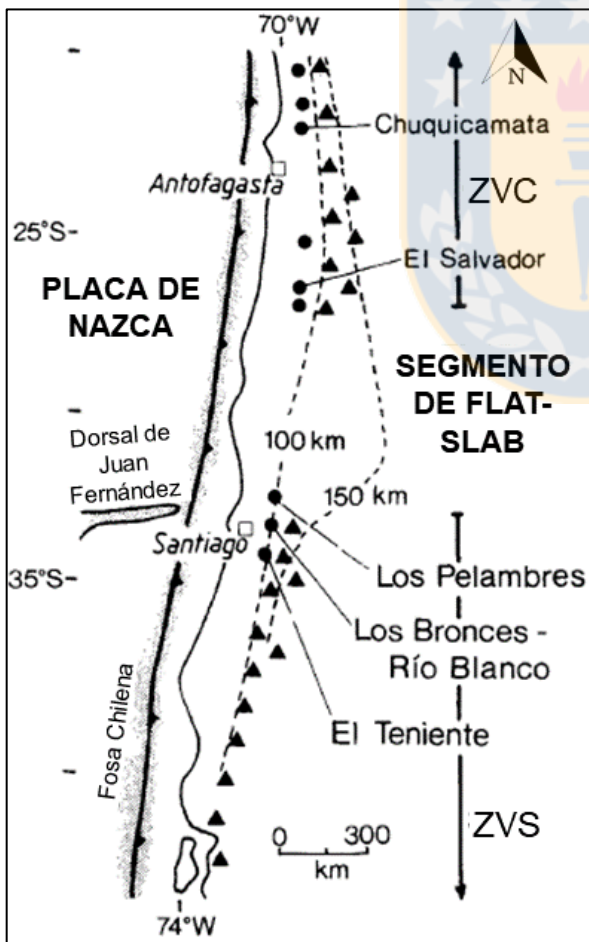
El uso de inhibidores químicos es la metodología más usada a nivel industrial para prevenir la reacción. Tras exhaustivos estudios de la U.S. Bureau of Mines, entre otros, se concluye que bajas concentraciones (1% a 5%) de urea, carbonato de calcio, óxido de zinc y óxido de manganeso se pueden añadir al ANFO para inhibir la reactividad del nitrato de amonio con sulfuros de hierro oxidados (Forshey *et al.*, 1968; Lukaszewski, 1968; Miron *et al.*, 1979; Harries *et al.*, 1986; Miron, 1992 *in* Briggs & Kelso, 2001). Los inhibidores aumentan la temperatura a la que el nitrato de amonio y el sulfuro reaccionan normalmente. Entre todos, la urea ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) es la más efectiva, gracias a su habilidad para neutralizar ácidos y también para remover especies catalizadoras mediante complejamiento (forma complejos con iones férrico y ferroso) o mediante reacciones paralelas (por ejemplo, con  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ). Los inhibidores explosivos se usan frecuentemente en emulsiones como lo son los ANFO, donde se aumenta las propiedades de prevención de reacciones, ya que la presencia de 10 a 12% de agua en las emulsiones ayuda absorber parte del incremento de temperatura producto de las reacciones que ocurren en el pozo de tronadura. La serie Pirex®, por ejemplo, pertenece al grupo de productos explosivos que incluyen inhibidores.

## 3. Marco Geológico

### 3.1. Marco Geológico Regional

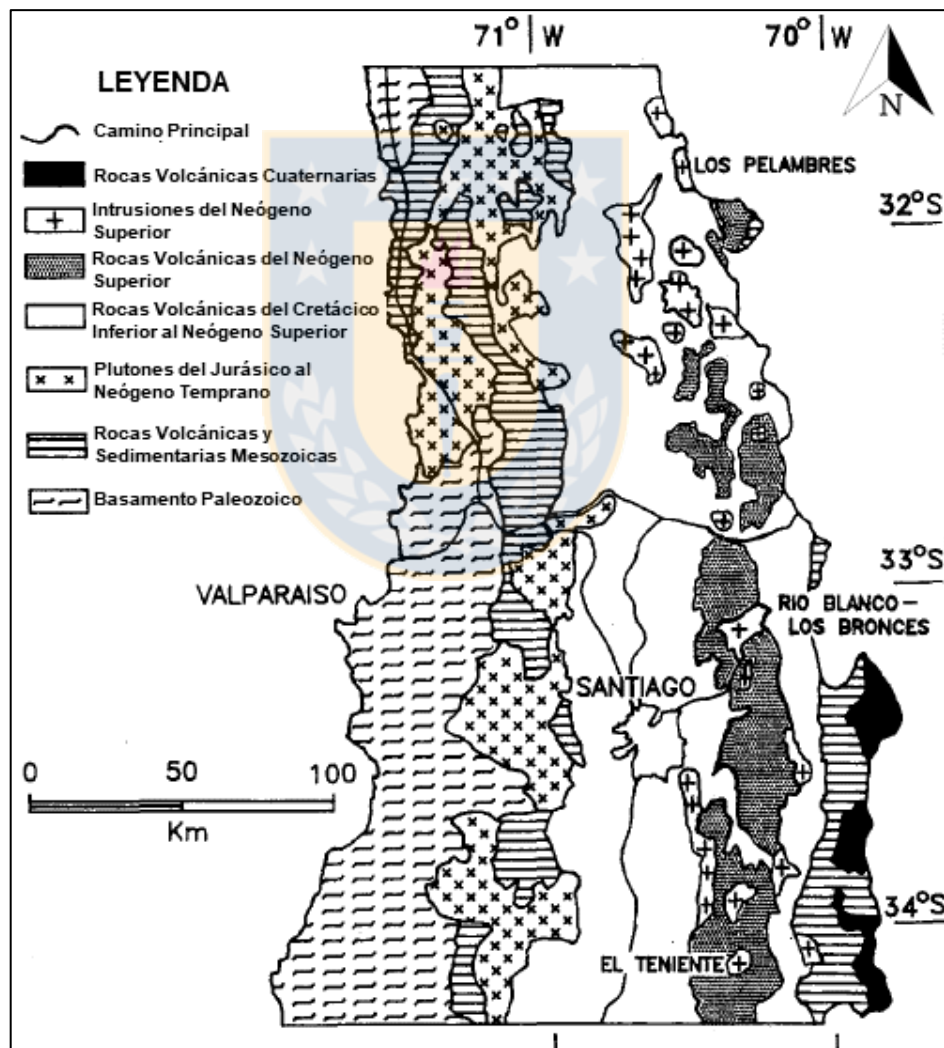
#### 3.1.1. Generalidades

El depósito gigante de cobre-molibdeno Río Blanco-Los Bronces es parte de un importante cinturón de mineralización de pórfidos de cobre formado durante el Mioceno-Plioceno en Chile central entre los 32°-34°S, constituido por los yacimientos de categoría mundial Los Pelambres-El Pachón, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, cercano al límite de la Zona Volcánica Sur (ZVS) y el segmento de “flat-slab” o segmento de bajo ángulo (Figura 4) (Skewes & Stern, 1994). Con reservas estimadas en >200 millones de toneladas métricas (Mt) de cobre, Río Blanco-Los Bronces constituye el cúmulo de mayor concentración de cobre en el mundo (Irrarzával *et al.*, 2010).



**Figura 4:** Ubicación del depósito Los Bronces-Río Blanco en el cinturón de pórfidos de Cu del Mioceno tardío en Chile central. Tomado de Skewes & Stern, 1994.

Las rocas más antiguas del sector corresponden a andesitas y rocas volcano-sedimentarias que forman parte de la Formación Abanico, de edad Eoceno superior-Mioceno inferior (Vergara *et al.*, 1999; Charrier *et al.*, 2002) y a la Formación Farellones, de edad Mioceno inferior a medio (Rivano *et al.*, 1990), intruidas por plutones de composición principalmente cuarzomonzonítica a cuarzomonzodiorítica, pertenecientes al Batolito San Francisco de edad Mioceno (Serrano *et al.*, 1996). Éstas, a su vez, son intruidas en su porción oriental por un complejo de brechas hidrotermales mineralizadas de edad Mioceno superior-Plioceno inferior y por rocas porfídicas del Plioceno inferior (Serrano *et al.*, 1996) (Figura 5).



**Figura 5:** Geología regional simplificada. Tomado de Serrano *et al.*, 1996.



### **3.1.2. Unidades Estratigráficas**

#### **3.1.2.1. Formación Abanico**

Definida por Aguirre (1960) en el sector cordillerano de la provincia de Aconcagua. Corresponde a una secuencia de tobas y brechas volcánicas andesíticas, de colores violáceos, púrpura y gris, con intercalaciones de lavas andesíticas y numerosos filones tipo manto de composición andesítica y basáltica (Moreno *et al.*, 1991), junto con escasa laminación de areniscas, lutitas y limos. El espesor de la formación se estima en 3.000 m.

Se distribuye en la Cordillera Principal entre los 33° y 34°S mediante dos cinturones paralelos de orientación N-S separados por la sobreyacente Formación Farellones (Muñoz *et al.*, 2010). Su límite inferior es descrito como un contacto por falla (Bustamante, 2001; Charrier *et al.*, 2002; Muñoz *et al.*, 2010) con la Formación Colimapu de edad Hauteriviano-Albiano (Charrier *et al.*, 2002). El límite superior es por discordancia angular con la Formación Farellones (Thiele, 1980; Charrier *et al.*, 2002).

El ambiente de depositación se interpreta como episodios volcánicos a lo largo de una cuenca extensa y subsidente de intra-arco orientada N-S, asociada a un periodo de extensión-volcanismo efusivo (Godoy *et al.*, 1999; Charrier *et al.*, 2002), o bien como una depositación a lo largo de los dos flancos opuestos de una cuenca volcano-tectónica intermontaña (Vergara & Drake, 1979). La edad de la Formación Abanico abarca desde el Eoceno superior hasta el Mioceno inferior (Vergara *et al.*, 1999; Charrier *et al.*, 2002).

#### **3.1.2.2. Formación Farellones**

Klohn (1960) la define inicialmente de manera formal como una secuencia de estratos volcánicos continentales del terciario inferior, que sobreyacen de manera discordante a la Formación Abanico. Vergara *et al.* (1988) la describen como una unidad de lavas de composición andesítica a riolítica, depósitos volcanoclásticos y escasos sedimentarios, plegada ligeramente y cuyo espesor máximo se calcula en 2.400 m, orientada N-S entre los 32° y 35°S de la Cordillera Principal. El límite superior corresponde a la actual superficie de erosión (Rivano *et al.*, 1990).

El ambiente de depositación se interpreta como un centro volcánico de composición andesítico y basáltico, con domos intrusivos y extrusivos, riolíticos, pero sin evidencias de desarrollo de calderas (Rivano *et al.*, 1990). La edad de la Formación Farellones queda acotada al Mioceno en base a las relaciones con la unidad que sobreyace y los cuerpos intrusivos que la cortan (cuyas edades K-Ar comprenden entre 7-4 Ma) (Rivano *et al.*, 1990). Dataciones U/Pb en circones indican edades de  $16,77 \pm 0,25$  Ma y  $17,20 \pm 0,05$  Ma (Deckart *et al.*, 2005).

### **3.1.2.3. Depósitos No Consolidados**

Thiele (1980) los define como depósitos de sedimentos aluviales, fluviales, fluvio-glaciales y glaciales. Los dos primeros, de mayor extensión, se encuentran rellenando valles. Los de origen glacial se ubican en las cabeceras de los ríos por sobre los 2.500 m s.n.m., compuestos mayoritariamente por morrenas marginales y detritos de glaciares de roca ubicados en circos o nichos en las cumbres más altas. Se los asigna al Cuaternario.

### **3.1.3. Unidades Intrusivas**

#### **3.1.3.1. Unidad Batolito San Francisco**

Warnaars *et al.* (1985) describen esta unidad como un cuerpo intrusivo expuesto en un área de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>, con 20 km de elongación N-S y 10 km en la E-W. De textura variable, está mayoritariamente compuesto de diorita cuarcífera, granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo monzodiorita, con menor cantidad de granito y sienita (Warnaars *et al.*, 1985; Serrano *et al.*, 1996). El tamaño de grano varía desde fino a grueso y la textura de fanerítica equigranular a porfídica. Las razones  $Al_2O_3/CaO+K_2O+Na_2O$  varían entre 1,37 y 1,57, lo que sugiere una composición peraluminosa y afinidad calcoalcalina (Warnaars *et al.*, 1985). Evidencias de terreno indican que esta unidad intruye a las formaciones Abanico y Farellones (Serrano *et al.*, 1996).

Serrano *et al.* (1996) y Deckart *et al.* (2005) mediante dataciones K-Ar y U/Pb estiman una edad para el Batolito San Francisco entre 20,1 y 8,4 Ma. Estos datos, junto a las relaciones de contacto con las formaciones Abanico y Farellones, permiten acotar la edad esta unidad desde el Mioceno medio a superior.

### 3.1.3.2. Intrusivos Mioceno tardío - Plioceno

Thiele (1980) lo define como intrusivos menores, de tipo stocks, lacolitos, filones-manto y diques, además de algunas chimeneas de brechas. La composición varía de dacítica a andesítica. Intruyen a la Formación Farellones y al Batolito San Francisco, ambas unidades del Mioceno. Deckart *et al.* (2005) utilizan datación U/Pb en muestras de pórfido cuarzo monzonítico y de dacitas obteniendo edades de emplazamiento de  $6,32 \pm 0,09$  a  $4,92 \pm 0,07$  Ma.

### 3.1.4. Tectónica Regional y Marco Metalogenético

El depósito porfídico de Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces se ubica hacia el este de la intersección entre la Dorsal de Juan Fernández y la Fosa Chileno-Peruana, a los 33°S, en el límite entre dos de los mayores segmentos de la tectónica andina: la Zona Volcánica Sur (ZVS) y el tramo de “*flat-slab*” (Figura 4), bajo el cual el ángulo de subducción ha disminuido significativamente desde el Mioceno medio y en el que la actividad volcánica es inexistente (Serrano *et al.*, 1996). A partir del Mioceno medio, se subducta la porción oriental de la Dorsal de Juan Fernández (Pilger, 1984 en Serrano *et al.*, 1996) lo que origina una disminución progresiva del ángulo de subducción debajo del segmento de “*flat-slab*” y, en el extremo norte de la Zona Volcánica Sur, ocurre migración del volcanismo hacia el este, deformación y engrosamiento cortical, alzamiento y erosión. Yáñez *et al.* (2002), mediante evidencias estructurales, indican que el margen continental chileno durante el Mioceno sufre de fuertes episodios compresivos, donde una de las consecuencias es una migración relevante de la Dorsal de Juan Fernández hacia el este, junto a un desplazamiento menor hacia el sur, que a lo largo del Mioceno superior y el Cuaternario termina acomodándose en su latitud actual. Maksaev *et al.* (2009) utilizan estudios de termocronología de trazas de fisión en apatitos de los intrusivos miocenos de la Cordillera Principal para determinar que estos cuerpos pasaron por periodos de enfriamiento intenso entre 6-3 Ma. Este dato es congruente con tasas de exhumación acelerada en el Mioceno superior y Plioceno temprano, lo que se interpreta como una consecuencia del alzamiento atribuido a la Fase Diaguita compresiva (Maksaev *et al.*, 2009), coincidente con el desplazamiento hacia el sur de la Dorsal de Juan Fernández mencionado anteriormente.

Dicho periodo de exhumación ocurre previo a la formación de algunos de los mayores depósitos porfídicos de Cu-Mo (Río Blanco-Los Bronces, El Teniente) durante el emplazamiento de las respectivas intrusiones mineralizadoras, gracias a intensos periodos erosivos íntimamente ligados al alzamiento del orógeno (Maksaev *et al.*, 2009). Se les atribuye a estos procesos, una disminución de la presión confinante, aceleración del enfriamiento de la fase fluida del magma y posterior desgasificación (liberación de volátiles), lo que se traduce en el desarrollo de cuerpos brechosos superficiales, hidrotermales tardíos y de alta ley (Maksaev *et al.*, 2009), responsables de portar la mayor concentración de cobre.

## 3.2. Marco Geológico Distrital

### 3.2.1. Generalidades

La geología del distrito Río Blanco-Los Bronces se caracteriza porque los afloramientos más antiguos corresponden a secuencias de rocas volcánicas andesíticas y volcano-sedimentarias de las formaciones Abanico (más profunda y de menor exposición) y Farellones (expuesta en el sector oriental del yacimiento Los Bronces). Estas rocas estratificadas son intruidas por la unidad litológica de mayor extensión en el distrito, el Batolito San Francisco, de composición cuarzomonzonítica a cuarzomonzodiorítica, emplazado durante el Mioceno. Posteriormente, y sobreimpuestos a las unidades anteriores, ocurre un complejo de brechas de origen hidrotermal y magmático, asociadas a la mineralización principal (Serrano *et al.*, 1996). Finalmente, en el Mioceno superior y Plioceno inferior, una serie de cuerpos porfídicos tardíos intruyen a las unidades predecesoras, cuyo emplazamiento, al igual que las brechas, ocurre cerca de la paleosuperficie. Estos cuerpos porfídicos se manifiestan como pulsos subvolcánicos, domos, diatremas y extrusiones (Serrano *et al.*, 1996) (Figura 6). Se estima que la ocurrencia de las brechas mineralizadas y de los pórfidos tomó <3 Ma, durante las últimas etapas de actividad del cinturón magmático miocénico (Serrano *et al.*, 1996).

Localmente se distinguen 5 fallas principales subverticales (Carrizo *et al.*, 2013), que corresponden a: Falla Norte, Falla Central, Falla Sur, Falla Infiernillo y Falla Infiernillo 2, luego Carrizo & Barros (2016) añaden 4 más: Falla AsEma30, Falla AsEma7, Falla AsEma16 y Contacto Cizallado Rioluta.

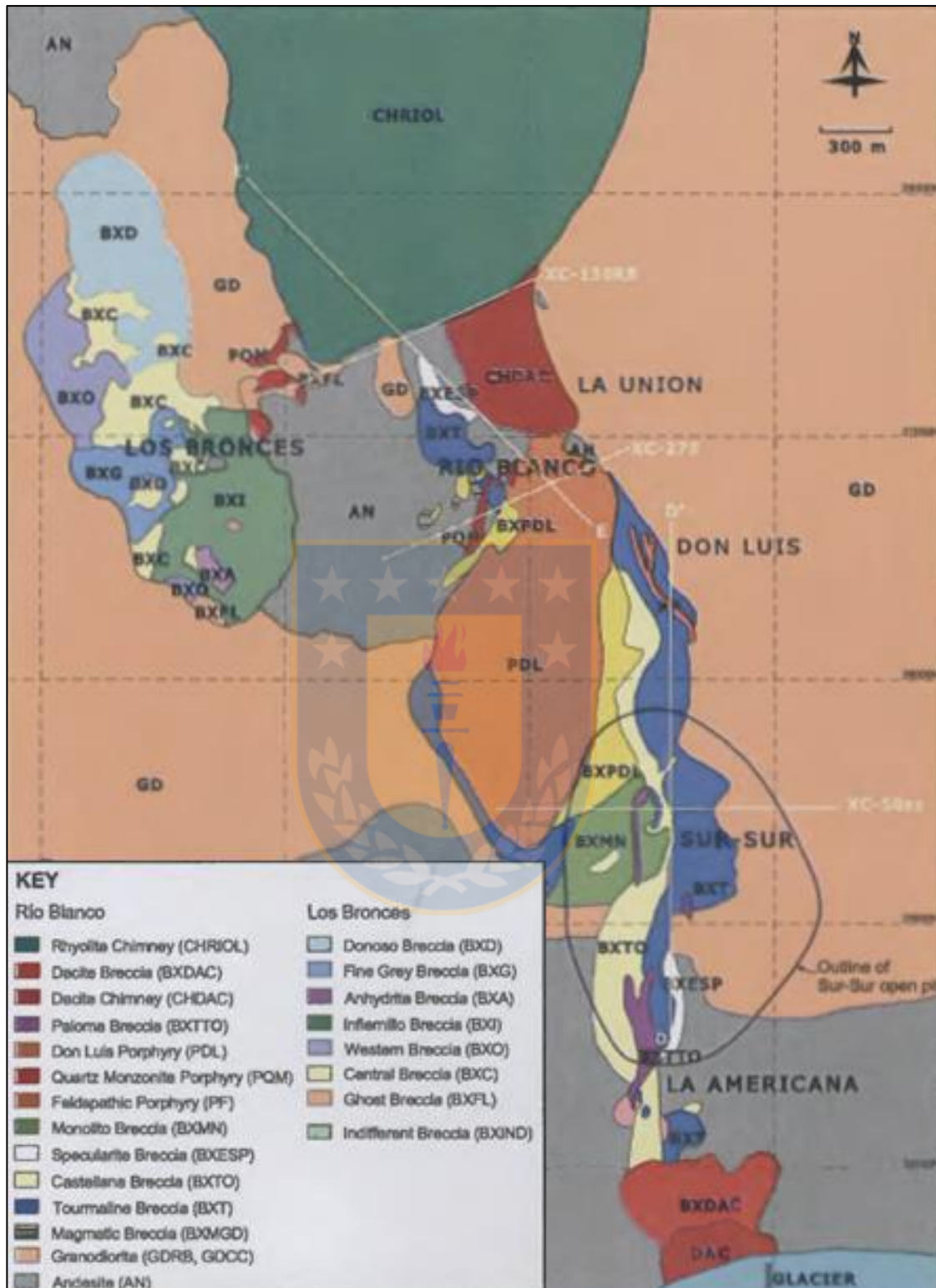


Figura 6: Geología del distrito Río Blanco-Los Bronces. Tomado de Friksen, 2003.

Se clasifican como Fallas Principales debido a su extensión (>150 m verticales) y visualización en el yacimiento. Paralelamente, se identifican otras estructuras mayores, que equivalen a fallas de menor magnitud, y estructuras menores, como diaclasas y vetillas. Las fallas principales y el resto de las estructuras reconocidas influyen en el control de los distintos dominios estructurales definidos por Carrizo *et al.* (2013).

Se identifican 3 tipos primordiales de alteración hidrotermal. La primera y más profunda es la alteración potásica, ubicada en el sector Río Blanco (propiedad de CODELCO-Andina). Se caracteriza por una intensa biotitización y está relacionada al emplazamiento de brechas mineralizadas. La segunda es la alteración propilítica, que ocurre en clastos de las brechas Donoso y Occidente con intensidad débil a moderada. Posee 2 etapas: una progrado en la que se reemplazan los máficos por clorita y se albitizan las plagioclasas y feldespatos; y una retrogrado con reemplazo de biotita secundaria por clorita, y ocurrencia de epidota en plagioclasas. Por último, la tercera se da alrededor de la zona de alteración potásica y sobreimpuesta a ella se encuentra la zona de alteración fílica. Ocurre en los intrusivos cuarzomonzoníticos y cuarzomonzodioríticos del Batolito San Francisco bajo control estructural y en zonas someras, asociada a los cuerpos de brechas.

### **3.2.2. Unidades Pre-Mineral**

#### **3.2.2.1. Andesitas**

Las rocas más antiguas del distrito corresponden a las andesitas de las formaciones Abanico y Farellones, con edades que abarcan desde los 34 Ma para la Formación Abanico (Gana & Wall, 1997 en Charrier *et al.*, 2002) a  $16,8 \pm 0,3$  Ma para la Formación Farellones (Toro *et al.*, 2012). Ésta última está constituida por lavas andesítico-basálticas, traquiandesitas y dacitas (Cepeda, 1976), cuya petrografía se caracteriza por un color gris oscuro, textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa subhedrales a anhedrales inmersos en una masa fundamental afanítica. Los fenocristales tienen tamaño máximo de 4 mm, generalmente sericitizados y, aparte de plagioclasa, hay fenocristales de biotita cloritizada y en menor cantidad anfíbol.

Se disponen subhorizontales a suavemente plegadas subyaciendo al resto de las unidades del distrito. La Formación Farellones aflora como un “*roof-pendant*” en la parte

superior del sistema, y es intruida por las unidades intrusivas y los cuerpos brechosos. Es posible observar alteración propilítica débil y sericitización en plagioclasas, y también es común encontrarla como clastos en las brechas, donde alojan mineralización de cobre y molibdeno ( $< 0,2\%$  CuT).

### 3.2.2.2. Batolito San Francisco

Es el cuerpo de mayor extensión en el distrito (Warnaars *et al.*, 1985, estiman 200 km<sup>2</sup> de área expuestos). Intruye a las litologías estratigráficas anteriores y, a su vez, es intruida por las unidades porfídicas del Mioceno superior-Plioceno. El Batolito San Francisco tiene composición geoquímica peraluminosa y afinidad calcoalcalina (Warnaars *et al.*, 1985), y se subdivide en las unidades Cuarzo Monzonita (QM) y Cuarzo Monzodiorita (QMD) de acuerdo a la clasificación de Streckeisen (1976); además se reconoce la presencia de cuerpos menores con forma de diques aplíticos y sienitas que cortan a las unidades anteriores, lo que permite diferenciar una tercera subdivisión llamada Unidad Pórfido Cuarzo Monzodiorítico (PQMD). A continuación, se describen con más detalle las subdivisiones.

#### A. Unidad Cuarzo Monzonita (QM)

Es la unidad más expuesta en la zona de explotación actual del yacimiento Los Bronces. Corresponde a un conjunto de granitos, granodioritas, cuarzomonzonitas y cuarzomonzodioritas según la clasificación QAP de Streckeisen (1976) (Contreras, 2003), con textura hipidiomórfica inequigranular de grano medio a grueso, de color gris rosado (Fotografía 1). Estas rocas están constituidas por feldespatos alcalinos anhedrales, plagioclasas anhedrales y, en menor cantidad, cuarzo anhedral, anfíbol y biotitas cloritizadas (Contreras, 2003 en Vargas, 2015). Se observa biotita secundaria y anhidrita lo que indica una alteración potásica predominante en profundidad, así como también clorita en máficos, epidota y carbonato indica ocurrencia de alteración propilítica. Igualmente, en los sectores someros se distingue mayoritariamente alteración filica, evidenciada por la sericitización de las plagioclasas. Deckart *et al.* (2005) obtiene edades en granodioritas y dioritas entre 11,96 y 8,16 Ma, lo que significa que es la unidad intrusiva más antigua.



**Fotografía 1:** Testigo de sondaje diamantino con muestra de la unidad Cuarzo Monzonita.

#### B. Unidad Cuarzo Monzodiorita (QMD)

Esta unidad está constituida por cuarzomonzodioritas, dioritas y tonalitas según la clasificación QAP de Streckeisen (1976) (Contreras, 2003). Las rocas son de color gris a gris verdoso, con textura hipidiomórfica inequigranular de grano fino (Contreras, 2003). Compuesta en su mayoría por plagioclasas, cuarzo y en menor cantidad feldespato alcalino, además de biotitas primarias y hornblendas. En profundidad se distingue alteración potásica, sin embargo, predomina la alteración propilítica definida por la asociación clorita-epidota. Sin embargo, al igual que la unidad Cuarzo Monzonita (QM), en los sectores superiores asociados a las fases de explotación actual, se distingue la alteración fílica con plagioclasas sericitizadas. Intruye a la Formación Farellones y, a su vez, es intruida por la unidad Pórfido Cuarzo Monzodiorítico (PQMD) y por el conjunto de Brechas Los Bronces, por lo que se le asigna la edad Mioceno medio.

#### C. Unidad Pórfido Cuarzo Monzodiorítico (PQMD)

Constituido por cuerpos filoneanos de composición cuarzo monzodiorítica, de textura porfídica, con fenocristales de grano medio (Contreras, 2003) y colores gris-blanco. Los fenocristales corresponden a plagioclasas, cuarzoes, feldespatos potásicos y menor cantidad de máficos, mientras que la masa fundamental, que representa alrededor del 75% del volumen se compone de agregados de cuarzo, feldespato potásico y anhidrita



(Contreras, 2003 en Vargas, 2015). La alteración hidrotermal predominante es la alteración fílica, definida por la asociación sericita-clorita y cuarzo en la masa fundamental, sobreimpuesta a una alteración potásica más profunda. Se observan indicios menores de alteración propilítica (Contreras, 2003). Intruye a la Formación Farellones y a las unidades Cuarzo Monzonita (QM) y Cuarzo Monzodiorita (QMD), y se encuentra en contacto gradacional con el Pórfido Cuarzomonzonítico (PQM).

### **3.2.3. Unidades Intra-Mineral**

#### **3.2.3.1. Pórfidos Intra-mineral**

La mineralización de Cu-Mo en los sectores de Río Blanco, Sur Sur y Don Luis ha sido superpuesta por un conjunto de *stocks* y diques porfídicos graníticos tardíos (Deckart *et al.*, 2013), de edad Mioceno tardío a Plioceno temprano. Entre ellos, se encuentran las unidades Pórfido Cuarzo Monzonítico (PQM) y Pórfido Don Luis (PDL). Estos cuerpos son de delgado espesor (<10 m), aunque en profundidad se ensanchan (Serrano *et al.*, 1996), e intruyen el área de mineralización diseminada y en *stockwork* de alta ley que se explota actualmente en la mina subterránea Río Blanco (Blondel, 1980 en Serrano *et al.*, 1996). Concentran mineralización y alteración hidrotermal y, a su vez, constituyen conductos mineralizadores.

##### **A. Pórfido Cuarzo Monzonítico (PQM)**

Corresponde a un conjunto de diques con orientación N27°W que cortan la zona de alta ley de la Brecha Magmática Río Blanco (CODELCO-Andina), donde hay ocurrencia de halos de alteración cuarzo-sericítica sobre los diques. Se compone de fenocristales de feldespato plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y biotita en una masa fundamental fina aplítica (Frikken, 2003). Los fenocristales de feldespato potásico se caracterizan por ser euhedrales y de gran tamaño (2 cm de largo). Se le determina su edad mediante datación U-Pb en circones con un rango de 7,7-6,1 Ma (Deckart *et al.*, 2013).

##### **B. Pórfido Don Luis (PDL)**

Corresponde a un cuerpo porfídico alargado, de composición dacítica que aflora en el centro del distrito Río Blanco-Los Bronces, paralelo a los diques de la unidad Pórfido Cuarzo Monzonítico (PQM) (Serrano *et al.*, 1996). Está constituido por fenocristales de

plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico (de hasta 2 cm de largo) y biotitas, en una masa fundamental fina aplítica igual a la del PQM (Frikken, 2003). Deckart *et al.* (2013) mediante dataciones U-Pb en circones acotan la edad de este cuerpo de 5,2 a 5,0 Ma, lo que significa que es el pórfido más joven del sistema.

### **3.2.3.2. Complejo de Brechas Los Bronces**

Warnaars *et al.* (1985) inicialmente reconocen 7 brechas diferentes, distribuidas en un área de 2 km de largo y 0,7 km de ancho con forma de “riñón” alargado, con orientación preferente NW-SE (Figura 7). Corresponde a las brechas llamadas, en orden cronológico: Fantasma, Central, Occidente, Infiernillo, Anhidrita, Gris Fina y Donoso. Se diferencian entre ellas por el contenido de la matriz, los clastos, tipo y grado de mineralización y alteración. La naturaleza de la matriz es fundamental para distinguirlas, así como las relaciones de contacto permiten determinar edades relativas entre ellas. La matriz puede ser constituida por cuarzo, turmalina, especularita, piritita, calcopirita, bornita, molibdenita, clorita, anhidrita, sericita y polvo de roca. La mayoría de los clastos son de cuarzomonzonita o andesita, con menores variaciones de monzodiorita. Los clastos son mayoritariamente angulosos a subangulosos, lo que sugiere poca abrasión, emplazamiento rápido y fuerte enfriamiento de los fluidos hidrotermales, asociados a la cercanía con la paleosuperficie, la que a su vez era sometida a altas tasas de erosión y alzamiento en el Mioceno Superior (Warnaars *et al.*, 1985). Las brechas ricas en cobre se emplazaron en un periodo de más de 3 Ma (Serrano *et al.*, 1996), y se interpreta su génesis como una liberación explosiva de volátiles de los últimos pulsos magmáticos relacionados al arco del Mioceno (Maksaev *et al.*, 2009).

Cabe destacar la importancia que tienen estos cuerpos brechosos en Los Bronces para la mineralización del yacimiento. Este tipo de brechas ocurren en muchos depósitos de pórfidos cupríferos, pero en Río Blanco-Los Bronces se desarrollan con un tamaño y cantidad considerable. La particularidad de este distrito es que la concentración de cobre ocurre en la matriz de los múltiples cuerpos, o bien, diseminada en los clastos de los mismos y en la roca de caja que los rodea.

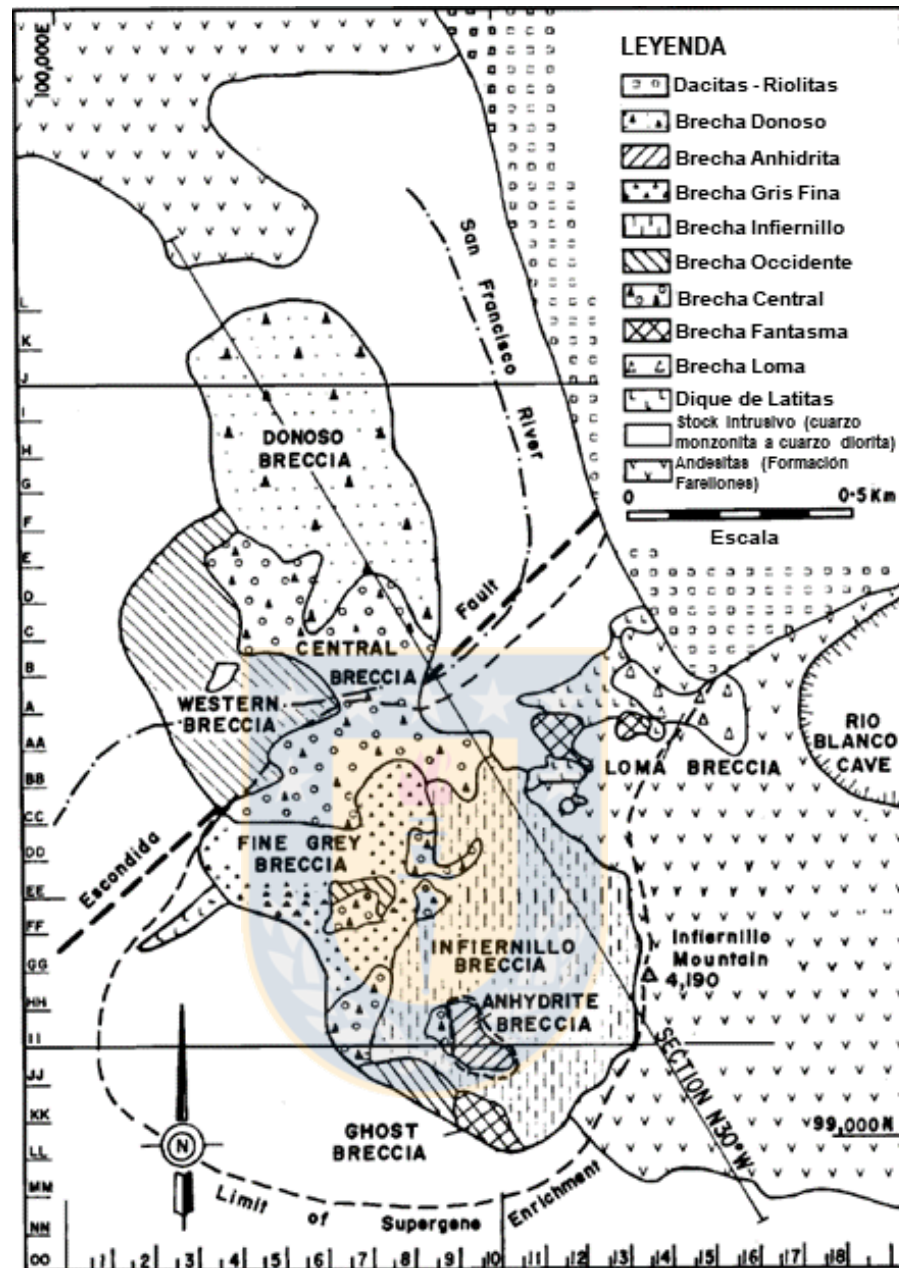


Figura 7: Distribución del Complejo de Brechas Los Bronces. Tomado de Warnars *et al.*, 1985.

El contenido de cobre hipógeno aumenta progresivamente desde las brechas más tempranas a las más tardías. Las fases más tempranas de brechas (Fantasma, Central y Occidente) se caracterizan por poseer una asociación de cuarzo-turmalina-pirita-calcopirita que actúa como cemento y que contienen leyes de cobre del orden de 0,2%. Las fases intermedias de brechas (Infiernillo, Anhidrita y Gris Fina) se diferencian por un mayor contenido de calcopirita, que alcanza leyes de hasta 0,6% de cobre. La Brecha

Donoso contiene las mayores leyes de cobre, su cemento se compone de una asociación de cuarzo-turmalina, pirita-calcopirita y calcopirita-bornita, donde la ley llega hasta 1% (Toro *et al.*, 2012).

A continuación, se entregan detalles de cada una de las brechas mencionadas, según Warnars *et al.* (1985).

#### A. Brecha Fantasma

Compuesta por clastos de cuarzomonzonita finos a gruesos, con mineralización frecuente de tipo pórfido, diseminada y a veces en *stockwork*, mientras que la matriz es de polvo de roca o de cuarzomonzonita con pequeños cristales de cuarzo, turmalina, especularita y sulfuros. Es común observar tanto en la matriz como en los clastos alteración cuarzo-sericita. Generalmente, la ley de cobre primario y/o molibdeno es mayor en esta brecha que en las rocas cuarzomonzoníticas adyacentes. No se expone en la superficie de erosión actual, se encuentra como fragmentos remanentes en la periferia del Complejo de Brechas Los Bronces, así como también se observan clastos de ella en casi todas las otras brechas, lo que sugiere que fueron las más antiguas.

#### B. Brecha Central

Los clastos son principalmente de cuarzomonzonita, andesita y latita. Se observa alteración cuarzo-sericita y argílica en los clastos, los cuales se aprecian subangulosos y más redondeados que en cualquier otra brecha. Esta brecha se caracteriza por un elevado volumen de matriz negra a gris oscura, compuesta por turmalina microcristalina y menores fracciones de cuarzo, especularita, sericita, sulfuros y rara anhidrita. Los sulfuros ocurren en su mayoría diseminados o en vetillas, donde la pirita abunda sobre la calcopirita. Se evidencian clastos de la Brecha Central en todas las brechas posteriores.

#### C. Brecha Occidente

La Brecha Occidente junto a la Brecha Infiernillo se emplazan a lo largo de un eje NW-SE, destruyendo las porciones oeste y sur de la Brecha Central. La mayoría de los clastos están constituidos por cuarzomonzonita cloritizada, con reemplazo de máficos por clorita, especularita y turmalina. Otros minerales de alteración incluyen rutilo, calcita y menor cantidad de epidota. La magnetita se mantiene estable y las plagioclasas están

débilmente alteradas a cuarzo-sericita. Los clastos son, por lo general, angulosos y con poca mineralización. Esta brecha se caracteriza por una matriz verdosa, debido a la abundante clorita y polvo de roca. La turmalina y especularita son menos comunes que en otras brechas. Los sulfuros incluyen pirita y calcopirita que se encuentran diseminadas en la matriz.

#### D. Brecha Infiernillo

Se distinguen clastos de andesita angulosos a subangulosos y en menor cantidad de cuarzomonzonita subanguloso (Fotografía 2). Los máficos en estos clastos están fuertemente cloritizados, y en ciertas áreas estos clastos están silicificados y tienen feldespatos argilizados. El volumen de la matriz es, en general, el menor entre todas las brechas, variando entre 2% y 15%. Ésta se compone principalmente de clorita y cuarzo con menor cantidad de especularita, turmalina, epidota, pirita, calcopirita y magnetita. La brecha está confinada casi por completo a las andesitas, en el extremo sur del Complejo de Brechas. El contacto con la unidad andesítica al este y al sur es muy abrupto y casi vertical, mientras que no se exponen bien los contactos con otras brechas en superficie. Debajo de la Brecha Infiernillo se distinguen brechas de cuarzomonzonita similares a la Occidente.



**Fotografía 2:** Testigo de sondaje diamantino con muestra de Brecha Infiernillo, donde se aprecian los clastos subangulosos de andesita y cuarzo monzonita.

#### E. Brecha Anhidrita

Corresponde a un cuerpo brechoso columnar pequeño adentro de la Brecha Infiernillo. Se aprecian fragmentos de las brechas Infiernillo y Central, lo que evidencia una edad menor a éstas. La mayoría de los clastos provienen de andesitas y están débilmente cloritizados, al menos en la porción superior. El volumen de la matriz varía de 5% a 60% y se compone por abundante anhidrita de grano grueso, con ausencia de polvo de roca en ella. Los minerales metálicos más comunes son specularita, pirita, calcopirita y molibdenita, por lo general en cristales más euhedrales y gruesos que en la Brecha Infiernillo adyacente. En superficie es característica la hidratación de la anhidrita a yeso.

#### F. Brecha Gris Fina

Los clastos son en su mayoría cuarzomonzoníticos, con andesita menos abundante. Domina la alteración cuarzo-sericita, mientras que localmente existe cloritización y silicificación. Los sulfuros (pirita y calcopirita) se encuentran en vetillas y en diseminados finos. La matriz corresponde a polvo de roca, turmalina microcristalina, sericita y cuarzo, lo que le otorga el color grisáceo que le da el nombre a esta brecha. El volumen de la matriz oscila entre 10% y 40%. En menor cantidad se distingue clorita de grano fino, turmalina, specularita y sulfuros.

#### G. Brecha Donoso

Los clastos de esta brecha son de cuarzomonzonita o de cuarzodiorita, sienita y en menor abundancia andesita, angulosos a subangulosos y muy poco redondeo (indicador de poco movimiento abrasivo). El volumen de la matriz varía entre 5% y 25%, y consiste en turmalina negra, cuarzo, pirita, calcopirita, specularita y en menor cantidad anhidrita y bornita. Dispersos en menor cuantía hay sericita, clorita y polvo de roca. La ley de cobre primario es mayor que en cualquier brecha, salvo por ciertas fracciones de la Brecha Infiernillo. La Brecha Donoso es la más joven, y está en el extremo norte del Complejo de Brechas Los Bronces. El contacto con la cuarzomonzonita que la rodea es muy abrupto, al igual que el contacto con las brechas Central y Occidente.

### 3.2.4. Unidades Post-Mineral

#### 3.2.4.1. Complejo Riolítico La Copa

Se define como un cuerpo circular constituido por tobas, diques y chimeneas riolíticas a dacíticas, que se emplaza al final del ciclo de pulsos magmáticos anteriores, cerca de la superficie del sector Río Blanco y que corta a las unidades porfídicas tardías y a la mineralización del distrito (Frikken, 2003). La composición se caracteriza por altos contenidos de sílice y bajo Mg y Ca, lo que indica un origen diferenciado. Deckart *et al.* (2013) estiman la edad del cuerpo entre 4,9-4,7 Ma, obtenidas mediante dataciones U-Pb en circones.

#### 3.2.5. Marco Estructural del Distrito

La literatura especializada en este tema indica que la evolución estructural del distrito está ligada a la herencia geológica pre-Mesozoica (la acreción de terrenos genera suturas que representan planos de debilidad (Ramos *et al.*, 1986, 2000)), junto a los procesos posteriores que incluyen la extensión del Oligoceno-Mioceno temprano y la subsiguiente compresión en el margen andino del Mioceno tardío-Plioceno temprano, con su respectivo acortamiento orógeno e inversión tectónica de la cuenca en donde se depositó la Formación Abanico, lo que es representado por el alzamiento de la cadena (Charrier *et al.*, 2002 en Carrizo *et al.*, 2012).

Piquer *et al.* (2015) sugieren que la evolución tectónica reciente del área está controlada por un sistema de fallas pre-mineral oblicuas (NW-SW, NNW-SSE y NE-SW) al eje del orógeno andino orientado NS, que se comportaron como normales durante el Eoceno tardío-Oligoceno. Este sistema de fallas fue reactivado durante la posterior compresión del Mioceno-Plioceno, expresando un movimiento inverso-sinistral para las fallas NW-SW y NNW-SSE, y un movimiento dextral para el sistema NE-SW. Esta reactivación fue contemporánea a la depositación de la Formación Farellones y al emplazamiento del Batolito San Francisco, cuyos últimos pulsos tienen relación genética con la formación del depósito Río Blanco-Los Bronces. Los mismos autores mencionan que los fluidos magmáticos e hidrotermales se canalizaron y concentraron a través de ambos sistemas de fallas oblicuas preexistentes, con la consecuente ruptura de las fallas producto de las

altas presiones de dichos fluidos. Esto se evidenciaría con la orientación actual de los cuerpos brechosos portadores de mineral.

A escala local, Carrizo *et al.* (2013) hacen una clasificación estructural de los diferentes conjuntos de fallas encontradas e inferidas en el yacimiento. En base a la relación de las estructuras con el macizo, cantidad de evidencias geológicas (presencia de relleno, espesor de la salbanda), extensión e incidencia con las operaciones de la mina, los autores distinguen 3 grupos de estructuras:

- Falla Principal: extensión >150 m (10 bancos o más), su presencia está bien documentada y la expresión visual y geológica de su traza es evidente.
- Estructuras Mayores: posee persistencia entre 30 y 150 m (2 a 10 bancos), con evidencias de su traza de carácter moderada.
- Estructuras Menores: toda estructura con un largo de traza menor a 30 m (menos de 2 bancos) y cuya expresión visual y geológica sea discreta.

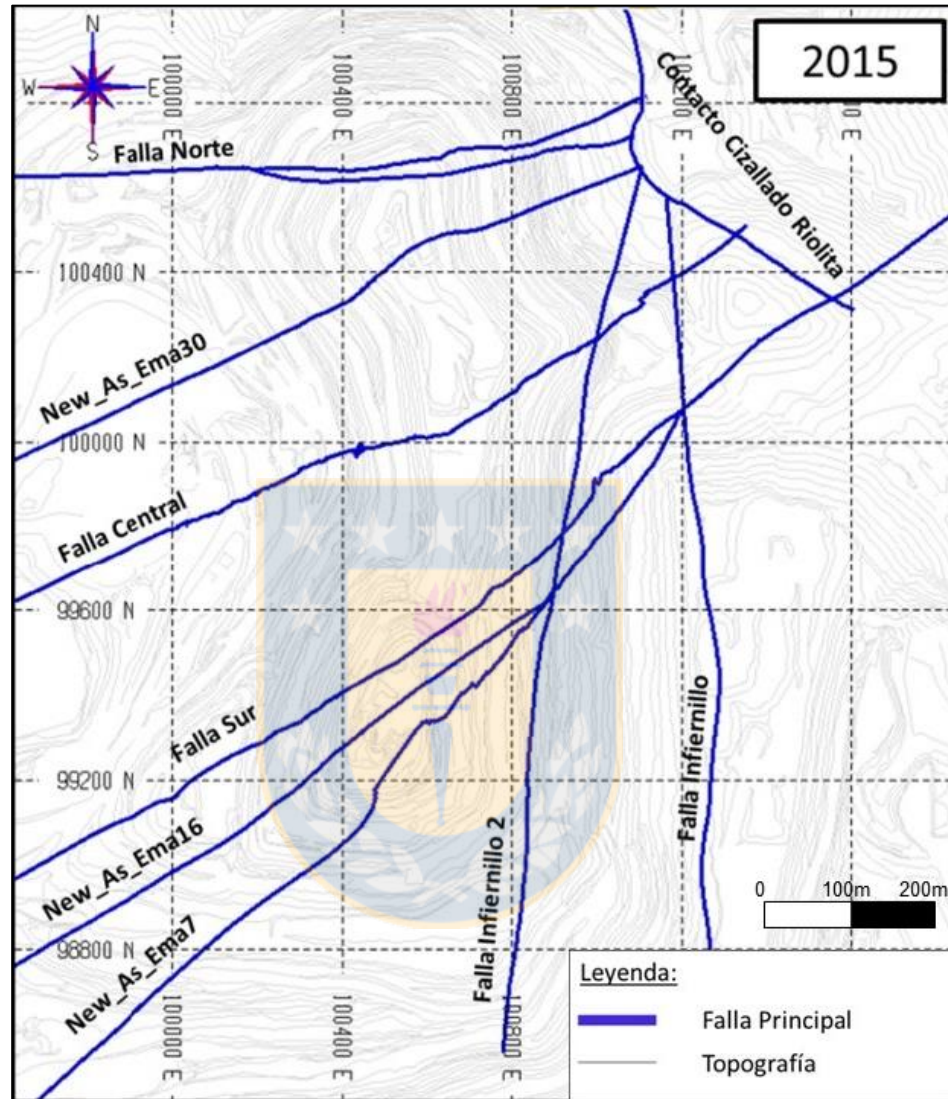
De acuerdo a lo anterior, Carrizo & Barros (2017) describen 9 Fallas Principales (Figura 8). Estas corresponden a: Falla Norte, Falla Central, Falla Sur, Falla Infiernillo, Falla Infiernillo 2, Contacto Cizallado Riolita, AsEma30, AsEma7 y AsEma16. La Tabla 1 resume las características sólo de las primeras 6 de ellas, ya que por motivos operacionales y de seguridad no fue posible obtener más detalles en terreno de las últimas 3. Adicionalmente, los autores identifican y modelan 138 Estructuras Mayores, la gran mayoría con continuidad en el talud de la mina.

A partir de todos los datos estructurales, y mediante análisis estadístico, Carrizo & Barros (2017) redefinen un conjunto de Dominios Estructurales, originalmente descritos en el estudio de Carrizo *et al.* (2013), que caracterizan la diversidad y magnitud estructural a la que se somete la mina (Figura 9):

- Dominio 1 (Infiernillo): ubicada al SE del yacimiento Los Bronces, se asocia a las lavas andesíticas de la Formación Farellones (caja volcánica) y su contacto en la superficie con el Batolito San Francisco, descrito como una estructura tipo *roof pendant*. La naturaleza de las discontinuidades se asocia a la estratificación de las lavas, a diaclasas de enfriamiento y a vetas y vetas-falla de alto ángulo que se insertan en el



paquete de rocas volcánicas. La naturaleza del dominio es de tipo litológico, con influencia de las fallas principales Infiernillo e Infiernillo 2.



**Figura 8:** Fallas principales en mina Los Bronces. Tomado de Carrizo & Barros (2016).

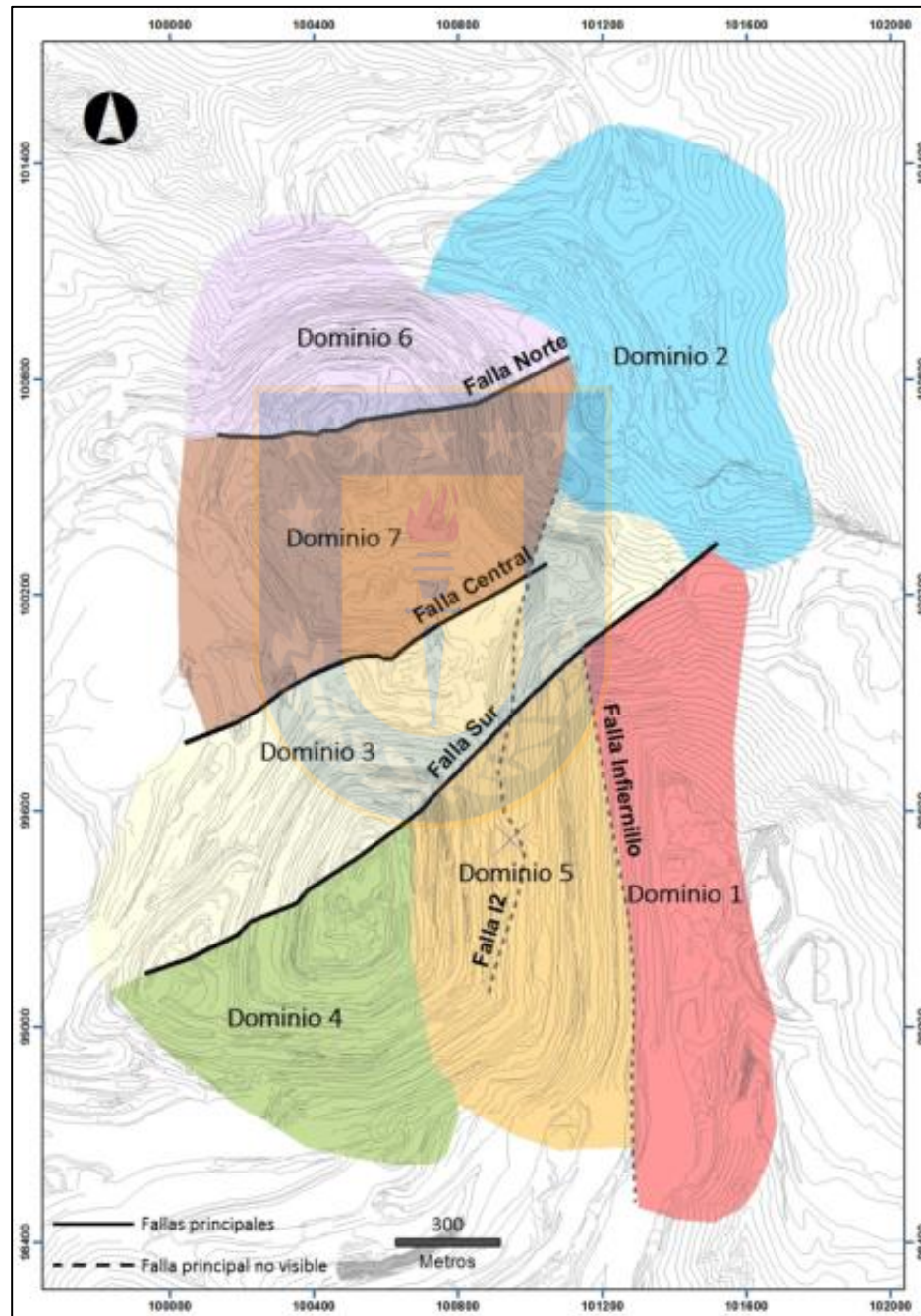
- Dominio 2 (Riolita): en el sector NNE de la mina, se asocia a la estructura sub-volcánica tardía denominada Complejo Riolítico La Copa. El dominio 2 está circunscrito a la diatrema, cuyo límite corresponde al contacto cizallado de la misma estructura. Se interpreta como límite al sur la Falla Central. Las discontinuidades se atribuyen a los procesos de enfriamiento y colapso de la estructura sub-volcánica mencionada, por lo que se infiere una naturaleza litológica para este dominio.

**Tabla 1:** Descripción de las fallas principales Norte, Central, Sur, Infiernillo, Infiernillo 2 y Contacto Cizallado Riolita. No se incluyen las fallas principales AsEma30, AsEma7 y AsEma16. Adaptado de Carrizo & Barros, 2017.

Nombre	Actitud	Visibilidad	Categoría vectorial
Falla Norte	ENE-WSW / ~90°	Reconocible en terreno como un sistema de fallas anastomosado	Definitivo
Falla Central	N35°E / ~90°	Reconocible en terreno	Definitivo
Falla Sur	N30°-35°E / ~90°	Reconocible en terreno como un sistema de fallas anastomosado	Definitivo
Falla Infiernillo	N-S / ~90°	Inferida y actualizada mediante trazas de arsénico	Potencial
Falla Infiernillo 2	N-S / ~90°	Inferida y actualizada mediante trazas de arsénico	Potencial
Contacto Cizallado Riolita	N40°E	Reconocible en terreno	Potencial

- Dominio 3: localizado en la porción central-sur de la mina, se limita al norte por la Falla Central y al sur por la Falla Sur. Las discontinuidades observadas corresponden a sistemas estructurales asociados a las fallas principales, orientados en geometrías de tipo *Riedel* o sistemas conjugados de alto ángulo que convergen en ambas estructuras principales. Además, se observa un grupo de discontinuidades de bajo ángulo que pueden estar asociadas al enfriamiento del plutón en su parte superior o techo. Se interpreta la naturaleza del dominio como de tipo estructural, sin embargo, deben estudiarse con más detalle las anisotropías internas asociadas a la litología.
- Dominio 4 (Sur): es el dominio de mayor dimensión y se ubica en el sector SSW del rajo. Su límite norte es la Falla Principal Sur y hacia el este limita con la zona de contacto atribuida a la intrusión del Complejo de Brechas Los Bronces de orientación NNW-SSE. Las discontinuidades de este dominio se asocian a sistemas de falla NE-SW. También, se observan sistemas de bajo ángulo con forma de diaclasas de enfriamiento asociadas al techo del plutón, quien ocupa la mayor porción del dominio. La naturaleza es interpretada como de tipo estructural.
- Dominio 5: se localiza en el sector SE del rajo, y se define por el contacto entre el Batolito San Francisco con el *roof pendant* de lavas andesíticas, hacia el este (Dominio 1), y el Complejo de Brechas Los Bronces emplazadas según un eje NNW-SSE, hacia el oeste. Se relaciona a las rocas intrusivas debajo del Dominio 1. Las discontinuidades

se vinculan a los márgenes de las brechas según orientaciones preferenciales NW-SE. También, se observan sistemas de orientación NE-SW correspondientes a vetas y vetas-fallas, junto a diaclasas de enfriamiento de bajo ángulo, por lo que la naturaleza del dominio es de tipo estructural y litológica.



**Figura 9:** Dominios estructurales en mina Los Bronces. “Falla I2” = Falla Infernillo 2. Tomado de Carrizo *et al.* (2013).

- Dominio 6 (Pared Norte): ubicado en el sector norte, y se le asocia, por un lado, a sistemas de fallas de rumbo vinculadas a la Falla Norte y su traza anastomosada, y, por otro lado, a un sistema de bajo ángulo relacionado con el proceso de enfriamiento del techo plano del plutón. Se interpreta la naturaleza del dominio como estructural.
- Dominio 7 (Central): limitada al norte por la Falla Norte y al sur por la Falla Central. Se diferencia del Dominio 6 (Norte) en que disminuye la cantidad de sistemas conjugados asociados a las fallas principales y se observa un ordenamiento mayor en sistemas de orientación NE-SW. Igual que en casos anteriores, se aprecian diaclasas de bajo ángulo vinculadas al enfriamiento del plutón.

Cada uno de estos dominios tiene un conjunto de estructuras mayores (fallas) y menores (vetillas y diaclasas) que se cuantifican en la Tabla 2, donde se incluyen todos los polos asociados a cada una de estas estructuras (Carrizo & Barros, 2017).

**Tabla 2:** Número de polos asociados a estructuras mayores y menores. Tomado de Carrizo & Barros, 2017.

Dominio	Número de Polos	
	Estructuras Mayores (Fallas)	Estructuras Menores (Diaclasas + Vetillas)
1	238	9.590
2	389	1.460
3	3.673	45.623
4	3.383	35.809
5	3.838	74.483
6	885	22.956
7	1.978	29.582

### 3.2.6. Alteración Hidrotermal

#### 3.2.6.1. Alteración Potásica

Se encuentra principalmente en el sector Río Blanco que corresponde al área de explotación por minería subterránea. Altera a las rocas plutónicas del Batolito San Francisco y a las volcánicas intruidas por esta unidad. La mineralización asociada está en forma diseminada y en *stockwork*. Se caracteriza por el reemplazo de minerales primarios por biotita  $\pm$  magnetita  $\pm$  sulfuros y la adición de feldespato potásico, como también se relaciona a la formación de un *stockwork* de vetillas de biotita  $\pm$  feldespato potásico  $\pm$  cuarzo  $\pm$  magnetita  $\pm$  anhidrita  $\pm$  sulfuros (Abarzúa, 2014). La zona de

alteración potásica contiene gran parte de las brechas mineralizadas del Complejo de Brechas Río Blanco. El traslape temporal, relación espacial y similitud de las asociaciones de alteración potásica y matriz de brechas, sugiere un vínculo genético entre el emplazamiento de éstas y el desarrollo de la alteración potásica, junto a su mineralización asociada. Estudios de isótopos indican que los fluidos responsables de la formación de brechas, alteración potásica y su mineralización asociada son de origen magmático (Serrano *et al.*, 1996).

A partir de estudios de sondajes profundos, Contreras (2003) reconoce a lo menos 3 asociaciones minerales en este grupo de alteración:

- Biotita-magnetita: reemplaza a los minerales máficos originales por biotita secundaria, además se le asocia magnetita, cuarzo secundario, anhidrita intersticial y menor cantidad de clorita, sericita, rutilo y titanita. Mineralización diseminada constituida por pirita, calcopirita y bornita.
- Biotita-feldespatos potásico: se caracteriza por la existencia de biotita secundaria-feldespatos potásico-cuarzo-clorita-sulfuros. Como núcleos de alteración y con contactos transicionales, se reconoce la presencia de esta alteración en las brechas hidrotermales. La mineralización ocurre principalmente en vetillas tipo A y en la matriz de brechas y está compuesta por pirita, calcopirita, bornita y molibdenita.
- Cuarzo-feldespatos potásico: corresponde a una alteración penetrativa con intensidad moderada a fuerte, cuyo hábito principal es el entrecrecimiento intercrystalino de cuarzo primario y plagioclasa original. Se observan bandas y ventillas de cuarzo-feldespatos potásico irregulares con halos de igual mineralogía. La mineralización está constituida principalmente por pirita y calcopirita.

### **3.2.6.2. Alteración Fílica**

Se desarrolla espacialmente con los intrusivos cuarzomonzoníticos y cuarzomonzodioríticos del Batolito San Francisco. Se observa coexistencia espacial de la alteración fílica con zonas de la etapa de alteración potásica y un control relacionado con los bordes del Complejo de Brechas Los Bronces, especialmente con la Brecha Donoso. En los clastos de esta brecha se reconocen dos etapas de alteración: una

relacionada a la generación de las brechas, y otra que ocurrió aparentemente en la cuarzomonzonita huésped previa a la formación de la brecha (Abarzúa, 2014).

Los pórfidos tardíos se aprecian sericitizados y silicificados, cortados por vetillas de cuarzo  $\pm$  sericita  $\pm$  anhidrita  $\pm$  sulfuros, como también de delgadas vetillas de feldespato potásico, sin biotitización y débilmente mineralizados. La alteración fílica también ocurre en la roca huésped a lo largo de los contactos con estos cuerpos tardíos. La mineralización de Cu-Mo dentro de los pórfidos tardíos se interpreta como una removilización de la mineralización previa, constituida por pirita y calcopirita  $\pm$  bornita  $\pm$  molibdenita  $\pm$  galena  $\pm$  tennantita-tetraedrita, entre otros. Estos minerales están generalmente en vetillas de cuarzo-sericita (Abarzúa, 2014).

La alteración sericítica de los bordes de los clastos de brecha y los halos sericíticos alrededor de las vetas tardías de cuarzo-pirita, son ambas atribuidas al mismo fluido magmático que originó los cuerpos de brecha (Abarzúa, 2014).

### **3.2.6.3. Alteración Propilítica**

La alteración propilítica está restringida a la porción superior del yacimiento Río Blanco en forma de parches alrededor de la alteración potásica, por lo que desaparece gradualmente a medida que aumenta la profundidad. Su asociación mineralógica está constituida por clorita-epidota-calcita-especularita-pirita-siderita (Serrano *et al.*, 1996). En el sector Los Bronces, los clastos de la fracción norte y oriental de la Brecha Donoso y los de la parte norte y occidental de la Brecha Occidente están débil a moderadamente alterados propilíticamente (Warnaars *et al.*, 1985). Se aprecia biotita magmática, hornblenda y/o clorita deutérica, alterados a epidota, turmalina, especularita y/o clorita; la magnetita se observa mayoritariamente estable, mientras que las plagioclasas están ligeramente sericitizadas y el feldespato potásico está, en gran parte, inalterado. Una característica única del sistema en Los Bronces es el reemplazo de los minerales máficos, así como de la clorita secundaria, por especularita y/o turmalina, dentro de esta zona de alteración (Warnaars *et al.*, 1985).

## 4. Metodología

### 4.1. Generalidades

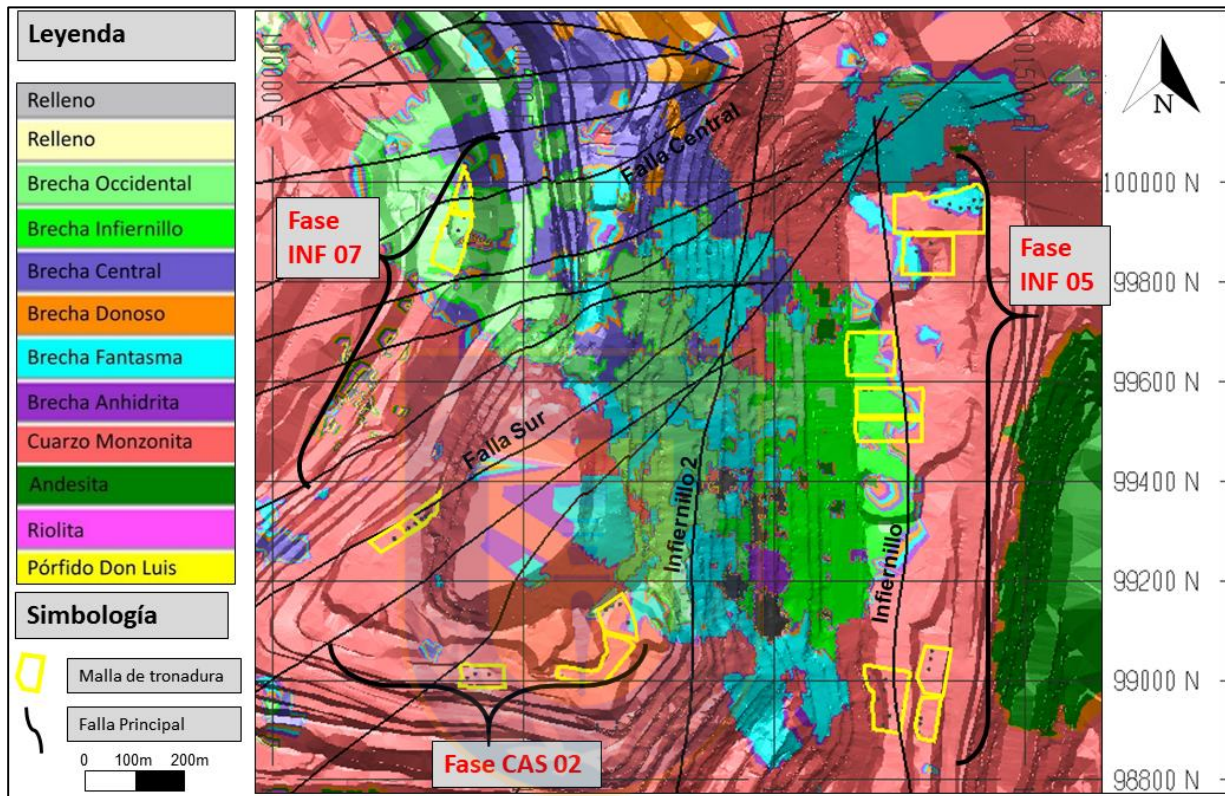
Para la realización de este estudio se usó como base el Código de Buenas Prácticas para el carguío de explosivos en suelos reactivos, desarrollado por la “*Australian Explosives Industry and Safety Group*” (AEISG, 2017). En este documento se explica que para caracterizar los suelos con potencial de reacción hay que dividir la faena minera en zonas individuales, desde donde se debe extraer un mínimo de 12 muestras de pozos de tronadura en cada una. La cantidad mínima de zonas por estudio en faena no está definida, sin embargo, se sugiere que la sectorización abarque todas las fases de explotación posibles, o que el muestreo por zona se concentre en sectores de la mina que se consideren de alto riesgo, ya sea por elevados contenidos de pirita o por tener registros de eventos no deseados con respecto al carguío de explosivos. Una vez completada la toma de muestras, se envían a preparación mecánica para luego ser sometidas a los ensayos de laboratorio recomendados por la AEISG y la U.S. Bureau of Mines, cuyo fin es caracterizar la capacidad de reacción de las muestras en contacto con explosivos de base ANFO. Paralelamente, las muestras son enviadas a un laboratorio privado donde se solicitan análisis químicos para determinar leyes de cobre, hierro, arsénico, entre otros elementos. A partir de los resultados de los análisis químicos, se confeccionan briquetas pulidas de las muestras, que se observan en microscopio de luz reflejada para estimar la mineralogía presente y para poder correlacionarla con los resultados de los ensayos anteriores.

### 4.2. Revisión de Antecedentes

#### 4.2.1. Enero 2016

El 16 de enero de 2016, se detecta emanación de gases nitrosos desde un pozo de tronadura del disparo INF05-3865-142 perteneciente a la Fase Infiernillo 5 (Figura 10), cargado el 13 de enero con el producto Blendex®945. La plataforma de tronadura se comienza a perforar más de 10 días antes de su entrega el 8 de enero, y pasan 5 días antes de iniciado el carguío, por lo que el pozo involucrado permanece expuesto 15 días y luego 3 días más con producto explosivo cargado. Aparte, durante esa época de verano

ocurren lluvias donde el agua caída se infiltra en la zona, que en este caso corresponde a zona de rellenos, en el borde de cráter con rocas muy fracturadas en presencia de pirita y óxidos de hierro. Adicionalmente, las altas temperaturas de la época favorecen la lixiviación natural, lo que permite las condiciones necesarias para la ocurrencia de una reacción exotérmica no deseada entre las rocas del pozo de tronadura y el explosivo.



**Figura 10:** Mapa geológico de mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016.

#### 4.2.2. Octubre 2016

En los disparos INF05-3835-515 e INF05-3835-516, ambos de la Fase Infiernillo 5 (Figura 10), se detectan temperaturas sobre 35°C en 9 pozos de tronadura en el mes de octubre de 2016. La ubicación de estos disparos es cercana a los del evento de enero de 2016. Debido a ese antecedente, se decide cargar estos pozos y tronarlos después de 4 horas para evitar situaciones de riesgo.

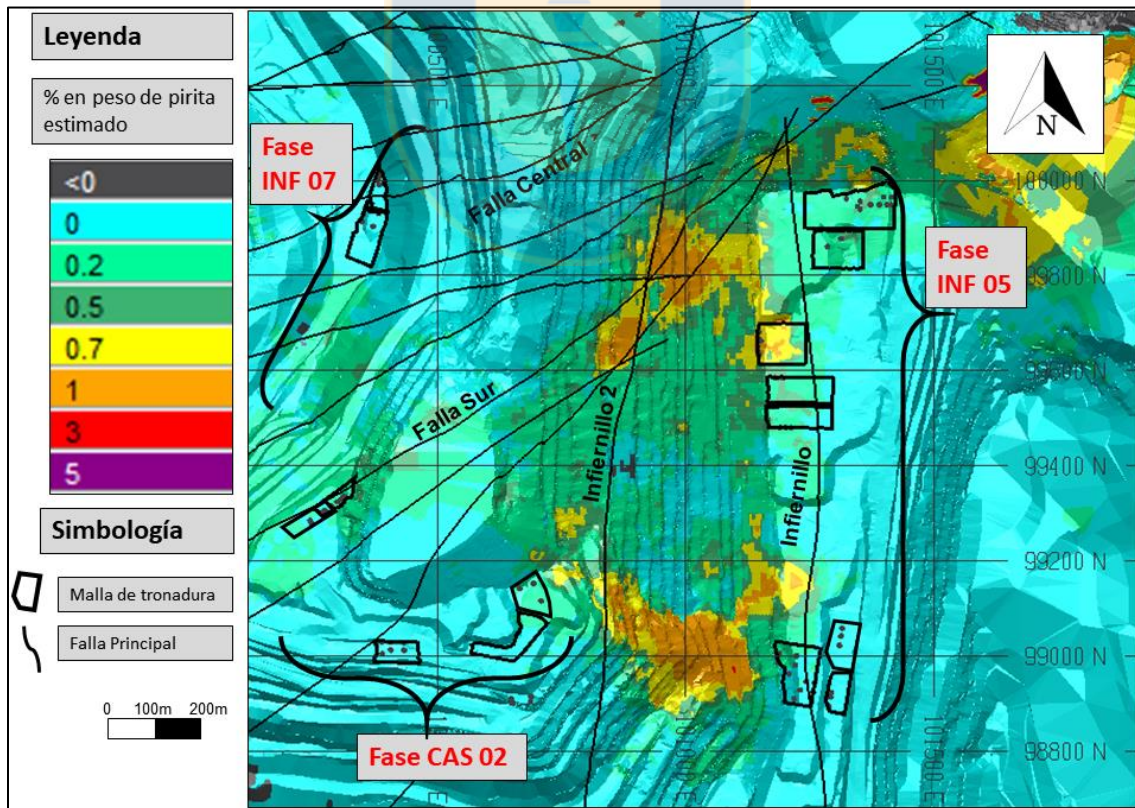


### 4.2.3. Marzo 2017

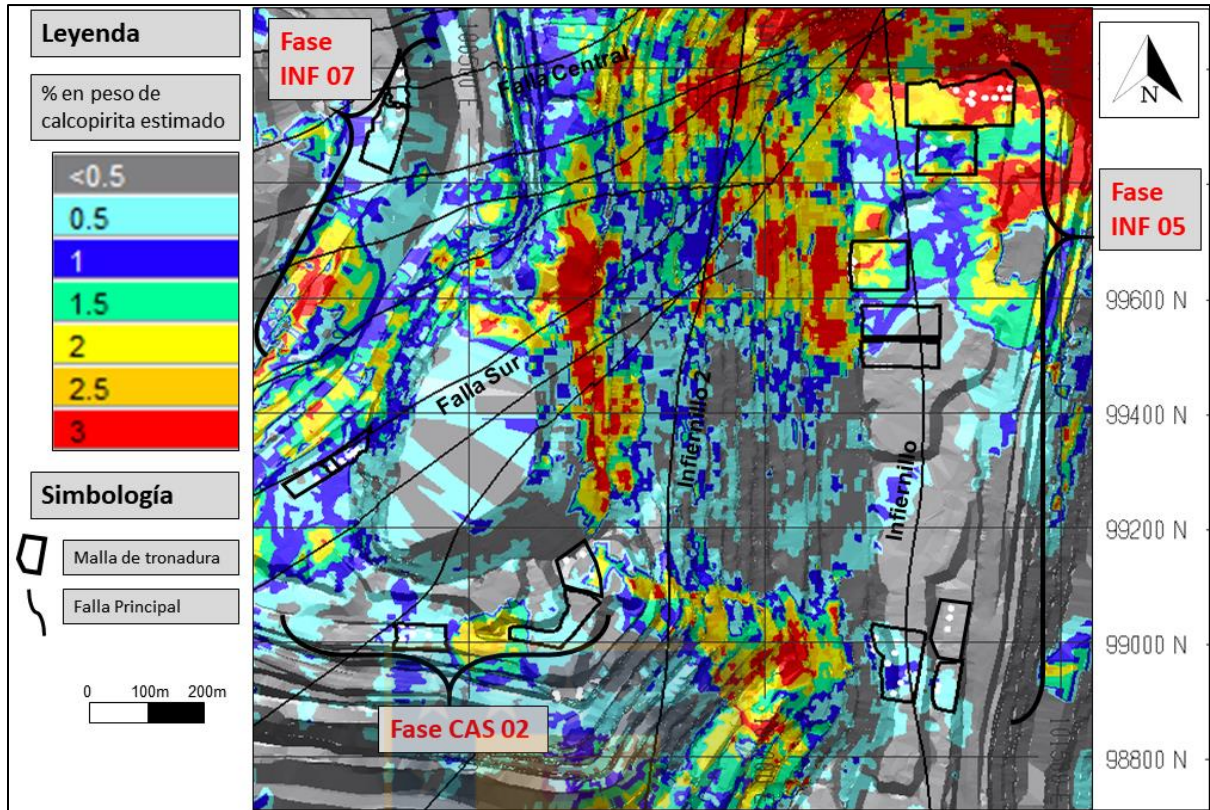
Similar al evento anterior, en el disparo CAS02-3340-332 de la Fase Casino (Figura 10) se registran temperaturas sobre 20°C en pozos de tronadura, por lo que el carguío de explosivos y tronadura se ejecutan durante el mismo día.

## 4.3. Geología de la Mina y Estado de la Operación

La siguiente etapa para la definición de zonas comienza con la revisión de la Geología de la Mina, utilizando el Modelo de Bloques de Largo Plazo 2016 (propiedad de Anglo American), para determinar sectores con alto contenido de sulfuros de hierro (principalmente pirita), además de las principales unidades litológicas y estructuras que las atraviesan (Figuras 10, 11 y 12). La información otorgada por estos mapas indica sectores con mayor o menor concentración de sulfuros, lo que la convierte en la mejor herramienta para identificar zonas que podrían generar o no las reacciones entre los minerales y el ANFO.



**Figura 11:** Mapa de la distribución estimada de pirita en mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016.



**Figura 12:** Mapa de la distribución estimada de calcopirita en mina Los Bronces según Modelo de Bloques 2016.

Por otra parte, una elevada densidad estructural les confiere a las rocas de la mina características que pueden influir en la oxidación de la pirita (permeabilidad secundaria del macizo rocoso) y, como consecuencia, en la reacción exotérmica que en este estudio se quiere caracterizar. Es importante considerar que el muestreo sea cercano a estas estructuras, ya que la permeabilidad generada por las fallas y diaclasas favorece la oxidación natural, mediante el oxígeno de la atmósfera o la infiltración de aguas meteóricas o subterráneas. Debido a las características geográficas del yacimiento Los Bronces, es frecuente la caída de lluvia y nieve durante el año, por lo tanto, en rocas muy fracturadas se facilita la percolación de estas aguas, desarrollando condiciones oxidantes y de mayor acidez.

La siguiente etapa consiste en revisar semanalmente la programación de perforación y tronadura de la operación en la mina. El objetivo de esto es hacer el seguimiento de las fases de explotación donde se perforan y muestrean los pozos de tronadura cotidianamente, de lo contrario, se puede perder la oportunidad de realizarlo debido a la

dinámica del desarrollo de la faena, donde muchas veces se perfora y se cargan explosivos con uno o dos días de diferencia, entonces por motivos de seguridad se elimina toda posibilidad de acceder a la zona para muestrear. El equipo de la Superintendencia de Perforación y Tronadura de Anglo American Los Bronces, junto a sus empresas colaboradoras, diseñan semanalmente las mallas de tronadura que van a ser perforadas y luego cargadas con explosivos para su posterior detonación. Usando esta información, se definen las mallas de tronadura de interés para el muestreo de los pozos.

#### **4.4. Definición de Zonas de Muestreo**

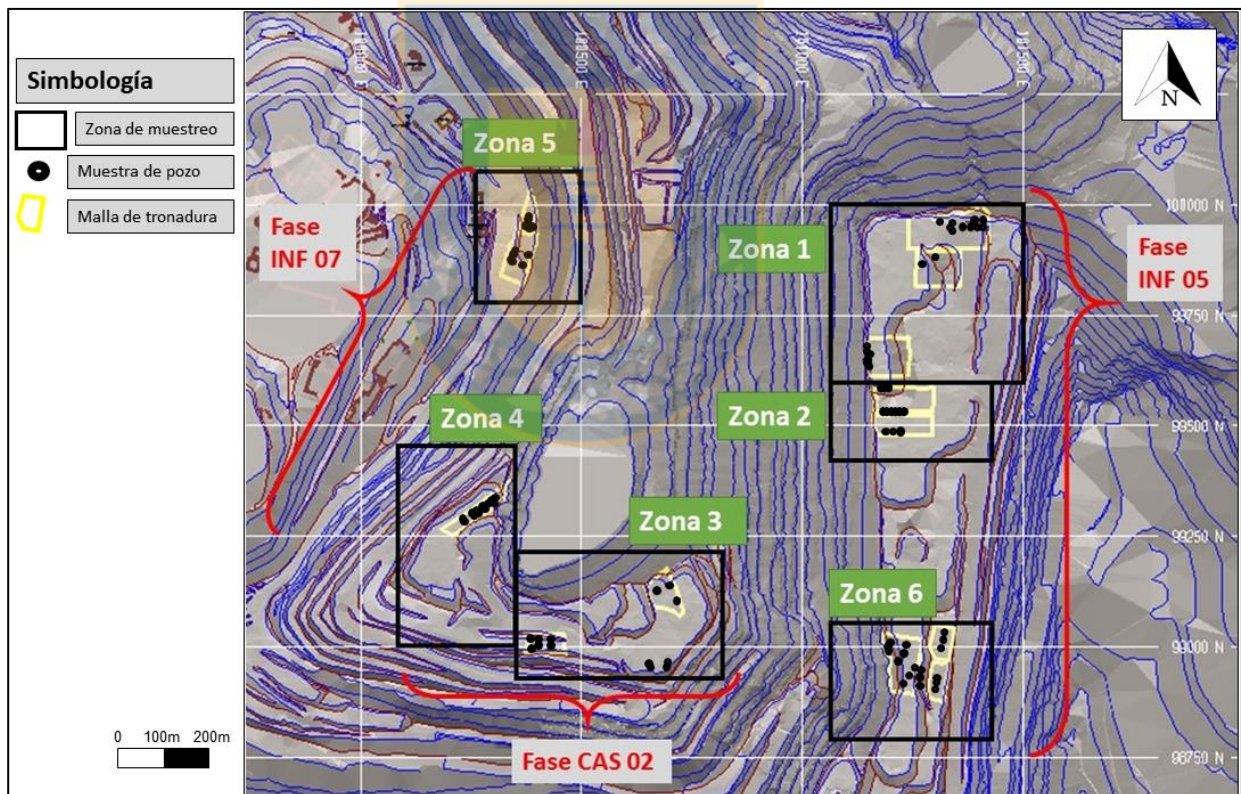
Una vez conocidas las mallas de tronadura que se van a trabajar semanalmente en toda la mina (a corto plazo), y a partir de las características geológicas relevantes para este estudio (cantidad de sulfuros elevada, presencia de estructuras, unidades litológicas diferentes), el siguiente paso es seleccionar un grupo de esas mallas ubicadas en distintas fases de explotación, que van a constituir “zonas” de muestreo para la caracterización de la reacción entre la roca y el ANFO.

La geología de estas mallas puede variar entre una y otra, pero lo importante para definir una zona de muestreo es que las mallas de perforación otorguen la mayor cantidad de información posible. La selección de los polígonos de tronadura va a estar en función, como fue mencionado anteriormente, de la información entregada por el modelo de bloques de la mina, así como también de la cercanía y ubicación de los pozos que enfrentaron situaciones de riesgo en el pasado (descritos en el apartado 4.2), de modo que el presente estudio pueda profundizar sobre lo sucedido en dichos sectores. Relacionado a lo anterior, cada zona puede constituirse por uno o más polígonos de perforación, por lo tanto, las dimensiones de cada zona no tienen un mínimo ni un máximo establecido. Para aumentar la representatividad de los datos, la delimitación de las zonas no debe ser excesivamente extensa (en este estudio el máximo fue de 0,12 km<sup>2</sup>).

No es necesario que las zonas de muestreo estén cercanas, o una al lado de otra. La ubicación de ellas va a depender de la necesidad de caracterizar las distintas fases de la operación minera. En cada zona de muestreo, se debe seleccionar una cantidad mínima

de 12 pozos de tronadura para obtener muestras (AEISG, 2017), distribuidas entre las mallas de perforación que constituyen cada zona. El número de muestras por zona puede ser mayor, siempre y cuando se justifique, debido a las dimensiones de la misma, la necesidad de obtener más detalles, o lo que la minera estime conveniente.

Considerando lo anterior, para este estudio se hizo una selección de 6 zonas de muestreo, distribuidas en 3 fases de explotación diferentes de la mina Los Bronces (Figura 13). Entre las 6 zonas, el muestreo abarca un total de 85 muestras repartidas en 15 polígonos de tronadura, cuyas cotas varían entre los 3.295 y 3.790 m s.n.m. Del total de las muestras, 81 corresponden a pozos de tronadura de 15 metros cada una, mientras que las 4 muestras restantes se obtienen de tramos de sondajes de aire reverso ubicados en la zona 3.



**Figura 13:** Mapa de la distribución de zonas para el muestreo de pozos de tronadura en mina Los Bronces.

A continuación, se detalla la ubicación, características y criterios de definición para cada una de las zonas involucradas.

#### 4.4.1. Zona 1

Se encuentra en la porción norte de la Fase Infiernillo 5, al este de la mina, en el cerro homónimo, entre las coordenadas UTM 101.100 E/100.000 N y 101.500 E/99.600 N (Figura 13). En esta zona ocurrieron los eventos de enero y octubre de 2016, por lo tanto, es un objetivo importante para el estudio. Otros criterios para definirla, incluyen la proximidad a sectores de mediana a alta mineralización de sulfuros (0,5-1% p/p Py; 1-3% p/p Cpy) (Figuras 11 y 12), además de estar muy cercana a una Falla Principal (Falla Infiernillo) (Figura 8).

Está constituida por 4 mallas de perforación, que corresponden a: INF05-3745-200, INF05-3745-201, INF05-3745-206 e INF05-3745-209, de las cuales se extraen 18 muestras en total (Anexo 1).

#### 4.4.2. Zona 2

Se ubica debajo de la Zona 1, perteneciente a la Fase Infiernillo 5, al este de la mina, entre las coordenadas UTM 101.100 E/99.600 N y 101.400 E/99.400 N (Figura 13). Se selecciona esta zona debido a que, según los modelos de estimación de bloques, posee menor contenido de sulfuros (0,5% p/p Py; <1% p/p Cpy) (Figuras 11 y 12) que la zona anterior, por lo tanto, los resultados se pueden contrastar con los de la Zona 1, para evaluar la influencia de la presencia o ausencia de sulfuros de hierro en la reacción para zonas cercanas. La litología es muy similar y la misma Falla Principal Infiernillo atraviesa los polígonos de tronadura seleccionados (Figura 8). Estos corresponden a los disparos INF05-3760-318 e INF05-3760-319, de los cuales se obtienen 12 muestras (Anexo 1).

#### 4.4.3. Zona 3

Se localiza en la Fase Casino 2, al centro-sur del rajo entre las coordenadas UTM 100.350 E/99.200 N y 100.800 E/98.900 N (Figura 13). Esta zona se selecciona debido a que con anterioridad ocurrió un evento relacionado a temperaturas elevadas en pozos de tronadura, sin carga de explosivos (marzo de 2017). Al revisar la información geológica disponible, la litología coincide en parte con las zonas anteriores, debido a que hay presencia de Cuarzo Monzonita del Batolito San Francisco, pero no de Brecha Infiernillo.

Los porcentajes estimados de sulfuros son bajos (0,2% p/p Py; <2% p/p Cpy) según las estimaciones del Modelo de Bloques 2016 (Figuras 11 y 12).

Las mallas de perforación seleccionadas son la CAS02-3310-103 y la CAS02-3325-263, desde donde se extraen 9 muestras en total (Anexo 1). Adicionalmente, de la base de datos de sondajes año 2017 en Los Bronces se seleccionaron 2 sondajes de aire reverso (RC) cuya extensión y ubicación los sitúan dentro de los límites de esta zona. Estos sondajes corresponden a LB170050 y LB170054, desde donde se toman 2 tramos en cada uno que equivalen a 15 metros verticales de banco (Anexo 1), por lo tanto, representan condiciones geológicas similares a un pozo de tronadura normal. En total se obtuvieron 13 muestras para esta zona, 9 de pozos de tronadura y 4 de sondajes RC.

#### **4.4.4. Zona 4**

Es similar a la zona anterior, se ubica en la Fase Casino 2, en el centro sur del rajo, entre las coordenadas UTM 100.000 E/99.400 N y 100.350 E/99.000 N (Figura 13). Esta zona se selecciona porque tiene características geológicas similares (contenido de sulfuros <1% p/p, misma litología) (Figuras 10, 11 y 12), sin embargo, en esta zona no existen antecedentes de pozos con elevada temperatura, además de que la Falla Sur la atraviesa (Figura 8), a diferencia de la zona anterior, por lo tanto, se podrían presentar condiciones de mayor permeabilidad en las rocas. Los disparos seleccionados son CAS02-3295-140 y CAS02-3295-141, desde donde se extrajeron 12 muestras de pozos de tronadura (6 en cada una) (Anexo 1).

#### **4.4.5. Zona 5**

Ubicada en la Fase Infiernillo 7, al oeste de la mina, entre las coordenadas UTM 100.300 E/100.100 N y 100.500 E/99.800 N, cerca de los edificios administrativos (Figura 13). La selección de esta zona se basa principalmente en las diferencias litológicas respecto a las anteriores. En este caso, afloran la Brecha Occidente y la Brecha Central (Figura 10), además es atravesada por la Falla Central (Figura 8), por lo que es probable que las rocas tengan una mayor permeabilidad. La presencia de sulfuros en esta zona es muy baja (<0,5% p/p Py; <0,5% p/p Cpy) (Figuras 11 y 12). Se extraen 12 muestras de pozos

de tronadura, desde las mallas de perforación INF07-3505-701 e INF07-3505-702 (Anexo 1).

#### **4.4.6. Zona 6**

Se localiza en la porción sur de la Fase Infiernillo 5, hacia el sureste de la mina en el cerro homónimo, entre las coordenadas 101.100 E/99.100 N y 101.400 E/98.800 N (Figura 13). Según la estimación del Modelo de Bloques 2016, esta zona posee poca cantidad de sulfuros (<0,5% p/p Py; <1% p/p Cpy) (Figuras 11 y 12), sin embargo, es atravesada por la Falla Infiernillo (Figura 8), y su ubicación es muy cercana a sectores del yacimiento con mayor presencia de pirita. Se extrajeron un total de 18 muestras de pozos de tronadura desde 3 mallas de perforación diferentes, las que corresponden a los disparos INF05-3790-234, INF05-3790-241 e INF05-3775-241 (Anexo 1).

### **4.5. Preparación de las Muestras**

#### **4.5.1. Reducción de Muestras para Descripción Macroscópica**

Una vez que se extrae el material de los pozos de tronadura, se solicita la reducción de las muestras originales para generar muestras del *cutting* de perforación de los pozos, cuyo fin es hacer una descripción macroscópica de las muestras. El procedimiento utilizado es el estándar para pozos de tronadura de la compañía Anglo American. Éste consiste en sacar desde la bolsa rotulada una porción de la muestra con una “pala Jis”, que luego se pasa a través de un tamiz de malla #12 Tyler. La fracción de la muestra que no atraviesa el tamiz, se lava con agua para eliminar el residuo fino. A continuación, se pasa a través de un tamiz de malla #10 Tyler, con lo que se obtiene una muestra de granulometría final >1,41 mm (equivalencia desde malla Tyler a mm). Esta muestra finalmente se deposita en cajas de plástico rotuladas desde donde es posible hacer las descripciones macroscópicas (apartado 4.6.1). Lo que no se utiliza de la bolsa original se envía a la siguiente etapa, en el laboratorio de preparación mecánica.

#### **4.5.2. Preparación Mecánica**

Por motivos de confidencialidad de la información, no se entregan todos los detalles de este proceso, sin embargo, se explica a grandes rasgos, a continuación.

Las bolsas rotuladas se mandan a un laboratorio metalúrgico especializado en preparación mecánica de muestras. Acá se pesa el material y luego se seca en hornos de tal manera que se elimine toda la humedad contenida en la muestra. Cuando finaliza el secado, se vuelve a pesar y se determina el porcentaje de humedad original. A continuación, las muestras se someten a una reducción de tamaño por medio de un chancador secundario, cuyo objetivo es obtener una granulometría de 90% de la masa de la muestra seca bajo malla #10 Tyler. Cuando se llega a esta meta, la muestra está en condiciones de ser enviada a los ensayos de reactividad mineral-ANFO (apartado 4.7). No obstante, se debe reservar una fracción de muestra para ser despachada a los laboratorios de análisis químico y de confección de briquetas. Para ello, la muestra chancada de granulometría 90% bajo #10 Tyler, se pasa por un divisor rotatorio de 20 litros hasta obtener una muestra de entre 3-4 kg, correspondiente al 30% aproximadamente de la original (depende de la masa inicial). Luego, esta muestra de 3-4 kg se pasa por un cuarteador, donde se reduce hasta obtener muestras representativas más pequeñas y homogéneas, de aproximadamente 100-200 g. Una de ellas se reserva para ser enviada al laboratorio de confección de briquetas (4.6.3) y el resto se pulveriza hasta obtener la granulometría necesaria para ser destinada al laboratorio de análisis químico (apartado 4.6.2). El envasado, en estos casos, es mediante sobres rotulados.

## **4.6. Descripción de Muestras y Estimación Mineralógica**

### **4.6.1. Descripción Macroscópica**

A partir de las muestras reducidas de los pozos de tronadura (apartado 4.5.1), se procede a la descripción macroscópica. Este procedimiento consiste en observar los fragmentos de roca del *cutting* de los pozos mediante una lupa de geólogo de aumento 20x. Cada muestra de pozo se identifica con su rótulo respectivo, y se identifican las principales características, entre ellas, la más importante corresponde a la litología, además de los contenidos y porcentajes estimados de sulfuros y oxidados principales, y la alteración hidrotermal presente. Estos datos se registran en una planilla de *logeo* de pozos de tronadura.



## 4.6.2. Análisis Químico

Luego de la preparación mecánica, se reserva una cantidad de muestra pulverizada para ser enviada a un laboratorio privado, donde se hacen análisis químicos multielementales, con el objetivo de obtener leyes de cobre total, cobre soluble, hierro total, azufre, entre otros. El fin de estos análisis es obtener las proporciones por muestra de cada elemento de interés, y también las relaciones de cobre soluble (CuS) con cobre total (CuT). Estos últimos datos son utilizados en los análisis de briquetas para estimación mineralógica.

## 4.6.3. Análisis de Briquetas Pulidas

Con las leyes de cobre total y cobre soluble, las muestras se envían a un laboratorio de preparación de briquetas de Anglo American, en el cual son confeccionadas para su posterior análisis microscópico. Este proceso involucra el uso de muestras chancadas a una granulometría de  $90 < \#10$  (90% de la muestra bajo la malla #10 Tyler) homogenizada.

Luego de la fabricación de la briqueta, la descripción se hace mediante “conteo de puntos”, para lo que se utiliza un microscopio marca Nikon modelo “DS-Fi2” (propiedad del Laboratorio de Microscopía de la Superintendencia de Geología, División Los Bronces, Anglo American) con retículo de 10 x 10 micrones, lente ocular de 15x y lente objetivo de 20x. El conteo consiste en hacer un barrido línea a línea del retículo identificando y contando la mineralogía de la briqueta que intercepta los vértices del mismo, con un mínimo de 600 puntos por muestra. Luego de cuantificar todas las intersecciones de minerales metálicos y de ganga, se introducen en un *software* de caracterización y descripción de briquetas desarrollado por la compañía que, tomando los datos de leyes de cobre total y cobre soluble (entre otros) obtenidos del análisis químico en cada muestra, calcula los porcentajes en peso de cada especie encontrada.

## 4.7. Ensayos de Reactividad Mineral-ANFO

### 4.7.1. Ensayo de Reactividad

Desarrollado en un principio por la U.S. Bureau of Mines (1979), este ensayo tiene como objetivo determinar si es que una muestra tiene la capacidad o no para generar reacción con el nitrato de amonio.

Para este estudio, se hace una adaptación de la versión original, que consiste en insertar una capa de muestra pulverizada en un vaso de precipitado, luego encima insertar nitrato de amonio puro y, finalmente, otra capa de muestra pulverizada de pozo de tronadura (Fotografía 3). Este conjunto se calienta gradualmente en una placa calefactora (hasta 300°C aproximadamente) y, simultáneamente, se miden y registran las variaciones de temperatura utilizando termopares, los que se introducen en el vaso (uno en la interfaz inferior de la muestra y el nitrato de amonio, y otro en el fondo del vaso) y se conectan a un adquisidor de datos de temperaturas o registrador, cuyo *software* las grafica para permitir su visualización. Se mantienen estas condiciones hasta que se observan indicios de reacción en el sistema mineral-nitrato de amonio (burbujeo, emisión de humos o de espuma, aumento brusco de temperatura) (Fotografías 4 y 5). Cuando se advierte esta situación, se registra la temperatura de inicio de la reacción o “TiRx” (identificada por el termopar de la interfaz) y se retira el montaje de la placa calefactora para eliminar la fuente de calor externa. A continuación, la muestra puede comportarse de las siguientes maneras:



**Fotografía 3:** Montaje del Ensayo de Reactividad.

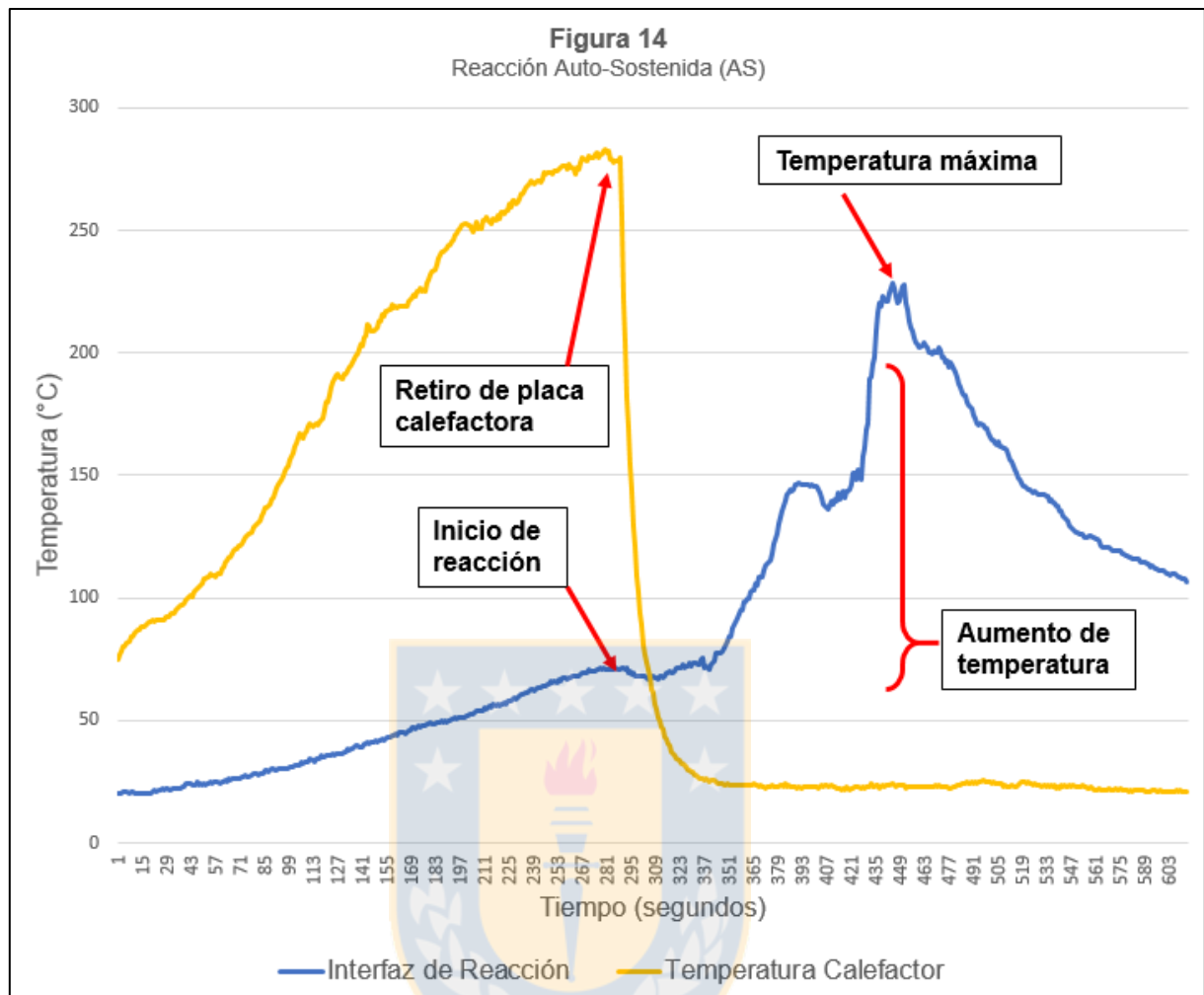


**Fotografía 4:** Inicio de reacción, con liberación de burbujas y espuma en un Ensayo de Reactividad.



**Fotografía 5:** Reacción avanzada, con liberación de humos y espuma en un Ensayo de Reactividad.

- Reacción Auto-sostenida (AS): ocurre reacción entre la muestra y el nitrato de amonio, y cuando se retira el montaje de la fuente de calor, la reacción se mantiene durante un tiempo, o incluso puede que siga aumentando la temperatura (Figura 14). Generalmente se observa liberación de burbujas, espuma o humo después de retirar la fuente de calor.
- Reacción No Auto-sostenida (NAS): ocurre reacción entre la muestra y el nitrato de amonio, sin embargo, a diferencia del caso anterior, al retirar la fuente de calor la reacción cesa, lo que queda plasmado en una disminución de la curva temperatura-tiempo en el gráfico (Figura 15).
- No ocurre reacción (NRx): no se observan indicios de reacción o variaciones en las curvas de temperatura (el aumento de ésta es lineal en el tiempo). El calentamiento llega a la temperatura de descomposición térmica del nitrato de amonio puro (entre 170°C y 190°C), sin influencia de los minerales de la muestra.

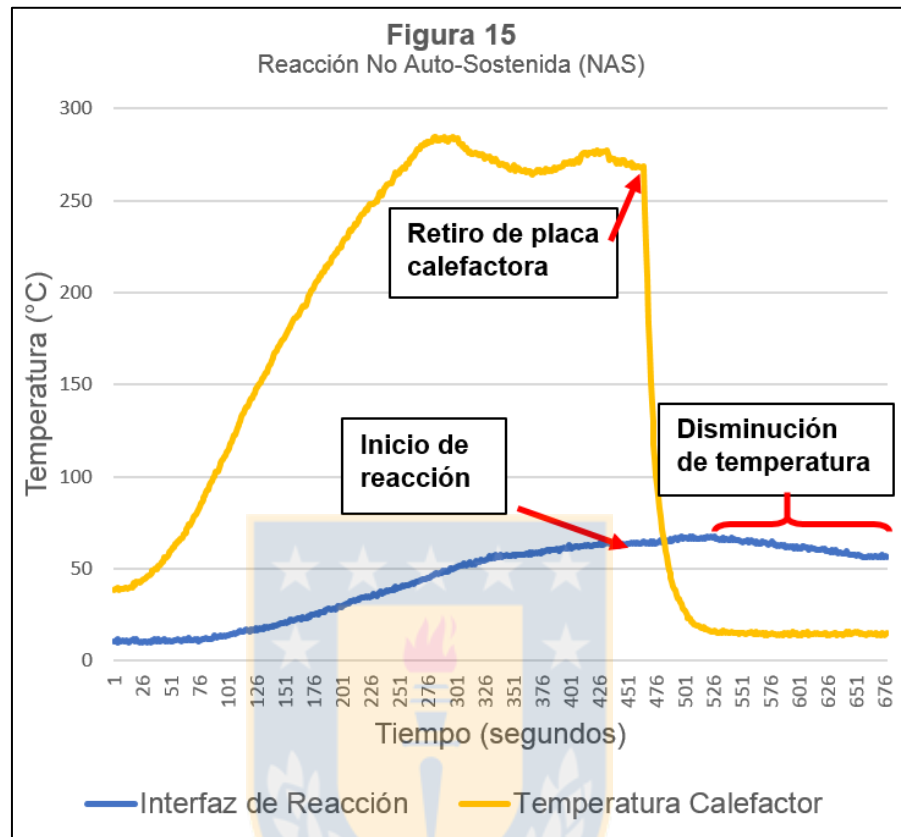


**Figura 14:** Ejemplo del registro del termograma en una reacción auto-sostenida. Muestra INF05-3745-201-511.

El ensayo se realiza al menos dos veces por muestra, con el objetivo de corroborar el comportamiento reactivo de cada una. Con el resultado inicial y el duplicado, se promedian los valores obtenidos de temperatura al inicio de la reacción y las temperaturas máximas.

Considerando los casos anteriores, y a partir de la química de la reacción entre los sulfuros y el nitrato de amonio, se infiere que las muestras clasificadas como AS son potencialmente más riesgosas que las de tipo NAS, puesto que la cantidad de sulfuros de hierro que contienen es suficiente para auto-catalizar las reacciones exotérmicas una vez que comienzan, generando un mayor aumento de acidez y calor en el sistema. Es

decir, las muestras categorizadas como AS tienen un grado de reactividad mayor que las NAS.



**Figura 15:** Ejemplo del registro del termograma en una reacción no auto-sostenida. Muestra INF05-3760-319-340.

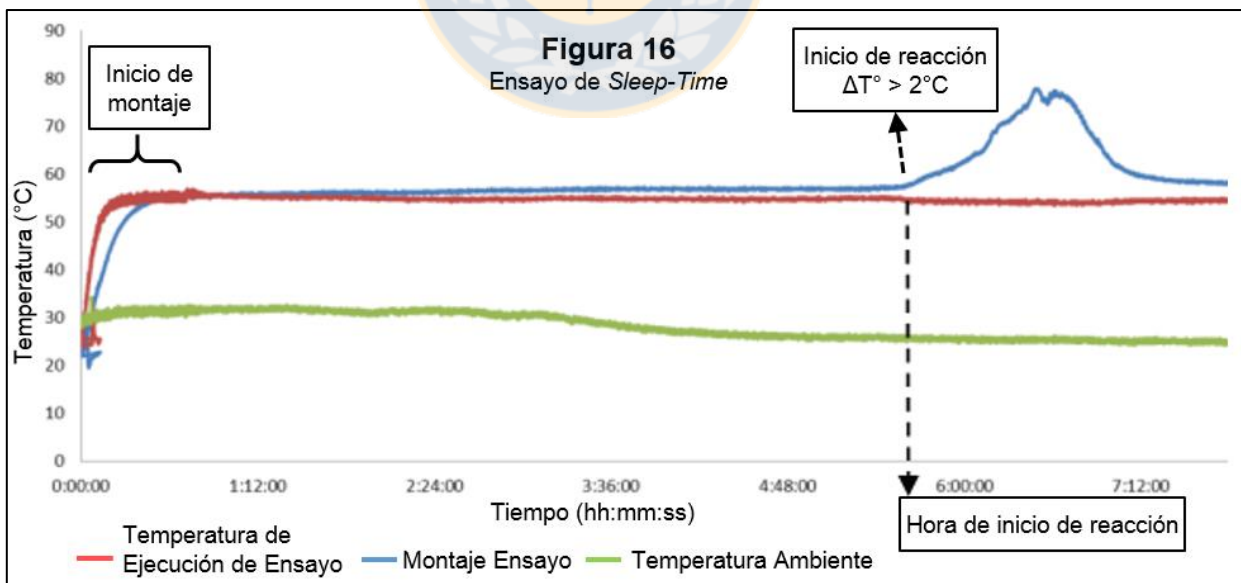
#### 4.7.2. Ensayo de “*Sleep-Time*”

En este ensayo, el objetivo es determinar el tiempo necesario para que comience la reacción entre una muestra reactiva de tipo AS con un producto explosivo. El término “*sleep-time*” hace referencia a la cantidad de horas o días que le toma a la muestra reaccionar con el producto explosivo.

Por razones de confidencialidad de la información, no se describen todos los detalles de esta prueba de laboratorio. El montaje se adapta del diseño de la AEISG (2017) y para ello se hace una mezcla entre una cantidad determinada de muestra de pozo de tronadura (sólo de aquellas con reacción de tipo AS o auto-sostenida) con una disolución aceleradora de iones férrico/ferroso y el producto explosivo que se necesite evaluar. Este

sistema se inserta en un tubo de ensayo y luego se introduce en una estufa que lo mantiene a una temperatura fija (llamada “Temperatura de Ejecución de Ensayo”), durante un periodo máximo de 30 días. Al igual que en el ensayo de reactividad, se utilizan termopares para registrar las variaciones de temperatura de la mezcla. Uno de los extremos va adentro del tubo, mientras que el otro se conecta a un adquisidor de datos para graficar las curvas en un termograma.

Para determinar la ocurrencia de la reacción, se revisa periódicamente el montaje desde el inicio. Para ello, se observan las diferencias en las curvas de temperatura registradas por el adquisidor de datos. Si se reconoce una variación de 2 grados o más con respecto a la Temperatura de Ejecución del Ensayo (Figura 16), entonces puede que la muestra y el producto hayan reaccionado. Para confirmar esto, se abre la estufa y se observan a simple vista los tubos. Si es que se advierten diferencias sustanciales en la mezcla, ya sea cambios en el volumen, cambios de color o disolución de los *prills* (gránulos) de nitrato de amonio, entonces efectivamente la mezcla ha reaccionado. Luego, se identifica el punto de inicio de la reacción: mediante el termograma, se busca la fecha y hora exactas en que se registra la primera variación de 2 grados o más de temperatura en la mezcla, lo que indica cuántos días u horas pasan para que se gatille la reacción.



**Figura 16:** Ejemplo del registro del termograma en un Ensayo de *Sleep-Time*, donde se identifica el punto en el tiempo en que inicia la reacción, gracias a la variación de temperatura de 2°C o más del montaje ( $\Delta T^\circ > 2^\circ\text{C}$ ). La Temperatura de Ejecución de Ensayo es de 55°C en este ejemplo.

El valor de *sleep-time* equivale al 25% de la cantidad de tiempo que pasa para que comience la reacción. Por ejemplo, si una muestra necesita 10 días en la estufa para reaccionar, el valor de *sleep-time* es de 2,5 días, o si es que la muestra necesita de 24 horas, entonces el *sleep-time* es de 0,25 días (equivalente a 6 horas). El *sleep-time* varía entonces entre 0 y 7,5 días, ya que el tiempo de duración máximo del ensayo es de 30 días.

La disolución aceleradora de iones férrico/ferroso se utiliza para someter a la muestra a “las peores condiciones”, es decir, emulando una situación en la que en el pozo de tronadura hay minerales oxidados (iones ferrosos y férricos producto de la meteorización de la pirita y/u otros sulfuros de cobre/hierro) antes de ponerlos en contacto con el explosivo.

La Temperatura de Ejecución del Ensayo se determina por los registros que tiene la faena minera en la realidad. Para este estudio, se estandariza la Temperatura de Ejecución de Ensayo en 25°C.

#### **4.8. Alcances y Limitaciones**

Este trabajo tiene por objetivo identificar sectores de la mina Los Bronces que sean más propensos a tener la reacción exotérmica entre sulfuros de hierro y explosivos ANFO. Se tomaron muestras de pozos de tronadura de tres fases de explotación, sin embargo, la Fase Donoso se excluyó del estudio, debido a que, durante la campaña de muestreo, esta fase se encontraba suspendida por motivos operacionales. Esto implica que el estudio no abarca por completo la mina Los Bronces como se propone en un inicio.

Puesto que los pozos de tronadura en la mina Los Bronces tienen 15 metros de profundidad, y que el estudio toma un largo tiempo en completarse, la caracterización de la reacción entre los sulfuros de hierro de la roca y los explosivos ANFO, en este caso, representa un periodo de tiempo muy abreviado. Esto significa que es muy difícil obtener resultados en tiempo real durante el desarrollo de una fase de explotación en la mina, puesto que la operación avanza a mayor velocidad que un trabajo de este tipo. Sin embargo, a pesar de este hecho, las conclusiones del estudio se pueden extrapolar hacia bancos inferiores (que se explotarán en el corto a mediano plazo) gracias a los modelos

geológicos que se usan para planificar el futuro de la operación minera, los que representan estimaciones de las leyes de sulfuros, litologías o alteraciones hidrotermales similares a las de las muestras que utilizan en esta ocasión, por lo tanto, se espera un comportamiento similar de las muestras de los bancos que aún no se explotan, al menos, en líneas generales.





## 5. Resultados

### 5.1. Resultados de Ensayos

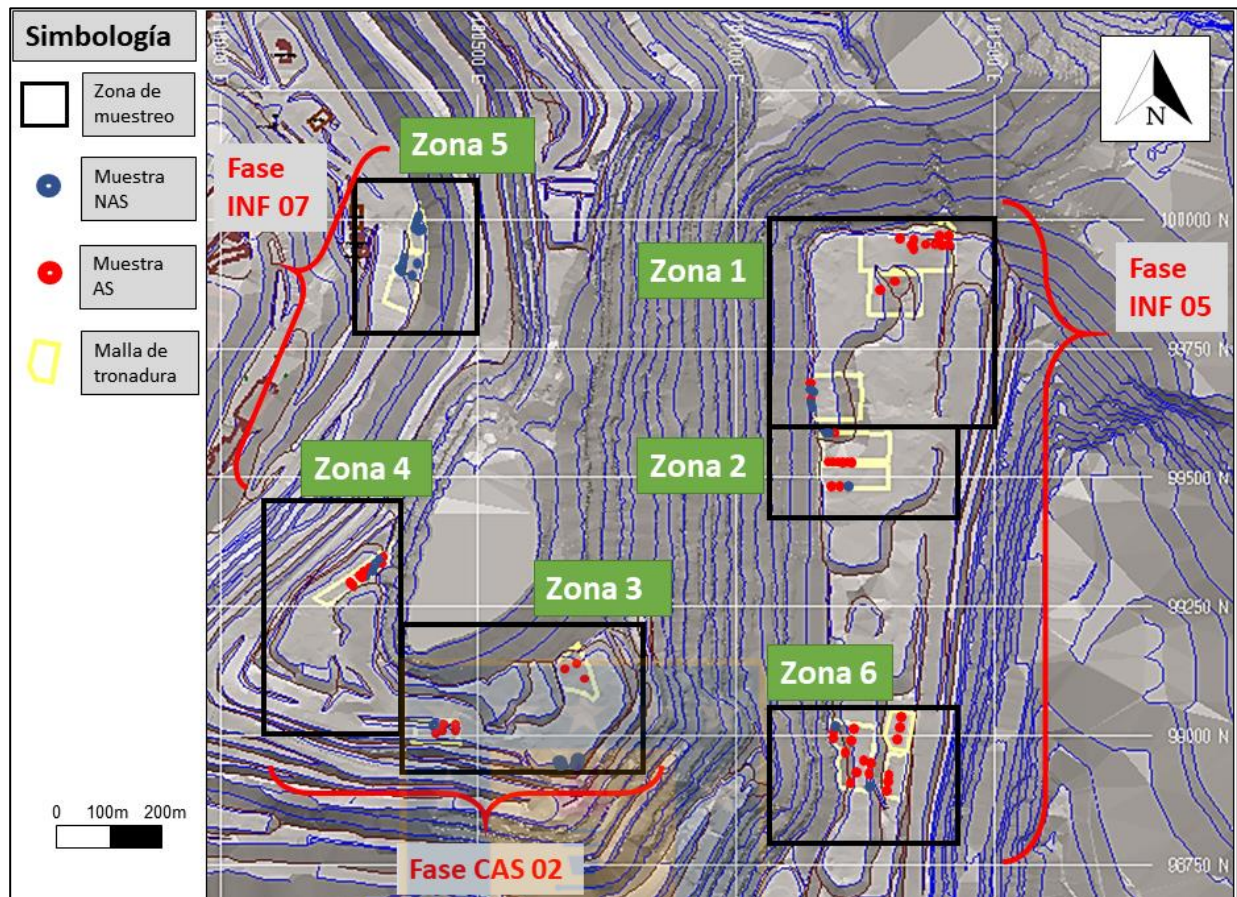
#### 5.1.1. Ensayo de Reactividad

Del total de muestras analizadas (85), 55 de ellas, equivalente al 65% del total, generan reacción de tipo auto-sostenida (AS) al estar en contacto con nitrato de amonio, mientras que las 30 muestras restantes (35%) tienen reacción no auto-sostenida (NAS) (Tabla 3). En ningún caso hay ausencia de reacción (NRx). La distribución del tipo de reacción para cada zona de muestreo se indica en la Figura 17.

**Tabla 3:** Resultados de Ensayo de Reactividad.

Zona	Fase	N° de muestras	Reacción AS		Reacción NAS		Sin Reacción (NRx)	
			Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
1	INF05	18	14	78%	4	22%	0	0%
2	INF05	12	9	75%	3	25%	0	0%
3	CASINO	13	8	62%	5	38%	0	0%
4	CASINO	12	8	67%	4	33%	0	0%
5	INF7	12	0	0%	12	100%	0	0%
6	INF05	18	16	89%	2	11%	0	0%
<b>Total</b>		<b>85</b>	<b>55</b>	<b>65%</b>	<b>30</b>	<b>35%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>

Al separar los resultados por fase de explotación, se destaca que la Fase Infiernillo 5 contiene las zonas del estudio con mayores porcentajes de reacción AS. Acá, la Zona 6 es la zona con el porcentaje más alto de todo el estudio: de las 18 muestras, el 89% de ellas (16) se comporta de manera auto-sostenida. Le sigue la Zona 1, con igual número de muestras en total, de las cuales el 78% (14 muestras) presenta este tipo de reacción. En la Zona 2 se observa que 9 de las 12 muestras (ósea el 75%) tiene reacción auto-sostenida. Con respecto a la Fase Casino, las zonas 3 y 4 se comportan de manera similar entre ellas, con 62% (8 de 13 muestras) y 67% (8 de 12) de reacciones auto-sostenidas, respectivamente. Finalmente, es llamativo que en la Fase Infiernillo 7, al oeste del rajo, constituido únicamente por la Zona 5, las 12 muestras reaccionan de manera no auto-sostenida, lo que significa un comportamiento 100% NAS.



**Figura 17:** Mapa de la mina con la distribución de las 85 muestras y el tipo de reacción que presentan. En puntos rojos: reacción AS. En puntos azules: reacción NAS. Se añaden las zonas de muestreo y las fases a las que corresponden.

En este ensayo también se registran las Temperaturas de Inicio de Reacción (“Ti Rx”) y las Temperaturas Máximas (“T Final Máx.”) alcanzadas por las muestras durante la reacción, que se resumen en la Tabla 4. En la Fase Infiernillo 5, que agrupa las zonas de muestreo 1, 2 y 6, se observan los resultados más relevantes. La Zona 1 posee la muestra con Temperatura de Inicio de Reacción más baja de todo el estudio o “Ti Rx” mínimo (42°C), mientras que las 18 muestras promedian una Ti Rx de 55°C. Luego, viene la Zona 2 con una “Ti Rx” mínima de 45°C, y promedio de 53°C. La Zona 6 posee una Temperatura de Inicio de Reacción de similar magnitud, con un valor mínimo de 47°C, y promedio entre sus muestras de 56°C. Estos registros son bastante bajos, lo que significa que la reacción comienza tempranamente. En la Fase Casino, las Temperaturas de Inicio de Reacción son levemente más altas comparadas con la Fase Infiernillo 5, ya que las zonas 3 y 4 tienen mínimos de 50°C y de 52°C respectivamente. La Zona 4 posee el

mayor promedio entre sus muestras de Temperatura de Inicio de Reacción de todo el estudio, con un valor de 65°C. Finalmente, la Zona 5, única presente para la Fase Infiernillo 7, posee una Ti Rx mínima de 54°C, y el promedio de las 12 muestras de esta zona es de 62°C.

**Tabla 4:** Temperaturas registradas en el Ensayo de Reactividad. “Ti Rx” = Temperatura de Inicio de Reacción; “T” = Temperatura.

Zona	Fase	AS	NAS	Ti Rx Mín. (°C)	Ti Rx Prom. (°C)	T Final Máx. (°C)	T Final Prom. (°C)
1	INF05	78%	22%	42	55	245	146
2	INF05	75%	25%	45	53	218	87
3	CASINO	62%	38%	50	56	102	76
4	CASINO	67%	33%	52	65	167	91
5	INF7	0%	100%	54	62	77	72
6	INF05	89%	11%	47	56	167	100

Con respecto a la Temperatura Máxima (“T Final Máx.”) obtenida por cada muestra, en la Fase Infiernillo 5 se observaron los valores más altos. Por un lado, la Zona 1 tiene la muestra con la temperatura final más alta del estudio (245°C), mientras que el promedio para las 18 muestras de la zona, o “T Final Prom.”, es de 146°C (el más elevado de todo el estudio). La Zona 2 tiene una “T Final Máx.” de 218°C, y un promedio de 87°C entre sus muestras. En la Zona 6, se observa una “T Final Máx.” de 167°C, mientras que el promedio es de 100°C. Por otro lado, en Fase Casino se distinguen Temperaturas Máximas elevadas, pero con promedios menores en cada zona. En la Zona 3, la T Final Máx. es de 102°C, y el promedio entre sus muestras es de 76°C. Para la Zona 4, la T Final Máx. es de 167°C, con un promedio de 91°C. Finalmente, en la Zona 5 de la Fase Infiernillo 7, se observa una Temperatura Máxima de 77°C, y se promedian las temperaturas finales del ensayo en 72°C para las 12 muestras que la constituyen.

### 5.1.2. Ensayo de *Sleep-Time*

Se realizan pruebas con los productos explosivos Blendex®945, Pirex®50 y Pirex®70 en las muestras de reacción auto sostenida (AS) identificadas con el ensayo de reactividad anterior. Los explosivos de la serie Pirex® se diferencian de la serie Blendex® debido a que contienen un aditivo en la emulsión matriz que retarda la reacción con suelos de alto contenido en sulfuros de hierro. Entre el Pirex®50 y el Pirex®70 la diferencia es que el

primero tiene menor proporción de la emulsión matriz en su fórmula, por lo tanto, tiene menor cantidad del aditivo responsable de retardar la reacción. ENAEX recomienda el uso de Pirex®70 en vez de Pirex®50.

La Tabla 5 indica los resultados obtenidos en el ensayo de *Sleep-Time* (ST) para cada una de las zonas, representadas por el valor mínimo observado, o “ST mínimo”, debido a que este ensayo se enfoca en identificar las condiciones más críticas o de mayor riesgo en cada sector. Con el producto Blendex®945, las cifras de ST mínimo en las fases Infiernillo 5 y Casino son muy bajas (0,1 días y 0,2 días respectivamente). Estos resultados corresponden a las zonas 1 y 6 de la Fase Infiernillo 5, y a la Zona 4 de la Fase Casino. En la Zona 2 (Infiernillo 5) el mínimo es de 0,6 días, mientras que en la Zona 3 (Casino) se observa un mínimo de 1,1 días. Por otro lado, como en la Zona 5 (Infiernillo 7) el 100% de las muestras tienen reacción no auto sostenida (NAS), no son sometidas a ensayos de *Sleep-Time*, puesto que poseen la capacidad para iniciar la reacción con nitrato de amonio, pero no para mantenerla de manera autónoma en el tiempo (AEISG, 2017).

**Tabla 5:** Resultados de Ensayo de *Sleep-Time*.

Zona	Fase	<i>Sleep-Time</i> mínimo a 25°C (días)		
		Blendex®945	Pirex®50	Pirex®70
1	INF05	0,1	7,5	7,5
2	INF05	0,6	7,5	7,5
3	CASINO	1,1	7,5	7,5
4	CASINO	0,2	2,8	7,5
5	INF7	NA	NA	NA
6	INF05	0,1	1,2	7,5

En el caso del Pirex®50, sólo dos muestras puntuales reaccionan, en las zonas 4 (Fase Casino) y 6 (Fase Infiernillo 5). El *sleep-time* para cada una es de 2,8 días y 1,2 días respectivamente, mientras que el resto de las muestras no reacciona con este producto, lo que significa un valor de ST de 7,5 días (Tabla 5). Por último, con el Pirex®70 ninguna de las muestras montadas en el ensayo reacciona, es decir, el ST en cada una de ellas corresponde al valor máximo (7,5 días) (Tabla 5).

## 5.2. Descripción de las Muestras

### 5.2.1. Descripción Macroscópica

La Tabla 6 corresponde al resumen de las descripciones macroscópicas hechas en el *cutting* de los pozos de tronadura, donde se indican las litologías reconocidas, alteración hidrotermal y relación entre los principales sulfuros de hierro. Más detalles en Anexo 3.

**Tabla 6:** Resumen de la descripción macroscópica de las muestras. “Py” = Pirita; “Cpy” = Calcopirita.

Zona	Fase	Litología 1	Litología 2	Alteración Hidrotermal	Sulfuros
1	INF05	Cuarzo Monzonita	Brecha Infiernillo	Cuarzo Sericita	Py > Cpy
2	INF05	Brecha Infiernillo	-	Cuarzo Sericita	Py > Cpy
3	CASINO	Cuarzo Monzonita	-	Cuarzo Sericita	Cpy > Py
4	CASINO	Cuarzo Monzonita	-	Cuarzo Sericita	Py ≈ Cpy
5	INF7	Brecha Central	Brecha Occidente	Cuarzo Sericita	Py > Cpy
6	INF05	Cuarzo Monzonita	-	Cuarzo Sericita	Py > Cpy

Como se puede apreciar, la litología más común es la Cuarzo Monzonita. Se encuentra en las zonas 1, 3, 4 y 6. La Zona 2 está constituida sólo por Brecha Infiernillo, litología que también aparece, en menor cantidad, en la Zona 1. La Zona 3 corresponde completamente a Cuarzo Monzonita, igual que la Zona 4. Por último, en la Zona 5 se observan dos litologías diferentes al resto: Brecha Occidente y Brecha Central, cuya presencia es más común hacia el noroeste y centro de la mina. La única alteración hidrotermal observada en todas las zonas es la fílica o cuarzo sericita, probablemente debido a que las zonas de explotación actual siguen siendo relativamente superficiales, lo que reduce la posibilidad de encontrar mayor presencia de alteración potásica, más abundante en profundidad. Con respecto a los sulfuros identificados, existe predominancia de pirita por sobre calcopirita y otros sulfuros en las muestras del estudio, a excepción de las zonas 3 y 4, donde la cantidad de calcopirita es mayor al resto y su magnitud es igual o mayor al de la pirita.

### 5.2.2. Estimación Mineralógica por Briquetas

Para obtener la estimación mineralógica final o porcentaje en peso de cada muestra, se utilizan los datos de los análisis químicos (cobre total, hierro, azufre, entre otros) en conjunto con el *software* de caracterización y descripción de briquetas. Los principales

minerales metálicos identificados son la pirita, calcopirita, calcosina, covelina, especularita (hematita) y magnetita, con menor cantidad de molibdeno, bornita y rutilo. En cada muestra domina la mineralogía no metálica, con >92% p/p (porcentaje en peso) de ganga (Anexo 4). Los resultados se resumen en la Tabla 7, que incluye sólo los principales minerales metálicos que poseen hierro en su fórmula (en este caso: pirita, calcopirita, bornita, especularita y magnetita), ordenados por zona de muestreo.

**Tabla 7:** Resultados resumidos de la descripción de briquetas pulidas. “Py” = Pirita; “Cpy” = Calcopirita; “Bn” = Bornita; “Spe” = Especularita/Hematita; “Mag” = Magnetita.

Zona	Fase	Py (% p/p)	Cpy (% p/p)	Bn (% p/p)	Spe (% p/p)	Mag (% p/p)
1	INF05	2,65	1,09	0,00	0,86	0,12
2	INF05	1,30	1,10	0,00	0,80	0,91
3	CASINO	0,53	1,47	0,07	0,52	0,10
4	CASINO	1,61	1,74	0,00	0,15	0,16
5	INF7	0,61	0,66	0,00	1,15	0,23
6	INF05	1,36	0,52	0,00	0,60	0,37

La Zona 1 de la Fase Infiernillo 5 sobresale como la de mayor contenido de pirita del estudio, con un promedio de 2,65% p/p. Se destaca también que en la Zona 4 de la Fase Casino, el promedio es de 1,61% p/p de pirita, lo que es mayor a las otras zonas de la Fase Infiernillo 5, como las zonas 2 y 6, que promedian el contenido de pirita en 1,30% p/p y 1,36% p/p respectivamente. En contraste con la Zona 4, dentro de la Fase Casino, la Zona 3 posee el promedio más bajo del estudio, con 0,53% p/p de pirita. Por último, la Zona 5 de la Fase Infiernillo 7 promedia 0,61% p/p y, al igual que la Zona 3, no supera el umbral del 1% p/p de pirita promedio en sus muestras. En el Anexo 4, se indican los detalles del contenido de sulfuros y otros minerales para cada muestra.

### 5.3. Resumen de Resultados

La Tabla 8 resume los resultados más importantes, agrupados según fases de explotación y sus zonas respectivas, y se ordenan de mayor a menor reactividad (% de reacción AS, Ti Rx mín.). Se incluyen los valores de *sleep-time* mínimo (ST mín.) por fase y zona, y los promedios de porcentaje en peso (% p/p) de pirita, para contrastar con los resultados de los ensayos.

**Tabla 8:** Resumen de los resultados más importantes entre los ensayos de Reactividad y de *Sleep-Time*, y la descripción mineralógica por briquetas. “Blx945” = Blendex®945; “Px50” = Pirex®50; “Px70” = Pirex®70; “Py” = Pirita; “NA” = No Aplica.

Fase	Zona	Tipo Reacción		Temp. Reacción (°C)		ST mín. a 25°C (días)			Mineralogía
		%AS	%NAS	Ti Rx Mín.	Final Prom.	Blx945	Px50	Px70	Py (% p/p)
<b>INF05</b>		<b>81%</b>	<b>19%</b>	<b>42</b>	<b>114</b>	<b>0,1</b>	<b>1,2</b>	<b>7,5</b>	<b>1,83</b>
	<b>6</b>	89%	11%	47	100	0,1	1,2	7,5	1,36
	<b>1</b>	78%	22%	42	146	0,1	7,5	7,5	2,65
	<b>2</b>	75%	25%	45	87	0,6	7,5	7,5	1,30
<b>CAS02</b>		<b>64%</b>	<b>36%</b>	<b>50</b>	<b>82</b>	<b>0,2</b>	<b>2,8</b>	<b>7,5</b>	<b>1,05</b>
	<b>4</b>	67%	33%	52	91	0,2	2,8	7,5	1,61
	<b>3</b>	62%	38%	50	76	1,1	7,5	7,5	0,53
<b>INF7</b>		<b>0%</b>	<b>100%</b>	<b>54</b>	<b>72</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>0,61</b>
	<b>5</b>	0%	100%	54	72	NA	NA	NA	0,61

Se observan ciertas tendencias en los resultados al separarlos según fase de explotación. Por ejemplo, en la Fase Infiernillo 5, la cantidad de muestras con reacción AS es la más alta de todo el estudio, ya que 39 de las 48 muestras (81%) se comportan de esta manera, en contraste con las otras fases, como en Casino donde 16 de las 25 muestras (64%) tiene reacción de tipo AS y, más aún, con la Fase Infiernillo 7, la diferencia es total, debido al comportamiento 100% (12 de 12 muestras) no auto sostenido de la Zona 5. En la Fase Infiernillo 5, la Ti Rx es la más baja de todo el estudio (42°C), mientras que el promedio de Temperatura Máxima en las 48 muestras es el más alto, con 114°C. En la Fase Casino, la Ti Rx más baja es de 50°C, y las Temperaturas Máximas de las 25 muestras promedian 82°C. Finalmente, en la Fase Infiernillo 7, la Ti Rx mínima alcanza los 54°C, valor bastante cercano al promedio de Temperatura Máxima de las 12 muestras de la Zona 5 (72°C).

Con respecto al Ensayo de *Sleep-Time*, nuevamente es en la Fase Infiernillo 5 donde se observaron los resultados más relevantes. El ST mínimo para el producto Blendex®945 es de 0,1 días, lo que se registra en las zonas 1 y 6, mientras que en la Zona 2 es de 0,6 días. Estos valores se asemejan a los de la Fase Casino, donde se tiene un ST mínimo de 0,2 días en la Zona 4. Sin embargo, al comparar estas cifras con el producto Pirex®50, es en la Fase Infiernillo 5 donde el *sleep-time* tiene el valor más bajo de todos. La Zona 6 de Infiernillo 5 genera reacción a los 1,2 días con este producto, mientras que la Zona

4 (Fase Casino) lo hace en 2,8 días, por lo tanto, en Infiernillo 5 la reacción ocurriría antes con ambos productos explosivos.

Por último, en la descripción de briquetas se revelan datos congruentes con los resultados de los ensayos, puesto que a medida que aumenta el contenido promedio de pirita por fase, los indicadores de reactividad igual se incrementan. La Fase Infiernillo 5, donde se observaron las Temperaturas de Inicio de Reacción más bajas, las Temperaturas Máximas más altas y los menores tiempos de *sleep-time*, es la que contiene más porcentaje en peso de pirita en comparación con las otras fases, con un promedio de 1,83% p/p, a diferencia de la Fase Casino, que apenas alcanza un 1,05% p/p, y de la Fase Infiernillo 7, donde el promedio es muy bajo (0,61% p/p).





## 6. Discusiones

### 6.1. Fase Infiernillo 5

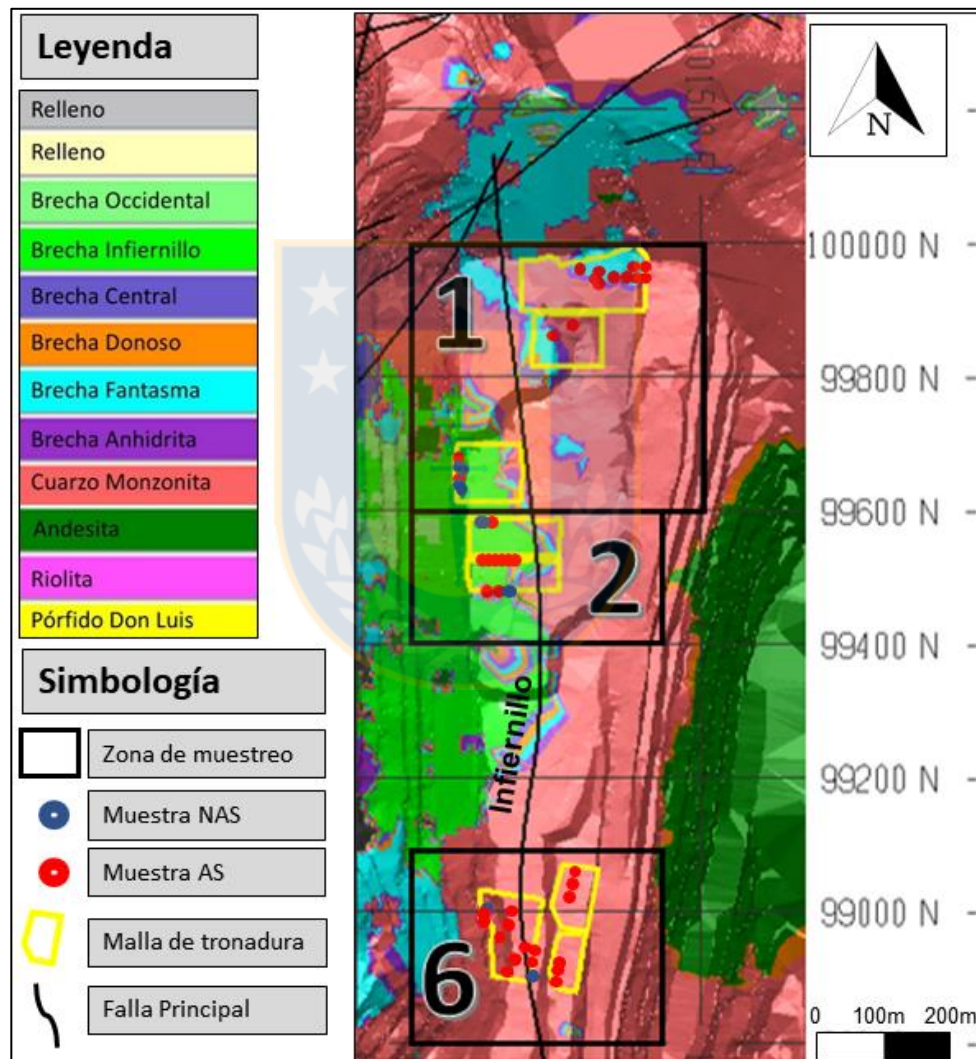
Las litologías que se encuentran en los pozos de tronadura de esta fase son Cuarzo Monzonita y Brecha Infiernillo, distribuidas entre las tres zonas que constituyen a Infiernillo 5 (zonas 1, 2 y 6). Al analizar los resultados asociados a cada una de estas litologías, se desprenden diferencias sustanciales.

De las 85 muestras analizadas en el estudio completo, la mayor proporción de muestras con reacción auto-sostenida por fase de explotación ocurre en Infiernillo 5, donde 39 de las 48 muestras, es decir, 81% de ellas, reaccionan de esta manera. De esas 39 muestras, 28 pertenecen a la litología Cuarzo Monzonita, y se distribuyen entre las zonas 1 y 6, mientras que las 11 muestras restantes corresponden a Brecha Infiernillo, encontrada entre las zonas 1 y 2 (Tabla 6). Por otro lado, del 19% restante de muestras de esta fase que reaccionan de modo no auto-sostenido (9 de 48), 2 de ellas son Cuarzo Monzonita (en la Zona 6) y 7 son de litología Brecha Infiernillo (distribuidas entre las zonas 1 y 2) (Figura 18), lo que significa que la mayoría del comportamiento NAS en la fase se concentra en la litología Brecha Infiernillo, mientras que la mayoría de las muestras con reacción AS se ubican en la Cuarzo Monzonita.

Una diferencia similar al de los porcentajes de reacción AS o NAS ocurre con las Temperaturas Máximas registradas en las muestras de acuerdo a la litología. Por una parte, en las muestras de Cuarzo Monzonita, localizadas entre las zonas 1 y 6, el promedio de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad es de 133°C, mientras que, por otro lado, en Brecha Infiernillo (zonas 1 y 2) las muestras promedian una Temperatura Máxima de 82°C.

Con respecto a los resultados del Ensayo de *Sleep-Time*, al igual que en los casos anteriores, se observan diferencias según la litología involucrada. Por un lado, las muestras AS de Cuarzo Monzonita sometidas a este ensayo, registran los valores de ST más bajos del estudio (lo que significa que la reacción ocurre muy rápido), donde 13 de las 30 muestras con esta litología reaccionan con el producto Blendex®945 en 0,1 días, lo que equivale al mínimo que se registra entre las zonas 1 y 6. De manera similar, con

el producto Pirex®50, el valor más bajo se observa en una muestra de litología Cuarzo Monzonita perteneciente a la Zona 6 de la Fase Infiernillo 5: 1,2 días. Por otro lado, en las muestras de Brecha Infiernillo, el ST (valor de *sleep-time*) mínimo observado con el producto Blendex®945 es de 0,6 días, resultado correspondiente a solo 2 muestras ubicadas cada una en las zonas 1 y 2, mientras que con el producto Pirex®50 no ocurre reacción en ninguna de las 11 muestras AS de esta litología. Como se menciona en el capítulo anterior, no hay muestras que presenten reacción con el producto Pirex®70.

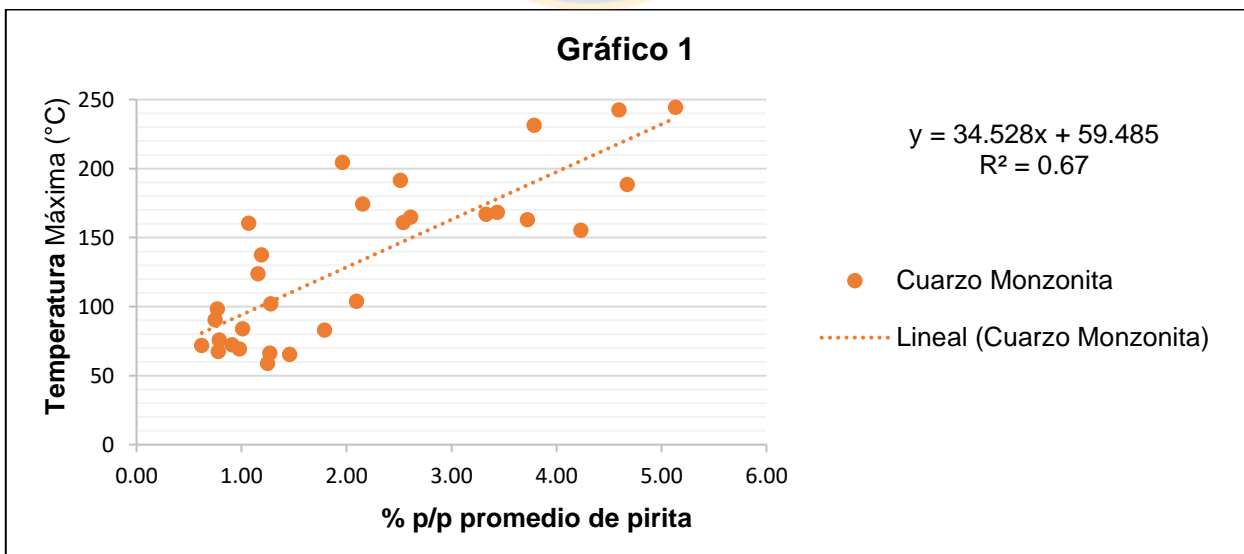


**Figura 18:** Distribución de los resultados del Ensayo de Reactividad en Fase Infiernillo 5.

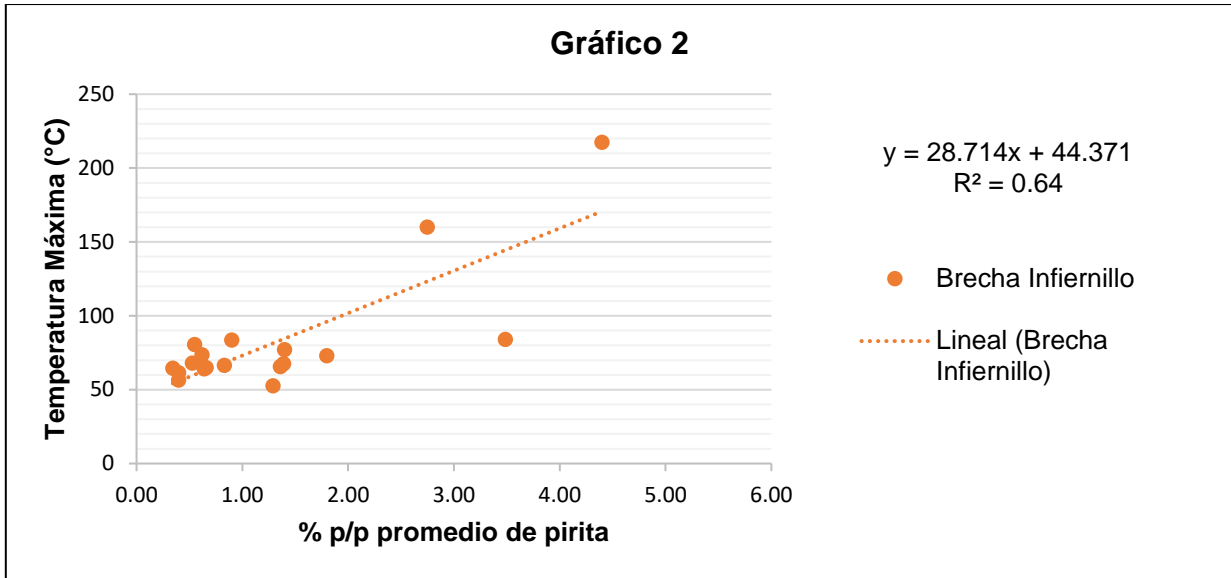
Es posible que la diferencia en los resultados entre ambas litologías se deba al mayor contenido promedio de pirita de las muestras con litología Cuarzo Monzonita en esta fase

(28 con reacción AS y 2 con reacción NAS), equivalente a un 2,13% (anexos 3 y 4), entretanto que en las muestras de Brecha Infiernillo (11 muestras AS y 7 NAS), el promedio es de 1,32% (anexos 3 y 4). El motivo de la diferencia en la cantidad de pirita puede estar asociado a que las rocas cuarzo monzoníticas del Batolito San Francisco son unidades previas a la mineralización, es decir, su origen no está relacionado al emplazamiento de los minerales sulfurados. Por el contrario, la presencia de sulfuros de hierro en esta unidad litológica se debe al fracturamiento que ocurre cuando se emplazan los cuerpos brechosos principales, donde la pirita generalmente precipita en mayor cantidad en las unidades que rodean al Complejo de Brechas Los Bronces, generalmente con ocurrencia tipo *stockwork* (Warnaars *et al.*, 1985).

Los resultados de los ensayos y las estimaciones de pirita sugieren que, a mayor porcentaje en peso de pirita en las muestras, es más probable que se genere una reacción de tipo AS, con Temperaturas Máximas elevadas y que ocurra en menos tiempo bajo condiciones de laboratorio. No obstante, desde un punto de vista estadístico, los resultados no son del todo concordantes. Por ejemplo, al correlacionar la Temperatura Máxima del Ensayo de Reactividad con los porcentajes en peso de pirita según las litologías encontradas en esta fase (Cuarzo Monzonita y Brecha Infiernillo), se observa que no hay correlación directa entre estas variables, a pesar de que la tendencia es positiva (Gráfico 1 y Gráfico 2).



**Gráfico 1:** Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de Cuarzo Monzonita de Fase Infiernillo 5.



**Gráfico 2:** Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de Brecha Infiernillo de Fase Infiernillo 5.

La función estadística r-cuadrado ( $R^2$ ) en ambos casos no alcanza un valor ideal ( $> 0,90$ ). En general, para obtener un valor de  $R^2 > 0,90$ , una de las variables debe depender casi por completo de la otra. En los casos analizados en este estudio, es muy difícil aislar los resultados de acuerdo a la relación que se grafica entre el contenido de pirita y las Temperaturas Máximas. Debido a la naturaleza de la reacción, hay muchos factores que pueden influir en su desarrollo, principalmente los asociados al medio, los que por motivos operacionales no pueden ser controlados, ni menos cuantificados para determinar su injerencia en la reacción. El ejemplo más claro de esto, es la cantidad de humedad que afecta a las rocas de la mina antes y después de la perforación de los pozos de tronadura. Gracias a la ubicación geográfica, y los cambios estacionales que sufre naturalmente un yacimiento de esta envergadura, la influencia de la humedad fue un factor complejo de controlar durante el desarrollo de este estudio. A medida que la humedad en el pozo se hace más presente, la oxidación natural de los sulfuros de hierro aumenta (principalmente en invierno, durante las constantes nevadas), lo que, en consecuencia, genera mayor acidez y aumento de calor. A pesar de que los valores de  $R^2$  calculados no indican una correlación directa (0,67 en las muestras de Cuarzo Monzonita y 0,64 para las de Brecha Infiernillo), la relación entre las variables de Temperatura Máxima y cantidad de pirita por muestra se considera proporcional.

Una manera de estimar la influencia del medio sobre los sulfuros de hierro, es utilizar los modelos estructurales de la mina, donde se indica el tipo y la cantidad de estructuras asociadas a diferentes sectores, que, según su orientación y magnitud, caracterizan los Dominios Estructurales definidos en Los Bronces por Carrizo *et al.* (2013) (Figura 9). En base a la premisa de que las rocas con mucho fracturamiento tienden a ser más permeables, se infiere la siguiente relación: a medida que un sector de la mina posea más estructuras, el nivel de oxidación sobre los sulfuros de hierro y otras especies va a ser mayor (las estructuras como fallas y diaclasas favorecen la infiltración de aguas meteóricas y la circulación de aguas subterráneas, lo que es conocido como permeabilidad secundaria). En el caso de la Fase Infiernillo 5, se determina, gracias a la ubicación de las zonas de muestreo y la naturaleza de las muestras, que pertenecen al Dominio 5 (Figura 9) (al SE del rajo, caracterizado por un control litológico asociado a las rocas cuarzomonzónicas). Este dominio, según el análisis realizado por Carrizo & Barros (2017), es el que posee la mayor cantidad de estructuras, entre fallas, diaclasas y vetillas registradas en todo el rajo de Los Bronces. Las cifras ascienden a 3.838 estructuras mayores y 74.483 estructuras menores (diaclasas y vetillas por lo general). La cercanía a la Falla Principal Infiernillo (Figura 9) también se relaciona con esta cantidad, ya que muchas de las estructuras mayores y menores reconocidas se asocian directamente a las fallas principales. Por lo tanto, los resultados de los Ensayos de Reactividad en esta fase están posiblemente asociados al elevado número de estructuras y al mayor contenido de pirita de las muestras, como fue mencionado anteriormente. La influencia de este último se refleja en las diferencias del grado de reactividad que se encuentran en muestras con mayor o menor porcentaje de pirita.

A pesar de esto, no es posible establecer una relación directa entre los resultados del Ensayo de *Sleep-Time*, donde el ST mínimo es de 0,1 días con Blendex®945, y los porcentajes de pirita estimados. La mayoría de las 13 muestras de la Fase Infiernillo 5 que reaccionan en ese tiempo (que es muy bajo) se concentran en la Zona 6, y no poseen elevados contenidos de pirita como es de esperar (Anexo 4). Al analizar la ubicación de las mallas de tronadura que contienen estas muestras, se advierte que son colindantes con el talud de los bancos en los que se localizan (bancos 3775 y 3790 de la Zona 6) (Figura 18). Se especula entonces que, debido a la gran cantidad de estructuras

pertenecientes al Dominio 5 asociado a estas muestras, y a la cercanía con el talud, la influencia estructural en estos bancos es muy fuerte, lo que abre la posibilidad de que la oxidación sobre la pirita sea tan abrumante que un porcentaje considerable de ella se remueva y se infiltra hacia bancos inferiores como sulfatos (ejemplo, la jarosita) o como ácido sulfúrico, productos conocidos de la oxidación de este sulfuro de hierro en contacto con agua, y presentes en Los Bronces en los bancos superiores y en sectores cercanos a la superficie. Esto podría explicar cómo es que se encuentran bajos contenidos de pirita, pero que a la vez sus remanentes por meteorización y oxidación se mantengan en la roca al momento de extraer la muestra, de modo que pueden ser responsables del inicio de la reacción con el nitrato de amonio en un tiempo menor (ST muy bajos). Sin embargo, hay que recalcar que esto es una especulación.

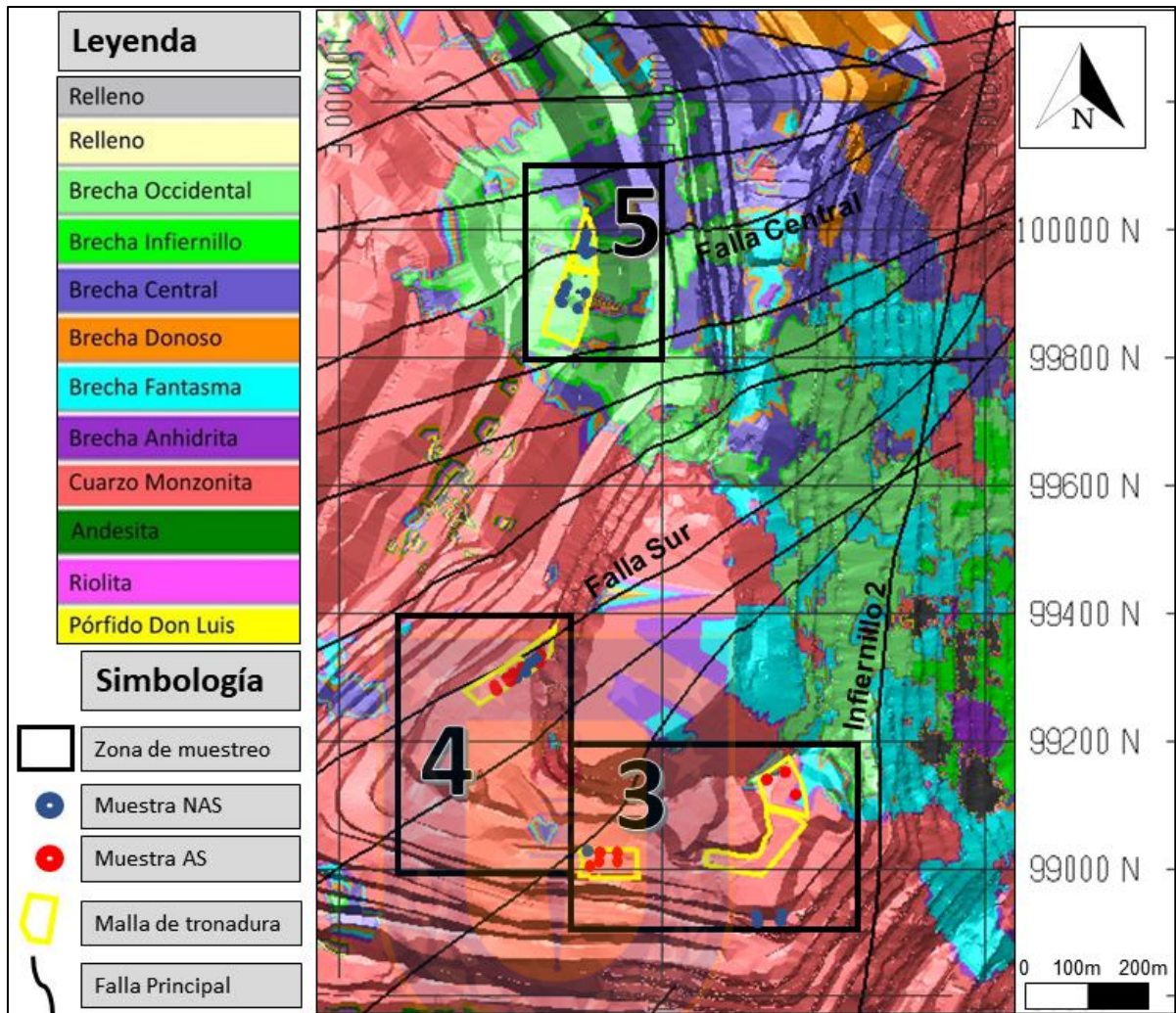
Pese a que este trabajo se enfoca en una cuestión de seguridad, el resultado obtenido es exageradamente ajeno a la realidad de la mina: 0,1 días, lo que es equivalente a 2,4 horas de tiempo de inducción para que reaccione el material de los pozos con el producto explosivo de mayor uso en la mina (Blendex®945). Este tiempo está muy lejano de los casos más críticos a los que se ha enfrentado la operación en Los Bronces, incluso del evento que ocurre en enero de 2016, donde la reacción llega a generar emanación de humos (descrito en el apartado 4.2.1). Hay que considerar que las condiciones de laboratorio a las que se ejecutan los ensayos buscan emular las propiedades que hacen lo más crítico posible a los suelos. Por ejemplo, las muestras se reducen a una granulometría menor de la que fueron extraídas de los pozos (aunque hay varios casos en que el porcentaje de muestra del pozo se viene con la granulometría solicitada para los ensayos). En el Ensayo de Reactividad, el nitrato de amonio puro está en contacto directo y rodeado por el material de los pozos, lo que facilita la proliferación de las reacciones que se generan al ser calentados de manera gradual. Esto podría explicar los resultados de reacción auto-sostenida en muestras con cantidades de pirita relativamente bajas, como la INF05-3760-319-342, perteneciente a la Zona 2, donde se estima un 0,40% de pirita (Anexo 4). En lo que concierne al Ensayo de *Sleep-Time*, éste cuenta con el uso de una disolución de iones ferrosos/férricos que acelera las posibles reacciones. Además, el ensayo se ejecuta a una temperatura constante de 25°C. Este no es el caso que se observa comúnmente en los pozos de la faena, donde la temperatura oscila entre

0 y 15°C según la estación del año (comunicación verbal con Zuta, F., administrador de contrato de Enaex en Los Bronces, 2018). Se establece la temperatura de ejecución del ensayo en 25°C debido a que, como fue mencionado anteriormente, esta prueba de laboratorio busca emular las peores condiciones posibles que se pueden encontrar en un pozo de tronadura, es decir, que el pozo con presencia de sulfuros de hierro posee altos índices de oxidación natural (reflejado en la disolución aceleradora de iones ferroso/férrico), que la granulometría es relativamente fina (lo que implica mayor superficie disponible para reaccionar) y que el pozo aumenta naturalmente su temperatura (consecuencia de la oxidación de los sulfuros de hierro), por lo tanto, el ensayo a 25°C se ajusta a estas condiciones, entregando un resultado lo más aproximado posible al caso hipotético en que estos factores de riesgo se conjuguen, eliminando cualquier incerteza asociada a la presencia o ausencia de unos de ellos (AEISG, 2017).

## 6.2. Fase Casino

Las muestras de pozos de tronadura de la Fase Casino se caracterizan por ser todas de la unidad Cuarzo Monzonita (Figura 19), por lo tanto, no se pueden establecer diferencias en los resultados de los ensayos según litologías particulares. En esta fase, se definen 2 zonas de muestreo (Zona 3 y Zona 4, al SW de la mina), las cuales poseen porcentajes similares de reacción auto-sostenida, donde la Zona 3 es levemente menos reactiva que la Zona 4 (62% reacción AS y 67% reacción AS respectivamente). Otro factor en común que tienen ambas zonas, es que los porcentajes promedio de calcopirita son comparables entre ellas, donde la Zona 3 posee una concentración de 1,47% y la Zona 4 un 1,74% (Anexo 4), lo que significa que son las áreas de muestreo de mayor ley de cobre en el estudio.

Las diferencias entre ellas son más notorias al comparar las Temperaturas Máximas que se registran en el Ensayo de Reactividad. En la Zona 3, el promedio de Temperatura Máxima es de 76°C, mientras que en la Zona 4 es de 91°C (Tabla 8). Esta variación está probablemente asociada a los porcentajes de pirita estimados en cada zona, donde la Zona 3 tiene considerablemente menos pirita que la Zona 4. En la primera de ellas, el promedio es bastante bajo, apenas llega al 0,53%, mientras que, en la segunda, alcanza un valor de 1,61%.

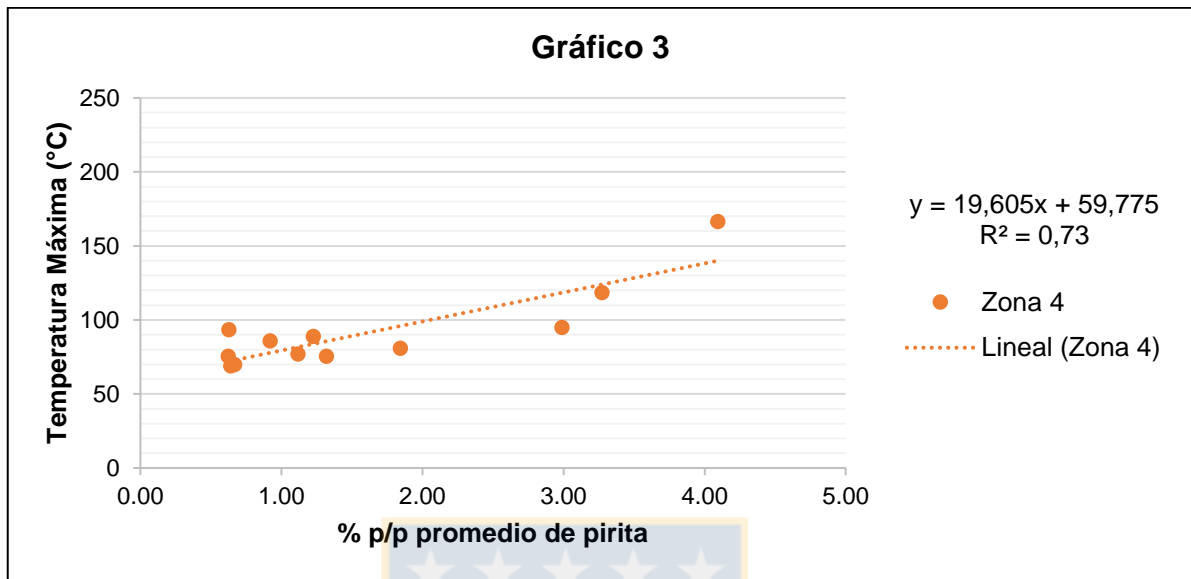


**Figura 19:** Distribución de los resultados del Ensayo de Reactividad en fases Casino e Infiernillo 7.

Al analizar en detalle los resultados de las muestras de la Zona 4, se observa que las muestras con mayor contenido de pirita tienden a generar reacción AS, y que también alcanzan Temperaturas Máximas más altas. Similar a los casos observados en la Fase Infiernillo 5 (Gráfico 1 y Gráfico 2), la correlación entre la cantidad de pirita y las Temperaturas Máximas del Ensayo de Reactividad de estas muestras alcanza un valor de  $R^2 = 0,73$  (Gráfico 3). A pesar de que la correlación no es la ideal (donde  $R^2 > 0,90$ ), el resultado se interpreta de manera positiva, es decir, existe una dependencia considerable entre las variables (cantidad de pirita sobre la Temperatura Máxima), siempre y cuando se considere que existen otros factores involucrados en la ocurrencia



de la reacción (humedad presente, cantidad de estructuras, tasa de generación de acidez, etc.).



**Gráfico 3:** Correlación entre los resultados de Temperatura Máxima en el Ensayo de Reactividad con el contenido promedio de pirita en muestras de la Zona 4 de Fase Casino.

En la Zona 3, las Temperaturas Máximas más bajas que se reconocen están posiblemente asociadas al bajo contenido de pirita en sus muestras. Sin embargo, el porcentaje de reacción AS de esta zona es relativamente alto (62%) para el promedio de 0,53% de pirita. Esto puede estar relacionado al promedio de calcopirita (1,47%, que es de los más altos de este estudio), debido a que es un sulfuro de hierro, pero también de cobre. Sin embargo, esta posibilidad se descarta debido a que en condiciones como en las que se encuentran estos pozos de tronadura, es muy difícil que la oxidación natural de la calcopirita aporte con iones ferrosos y acidez para que comience la reacción. Cuando la calcopirita se somete a condiciones similares a las de la pirita cuando se comienza a oxidar, es el cobre el primero en liberarse, mientras que el hierro libre genera óxidos (Habashi, 1973), por lo tanto, la tasa de generación de iones ferrosos al inicio de la reacción de parte de la calcopirita es muy limitada (Cornell & Schwertmann, 2003). La otra explicación posible para el porcentaje de reactividad AS, es que esta zona, por su ubicación, es parte del Dominio Estructural 4 (Figura 9), que al igual que el Dominio 5 (asociado a la Fase Infiernillo 5) posee una gran cantidad de estructuras, del orden de 3.383 estructuras mayores (fallas) y 35.809 estructuras menores (diaclasas y vetillas),

por lo que es de las más altas de la mina Los Bronces. Se infiere entonces que esta cantidad de estructuras puede ser la responsable de una elevada tasa de oxidación sobre el suelo desde donde se extraen las muestras de esta zona, y, por ende, de condiciones más favorables para la ocurrencia de la reacción AS.

Con respecto a los resultados del Ensayo de *Sleep-Time*, en la Zona 4 la reacción se gatilla tempranamente con el producto Blendex®945, en un ST mínimo de 0,2 días, lo que es un valor bastante bajo, y similar a los observados en la Fase Infiernillo 5. Estos resultados, al igual que los del Ensayo de Reactividad, están asociados probablemente a la cantidad de pirita que se encuentra en las muestras. Otro factor que puede contribuir a estos resultados, es la cantidad de estructuras del Dominio 4 mencionado anteriormente. Mientras tanto, en la Zona 3, los resultados oscilan entre 1,1 y 1,3 días, lo que es concordante con lo esperado según los contenidos de pirita de las muestras, y a la cantidad de estructuras que se reconocen en el Dominio 4 del que es parte esta zona.

### **6.3. Fase Infiernillo 7**

Esta zona se diferencia de las otras principalmente por dos características: por un lado, las litologías presentes son distintas al resto de las zonas, ya que se constituye por la Brecha Central y la Brecha Occidente, y, por otro lado, a la ausencia de reacciones del tipo auto-sostenido (Figura 19). El comportamiento 100% NAS se debe posiblemente a la reducida cantidad de pirita en cada una de las muestras, donde el promedio es de 0,61%. La baja presencia de este sulfuro de hierro, y de otros como la calcopirita, obedece al hecho de que las litologías Brecha Occidente y Brecha Central, son del grupo de las brechas hidrotermales más tempranas del Complejo de Brechas Los Bronces, que según Toro *et al.* (2012), poseen una proporción de sulfuros menor a las brechas hidrotermales más tardías o a las brechas freatomagmáticas, entre ellas, la Brecha Infiernillo encontrada en las zonas 1 y 2. El bajo contenido de sulfuros de hierro en esta zona de muestreo, limita la cantidad de compuestos necesarios para gatillar y mantener una reacción AS, y, asimismo, para alcanzar Temperaturas Máximas más elevadas (el promedio entre las muestras es 72°C, el menor del estudio completo).

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

El proceso de perforación de pozos y su posterior carguío con explosivos debe tener absoluta consideración de los riesgos asociados a las posibles reacciones que se pueden suscitar por la interacción entre el ANFO y los minerales sulfurados de hierro. Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la teoría de que una elevada concentración de estos minerales tiene implicancia directa en la aceleración de las reacciones mencionadas, así como también de las condiciones en que se desarrollan, como la Temperatura de Inicio de Reacción, la Temperatura Máxima que alcanza, y el tiempo necesario para que comience. No obstante, existen muchos casos en que la génesis de la reacción no se relaciona únicamente con la alta concentración de sulfuros de hierro. Se cree entonces que deben coexistir una serie de condiciones favorables en el sistema Mineral-ANFO y del medio que lo rodea para que la reacción se desarrolle. A continuación, se explica la importancia de cada una de estas condiciones:

La primera es, por supuesto, la presencia de sulfuros de hierro, debido a que son la principal fuente de ion ferroso y ácido sulfúrico, los que a su vez inician las interacciones primordiales con el nitrato de amonio cuando están en contacto, y, en consecuencia, gatillan la cascada de reacciones exotérmicas que finalizan en la liberación excesiva de calor. Algunas de estas reacciones son auto-catalíticas, lo que significa que, a medida que ocurren, aportan sustancias que aceleran la llegada al equilibrio en las mismas reacciones, retroalimentándose constantemente. Si la concentración de sulfuros de hierro inicial es alta, entonces estas reacciones se completan con mayor rapidez. Si la concentración es baja, entonces es menos probable que se desarrolle la reacción, aunque hay casos en que lo hace de igual manera, pero a un menor grado de violencia.

En relación a lo anterior, los procesos de oxidación y meteorización sobre la pirita y otros sulfuros similares tienen una importancia enorme, puesto que, sin ellos, no ocurrirían las reacciones electroquímicas responsables del aporte de ion ferroso y ácido.

Asociado a las condiciones anteriores, la permeabilidad del suelo con presencia de sulfuros de hierro tiene injerencia directa sobre las reacciones que se estudian en este

trabajo. En otras palabras, si es que se tiene un macizo rocoso con presencia de sulfuros de hierro, ya sea elevada o baja, y éste posee una alta permeabilidad (para el agua, el oxígeno, o ambos), entonces los sulfuros de hierro presentes se van a oxidar, con las consecuencias que esto implica. A partir de esto se infiere que los suelos con mayor densidad estructural son más propicios para generar oxidación sobre los minerales metálicos susceptibles. Las estructuras geológicas aumentan el grado de permeabilidad secundaria en las rocas, lo que facilita el flujo y almacenamiento de agua y aire, principales responsables de la oxidación. En este estudio, existen zonas con una gran cantidad de estructuras, que justamente coinciden con los resultados más alarmantes (casos de las zonas 1 y 6).

El grado de humedad de los suelos que se perforan, también ejerce influencia en la tasa a la que se generan las reacciones. Esto se explica porque todos los intercambios iónicos entre los participantes de las reacciones se desarrollan en medio acuoso (Priyananda *et al.*, 2015), es decir, si es que la humedad se encuentra en una proporción óptima y constante, entonces se favorecen las reacciones (recordar que ocurren varias reacciones secundarias entre el nitrato de amonio y los productos de la oxidación de la piritita).

En vista de estos factores, el análisis de los resultados, y de los antecedentes, se concluye que, la reacción entre sulfuros de hierro y el nitrato de amonio de los explosivos de uso común en Los Bronces, puede ocurrir bajo una amplia gama de condiciones, en que la concentración de piritita mínima necesaria para ello puede ser variable, y para que el carácter de la reacción sea más violento o de mayor riesgo, se tienen que conjugar estos factores de tal modo que favorezcan la tasa de las reacciones, es decir, que aumenten la rapidez a la que se desarrollan. Para el caso estudio de la mina Los Bronces, el grado de reactividad general o de peligrosidad aumenta en la medida que estos factores se configuran. En consecuencia, según los resultados, el sector donde pueden ocurrir eventos con mayor probabilidad, corresponde a la Fase Infiernillo 5. Le siguen la Fase Casino, y finalmente, con una probabilidad mucho menor, la Fase Infiernillo 7. Sin embargo, no es posible proyectar estos resultados hacia bancos inferiores con la misma seguridad, debido a que la geología de los bancos desde donde se toman las muestras puede ser muy diferente a los del futuro en el mediano plazo y, más aún, a los del largo

plazo. Si bien se puede predecir o estimar el comportamiento del macizo rocoso durante el avance de la faena de acuerdo a los modelos geológicos, existen casos en que las muestras analizadas en este estudio tienen características muy diferentes a las de potenciales muestras de bancos más profundos dentro de una misma fase. Por ejemplo, en el caso de Infiernillo 7 (Zona 5), el muestreo se realiza a una cota en la que la presencia de sulfuros es muy escasa, mientras que en el mismo sector a cotas inferiores se encuentra una concentración de sulfuros mayor (según el Modelo de Bloques 2016), que, probablemente, represente un comportamiento reactivo distinto.

## 7.2. Recomendaciones

A pesar de que los resultados y su análisis entregan conclusiones generales claras sobre el comportamiento de las distintas fases de mina Los Bronces, se ve imposible eliminar toda incerteza relacionada a las reacciones estudiadas. Para solventar las conjeturas que se desprenden del estudio, y para eliminar la mayor cantidad de incertidumbre sobre los resultados y su implicancia, se sugieren las siguientes medidas:

Por un lado, la metodología de muestreo debe incluir en el protocolo el uso obligatorio de bolsas más resistentes a la abrasión y un sistema para almacenar las muestras al vacío, con el fin de eliminar y evitar el ingreso de oxígeno en la bolsa luego de la extracción. El protocolo también debe exigir que la cantidad de muestras sea mayor a la de este estudio, para constituir una base de datos más robusta que cumpla con los requisitos de un trabajo de esta escala. Para ello se pueden ejecutar más estudios que abarquen sectores más profundos de la mina u otros que no se hayan muestreado.

En línea con las sugerencias anteriores, es menester asegurar un apoyo logístico durante el estudio que garantice fluidez y rapidez en la ejecución de la preparación mecánica y el transporte de las muestras desde la extracción y almacenamiento hasta su destino final en el laboratorio de reactividad.

Por otro lado, se recomienda hacer mediciones de humedad y de acidez en las muestras al momento de la extracción. También, se sugiere buscar una metodología o un modelo que cuantifique el grado de oxidación que sufren las muestras previo a la ejecución de los ensayos de Reactividad y de *Sleep-Time*.

En lo que respecta al Ensayo de *Sleep-Time*, los resultados indican condiciones muy favorables para la ocurrencia de la reacción, lo que en la realidad diaria de la mina no se observa. La causa probable de esto es el diseño mismo del ensayo, y las dificultades que significan modificarlo, sin embargo, las condiciones en que se ejecuta el ensayo se basan en los antecedentes críticos o de mayor riesgo propios de la mina Los Bronces (como, por ejemplo, las temperaturas elevadas de algunos pozos, lo que representa una condición de riesgo), por lo tanto, los resultados obtenidos están dentro del rango de confiabilidad para la operación de la minera.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio posterior para caracterizar el sector de Donoso, al norte de la mina, el cual, según los modelos geológicos, posee una gran cantidad de sulfuros, por lo que es difícil predecir su comportamiento reactivo. Por motivos operacionales, no fue posible acceder a este sector durante la campaña de toma de muestras del presente trabajo.



## 8. Referencias

- ABARZUA, A. 2014. Zonación y temporalidad relativa de los tipos de alteración hidrotermal en el sector Los Bronces del complejo porfídico Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 212 pp. Santiago.
- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas. N° 9: 70 pp. Santiago.
- AKHAVAN, J. 2004. The Chemistry of Explosives. The Royal Society of Chemistry: 180 pp. Cambridge.
- AUSTRALIAN EXPLOSIVES INDUSTRY AND SAFETY GROUP. 2017. Code of Practice: Elevated Temperature and Reactive Ground. 59 pp. Brisbane.
- BLONDEL, J. 1980. Pórfido de composición granodiorítica de la mina Río Blanco. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 88 pp. Santiago.
- BRIGGS, T. & KELSO, I. 2001. Ammonium Nitrate-Sulfide Reactivity at the Century Zn-Pb-Ag Mine, Northwest Queensland, Australia. *Exploration and Mining Geology*. Vol. **10**, N° 3: 177-190.
- CARRIZO, D. & BARROS, C. 2016. Actualización 2015 del Modelo Estructural de la Mina Los Bronces: Modelo de Fallas, Dominios Estructurales y Modelo Cinemático. Reporte para Anglo American Chile S.A. 85 pp. Santiago.
- CARRIZO, D. & BARROS, C. 2017. El Modelo Estructural del Depósito Los Bronces, Andes Centrales, Chile. Anglo American Chile S.A (Inédito): 44 pp. Santiago.
- CARRIZO, D.; BARROS, C. & GALLARDO, S. 2013. Modelo Estructural 3D de la Mina Los Bronces, Anglo American Sur S.A. (Chile). Reporte para Anglo American Chile. 66 pp. Santiago.
- CARRIZO, D.; COMTE, D. & SILVA, W. 2012. Estructura del Distrito Cercano Los Bronces, Anglo American Chile: Tectónica y Tomografía Sísmica. Reporte para Anglo American Chile S.A. 27 pp. Santiago.
- CEPEDA, A. 1976. Geología Económica y Evaluación del Área Andina - Disputada. Instituto de Investigaciones Geológicas (Inédito): 40 pp. Santiago.
- CHANDRA, A.P. & GERSON, A.R. 2010. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective. *Surface Science Reports*. Vol. **65**, N° 9: 293-315.
- CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.J.; GANS, P.; KAY, S.M.; MUÑOZ, N.; WYSS, A.R. & ZURITA, E. 2002. Evidence for cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern

- Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15**, N° 1: 117-139.
- CONTRERAS, A. 2003. Geología de Sondajes Profundos en la Mina Los Bronces. Reporte para la Superintendencia de Geología, División Los Bronces, Anglo American Chile S.A: 38 pp. Santiago.
- CORNELL, R. M. & SCHWERTMANN, U. 2003. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences, and uses. Wiley-VCH: 664 pp. Weinheim.
- DECKART, K.; CLARK, A.H.; CUADRA, P. & FANNING, M. 2013. Refinement of the time-space evolution of the giant Mio-Pliocene Río Blanco-Los Bronces porphyry Cu-Mo cluster, Central Chile: New U-Pb (SHRIMP II) and Re-Os geochronology and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology data. *Mineralium Deposita*. Vol. **48**, N° 1: 57-79.
- DECKART, K.; CLARK, A.H.; AGUILAR, C.; VARGAS, R.; BERTENS, A.N.; MORTENSEN, J.K. & FANNING, M. 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Río Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an integrated U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  database. *Economic Geology*. Vol. **100**, N° 5: 905-934.
- FORSHEY, D.R.; RUHE, T.C. & MASON, C.M. 1968. The Reactivity of AN-fuel oil with Pyrite-bearing Ores. US Bureau of Mines, Report of Investigations N° 7.187: 10 pp. Washington.
- FRIKKEN, P.H. 2003. Breccia-Hosted Copper-Molybdenum Mineralization at Rio Blanco, Chile. PhD Thesis, University of Tasmania: 290 pp. Hobart.
- GANNA, P. & WALL, R. 1997.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and K-Ar geochronological evidences of an Upper Cretaceous Eocene hiatus in central Chile (33°-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **24**, N° 2: 145-163. Santiago.
- GODOY, E.; YÁÑEZ, G. & VERA, E. 1999. Inversion of an oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed miocene magmatic arc in the central Chilean Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*. Vol. **306**, N° 2: 217-236.
- HABASHI, F. 1973. Action of Nitric Acid on Chalcopyrite. *Society of Mining Engineers*. Vol. **254**: 224-228.
- HARRIES, G.; BELLAIRS, P. & STEWART, J.S. 1986. The reaction of AN black pyritic shale at Mt Whaleback. Proceedings, Large Open Pit Mining Conference. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy/Institute of Engineers: 141-146.
- IRARRAZAVAL, V.; SILLITOE, R.H.; WILSON, A.; TORO, J.C.; ROBLES, W. & LYALL, G. 2010. Discovery history of a giant, high-grade, hypogene porphyry copper-molybdenum deposit at Los Sulfatos, Los Bronces-Río Blanco district, central Chile. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **15**, N° 14: 253-269.
- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas. N° 8: 1-95. Santiago.



- LUKASZEWSKI, G.M. 1968. The reaction of ANFO explosives with mineral sulphides. Proceedings, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Vol. **228**: 61-70.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F.; ZENTILLI, M. & CHARRIER, R. 2009. Fission track thermochronology of Neogene plutons in the Principal Andean Cordillera of central Chile (33-35°S): Implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization. *Andean Geology*. Vol. **36**, N° 2: 153-171. Santiago.
- MIRON, Y. 1992. Blasting Hazards in Sulfide-bearing Orebodies. US Bureau of Mines, Report of Investigations N° 9.335: 38-46. Washington.
- MIRON, Y.; RUHE, T. & WATSON, R. 1979. Reactivity of ANFO with pyrite containing weathering products. US Bureau of Mines, Report of Investigations N° 8.373: 24 pp. Washington.
- MORENO, H.; THIELE, R. & VARELA, J. 1991. Estudio geológico y de riesgo volcánico y de remoción en masa del proyecto hidroeléctrico Alfalfal II y Las Lajas. Chilgener S.S. (Inédito): 78 pp. Santiago.
- MUÑOZ, M.; AGUIRRE, L.; VERGARA, M.; DEMANT, A.; FUENTES, F. & FOCK, A. 2010. Prehnite-pumpellyite facies metamorphism in the Cenozoic Abanico Formation, Andes of central Chile (33°50'S): chemical and scale controls on mineral assemblages, reaction progress and the equilibrium state. *Andean Geology*. Vol. **37**, N° 1: 54-77. Santiago.
- PILGER, R. 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal of The Geological Society*. Vol. **141**, N° 5: 793-802.
- PIQUER, J.; SKARMETA, J. & COOKE, D. 2015. Structural Evolution of the Rio Blanco-Los Bronces District, Andes of Central Chile: Controls on Stratigraphy, Magmatism, and Mineralization. *Economic Geology*. Vol. **110**, N° 8: 1.995-2.023.
- PRIYANANDA, P.; DJERDJEV, A.M.; GORE, J.; NETO, C.; BEATTIE, K.K. & HAWKETT, B.S. 2015. Premature detonation of an NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> emulsion in reactive ground. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. **283**: 314-320.
- RAMOS, V.; ESCAYOLA, M.; MUTTI, D. & VUJOVICH, G. 2000. Proterozoic-early Paleozoic ophiolites of the Andean basement of southern South America. Ophiolitic and Oceanic Crust: new insights from field studies and the Ocean Drilling Program. *Geological Society of America Special Paper*. Vol. **349**: 331-349.
- RAMOS, V.; JORDAN, T.; ALLMENDINGER, R.; MPODOZIS, C.; KAY, S.; CORTÉS, J. & PALMA, M. 1986. Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*. Vol. **5**, N° 6: 855-880.
- RIVANO, S.; GODOY, E.; VERGARA, M. & VILLARROEL, R. 1990. Redefinición de la formación farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32°-34°S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **17**, N° 2: 205-214. Santiago.
- RUMBALL, J. 1991. The interaction of partially weathered sulphides in the Mt McRae shale formation with ammonium nitrate. Thesis submitted to the School of Mathematical and Physical Sciences, Murdoch University. 363 pp. Perth.

- SERRANO, L.; VARGAS, R.; STAMBUK, V.; AGUILAR, C.; GALEB, M.; HOLMGREN, C.; CONTRERAS, A.; GODOY, S.; VELA, I.; SKEWES, M.A. & STERN, C.R. 1996. The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **5**, N° 9: 119-130.
- SKEWES, M.A. & STERN, C. 1994. Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology*. Vol. **22**, N° 6: 551-554.
- STRECKEISEN, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*. Vol. **12**, N° 1: 1-33.
- THIELE, R. 1980. Geología de la Hoja Santiago: Región Metropolitana, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile. N° 39: 51 pp. Santiago.
- TORO, J.C.; ORTUZAR, J.; ZAMORANO, J.; CUADRA, P.; HERMOSILLA, J. & SPRÖHNLE, C. 2012. Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco-Los Bronces district, Central Chile: development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **16**, N° 10: 105-126.
- TUNALEY, D. 1999. An emulsion explosive system for blasting in reactive volcanic conditions. Proceedings, Fragblast 1999. South African Institute of Mining and Metallurgy: 313-319. Johannesburg.
- TURCOTTE, R.; LIGHTFOOT, P.D.; FOUCHARD, R. & JONES, D.E.G. 2003. Thermal hazard assessment of AN and AN-based explosives. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. **101**, N° 1: 1-27.
- VARGAS, F. 2015. Estudio de mineralización y distribución de Ag en el sector Los Bronces del complejo porfídico Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 125 pp. Santiago.
- VERGARA, M. & DRAKE, R. 1979. Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales post neocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **34**, N° 1: 42-52. Buenos Aires.
- VERGARA, M.; MORATA, D.; HICKEY-VARGAS, R.; LOPEZ-ESCOBAR, L. & BECCAR, I. 1999. Cenozoic tholeiitic volcanism in the Colbún area, Linares Precordillera, central Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **26**, N° 1: 23-41. Santiago.
- VERGARA, M.; CHARRIER, R.; MUNIZAGA, F.; RIVANO, S.; SEPULVEDA, P.; THIELE, R. & DRAKE, R. 1988. Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31°30'S-34°35'S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**, N° 2: 199-209.

- WARNAARS, F.; HOLMGREN, C. & BARASSI, F. 1985. Porphyry Copper and Tourmaline Breccias at Los Bronces-Rio Blanco, Chile. *Economic Geology*. Vol. **80**, N° 6: 1.544-1.565.
- YAÑEZ, G.; CEMBRANO, J.; PARDO, M.; RANERO, C. & SELLES, D. 2002. The Challenger – Juan Fernández – Maipo major tectonic transition of the Nazca – Andean subduction system at 33°-34°S: geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15**, N° 1: 23-38.



## Anexos



# ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1. Información Básica de Muestras .....	86
2. Análisis Químico Multielemental .....	89
3. Descripción Macroscópica de Muestras .....	92
4. Descripción de Briquetas Pulidas .....	95



## Anexo 1: Información Básica de Muestras.

ID Muestra					UTM		Cota del Collar (m)	Largo	Fecha Perforación	Fecha Muestreo
Zona	Fase	Banco	Malla / Sondaje	Pozo / Tramo	Este	Norte				
1	INF05	3745	200	147	101.413,4	99.948,9	3.759,64	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	200	148	101.405,4	99.948,9	3.759,56	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	200	150	101.389,4	99.948,9	3.759,28	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	200	152	101.372,3	99.948,9	3.759,78	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	200	163	101.414,5	99.964,9	3.759,84	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	200	165	101.398,5	99.964,9	3.759,69	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	201	385	101.351,0	99.939,4	3.759,58	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	201	428	101.345,6	99.944,9	3.759,65	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	201	511	101.351,1	99.955,9	3.759,83	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	201	558	101.323,6	99.961,5	3.759,73	15	11-Jul	12-Jul
1	INF05	3745	206	168	101.312,7	99.877,5	3.758,94	15	1-Aug	3-Aug
1	INF05	3745	206	233	101.285,1	99.861,0	3.758,77	15	2-Aug	3-Aug
1	INF05	3745	209	196	101.145,4	99.668,7	3.760,28	15	27-Jul	2-Aug
1	INF05	3745	209	212	101.151,4	99.662,7	3.760,40	15	27-Jul	2-Aug
1	INF05	3745	209	247	101.145,4	99.650,7	3.760,71	15	27-Jul	2-Aug
1	INF05	3745	209	403	101.146,6	99.680,7	3.760,14	15	29-Jul	2-Aug
1	INF05	3745	209	405	101.146,1	99.638,7	3.760,77	15	27-Jul	2-Aug
1	INF05	3745	209	406	101.147,1	99.632,7	3.760,71	15	27-Jul	2-Aug
2	INF05	3760	318	118	101.195,9	99.584,8	3.774,39	15	20-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	318	120	101.184,9	99.584,9	3.774,38	15	20-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	318	121	101.179,4	99.584,9	3.774,38	15	20-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	116	101.206,5	99.529,8	3.773,82	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	117	101.201,0	99.529,8	3.773,86	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	118	101.195,5	99.529,8	3.773,83	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	119	101.190,0	99.529,9	3.773,79	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	120	101.184,5	99.529,9	3.773,76	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	121	101.179,0	99.529,9	3.773,74	15	19-Jun	20-Jun
2	INF05	3760	319	340	101.211,7	99.480,2	3.773,70	15	27-Jun	28-Jun
2	INF05	3760	319	342	101.200,7	99.480,3	3.773,52	15	27-Jun	28-Jun

Continuación de tabla anterior										
2	INF05	3760	319	344	101.189,7	99.480,4	3.773,33	15	27-Jun	28-Jun
3	CASINO	3310	103	118	100.405,7	99.013,0	3.324,56	15	8-Jul	8-Jul
3	CASINO	3310	103	146	100.387,6	99.029,5	3.324,78	15	8-Jul	8-Jul
3	CASINO	3310	103	148	100.405,6	99.029,0	3.324,67	15	8-Jul	8-Jul
3	CASINO	3310	103	151	100.432,6	99.028,1	3.324,94	15	5-Jul	6-Jul
3	CASINO	3310	103	617	100.388,9	99.004,5	3.324,44	15	8-Jul	9-Jul
3	CASINO	3310	103	622	100.432,6	99.012,1	3.325,07	15	8-Jul	8-Jul
3	CASINO	3325	263	134	100.693,3	99.152,7	3.339,76	15	8-Jul	9-Jul
3	CASINO	3325	263	138	100.708,9	99.115,9	3.339,63	15	7-Jul	8-Jul
3	CASINO	3325	263	213	100.665,2	99.141,9	3.339,68	15	7-Jul	7-Jul
3	CASINO	3310	LB170050	103-121	-	-	3.325,00	18	7-Jun	7-Jun
3	CASINO	3295	LB170050	121-139	-	-	3.310,00	18	7-Jun	7-Jun
3	CASINO	3310	LB170054	106-123	-	-	3.325,00	17	14-Jun	14-Jun
3	CASINO	3295	LB170054	123-140	-	-	3.310,00	17	14-Jun	14-Jun
4	CASINO	3295	140	101	100.298,0	99.324,3	3.310,20	15	14-Jul	14-Jul
4	CASINO	3295	140	102	100.305,2	99.329,8	3.309,97	15	14-Jul	14-Jul
4	CASINO	3295	140	103	100.312,3	99.335,2	3.309,96	15	13-Jul	14-Jul
4	CASINO	3295	140	110	100.311,0	99.324,2	3.310,18	15	14-Jul	14-Jul
4	CASINO	3295	141	107	100.243,1	99.285,2	3.310,39	15	13-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	110	100.265,2	99.300,7	3.310,58	15	12-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	111	100.272,4	99.306,1	3.310,76	15	13-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	113	100.285,0	99.315,7	3.310,48	15	13-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	121	100.246,9	99.279,3	3.310,36	15	13-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	124	100.269,1	99.294,8	3.310,48	15	12-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	125	100.276,2	99.300,2	3.310,62	15	13-Jul	13-Jul
4	CASINO	3295	141	127	100.290,2	99.310,9	3.310,47	15	13-Jul	13-Jul
5	INF7	3505	701	107	100.382,5	99.991,1	3.519,55	15	1-Aug	1-Aug
5	INF7	3505	701	123	100.392,6	99.993,3	3.519,85	15	1-Aug	1-Aug
5	INF7	3505	701	706	100.384,9	100.018,9	3.519,89	15	31-Jul	1-Aug
5	INF7	3505	701	707	100.383,1	100.012,2	3.519,68	15	31-Jul	1-Aug
5	INF7	3505	701	708	100.380,9	100.005,5	3.519,49	15	1-Aug	1-Aug
5	INF7	3505	701	709	100.378,7	99.998,8	3.519,33	15	1-Aug	1-Aug
5	INF7	3505	702	146	100.381,6	99.930,8	3.520,00	15	1-Aug	3-Aug

Continuación de tabla anterior										
5	INF7	3505	702	149	100.370,2	99.903,2	3.520,00	15	31-Jul	3-Aug
5	INF7	3505	702	722	100.348,1	99.913,4	3.520,00	15	1-Aug	3-Aug
5	INF7	3505	702	821	100.354,8	99.942,3	3.520,00	15	1-Aug	3-Aug
5	INF7	3505	702	824	100.350,8	99.929,4	3.520,00	15	1-Aug	3-Aug
5	INF7	3505	702	827	100.344,8	99.917,4	3.520,00	15	1-Aug	3-Aug
6	INF05	3775	241	138	101.259,9	98.944,1	3.790,29	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	140	101.256,7	98.924,4	3.790,45	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	142	101.253,5	98.904,7	3.790,36	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	203	101.242,2	98.947,0	3.790,29	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	239	101.230,1	98.928,7	3.790,05	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	274	101.218,0	98.910,4	3.789,63	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	298	101.223,5	99.000,7	3.789,37	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	300	101.220,3	98.981,0	3.789,84	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	334	101.208,2	98.962,7	3.789,60	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	424	101.188,0	99.006,5	3.788,80	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	426	101.185,2	98.986,3	3.788,97	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3775	241	458	101.183,5	98.998,5	3.789,04	15	6-Jul	7-Jul
6	INF05	3790	234	138	101.315,1	99.058,5	3.805,72	15	24-Jun	24-Jun
6	INF05	3790	234	140	101.312,4	99.042,3	3.805,43	15	22-Jun	23-Jun
6	INF05	3790	234	142	101.309,2	99.022,5	3.805,20	15	22-Jun	22-Jun
6	INF05	3790	241	152	101.293,0	98.923,9	3.805,60	15	27-Jun	2-Jul
6	INF05	3790	241	153	101.291,4	98.914,0	3.805,63	15	27-Jun	2-Jul
6	INF05	3790	241	155	101.288,2	98.894,2	3.805,69	15	27-Jun	2-Jul



## Anexo 2: Análisis Químico Multielemental.

Zona	ID Muestra	CuT	CuS	CuSCN	CuSFe	S	Sulfuro	Fe	FeT	As	Cl
		(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(% p/p)	(ppm)	(kg/ton)
1	3745-200-147	0,394	0,046	0,155	0,054	3,47	3,12	5,10	5,24	10	0,09
1	3745-200-148	0,444	0,067	0,220	0,079	3,94	3,62	5,87	6,33	13	0,11
1	3745-200-150	0,600	0,146	0,554	0,255	5,81	5,25	5,65	6,57	10	<0,01
1	3745-200-152	0,530	0,079	0,439	0,156	3,67	3,33	4,81	5,13	10	0,09
1	3745-200-163	0,576	0,087	0,403	0,154	3,10	2,77	4,37	4,70	10	0,06
1	3745-200-165	0,615	0,095	0,555	0,230	3,11	2,87	4,01	4,93	10	0,28
1	3745-201-385	0,923	0,176	0,855	0,349	4,53	4,04	6,39	6,53	57	0,23
1	3745-201-428	0,901	0,144	0,801	0,295	4,01	3,65	5,02	5,83	10	0,20
1	3745-201-511	0,633	0,120	0,419	0,154	5,16	4,86	5,42	6,32	12	0,17
1	3745-201-558	0,680	0,089	0,508	0,177	3,35	3,07	5,83	6,33	27	0,08
1	3745-206-168	1,288	0,385	0,659	0,396	1,54	1,27	7,17	7,48	213	0,07
1	3745-206-233	0,692	0,126	0,533	0,251	1,73	1,43	3,73	5,36	31	0,08
1	3745-209-196	0,620	0,121	0,541	0,276	2,01	1,08	3,28	4,00	39	0,02
1	3745-209-212	1,264	0,211	0,735	0,408	1,42	1,08	5,89	6,10	28	<0,01
1	3745-209-247	0,581	0,189	0,343	0,250	1,08	0,95	6,34	6,84	12	0,15
1	3745-209-403	1,038	0,350	0,649	0,431	3,31	2,33	5,98	6,55	50	<0,01
1	3745-209-405	1,055	0,179	0,413	0,263	2,14	1,10	6,92	7,59	103	0,15
1	3745-209-406	0,892	0,232	0,466	0,288	1,15	0,87	5,42	5,83	60	0,02
2	3760-318-118	0,899	0,101	0,567	0,248	1,69	1,46	7,39	7,41	20	0,04
2	3760-318-120	1,233	0,117	0,774	0,391	1,37	1,15	5,79	6,03	18	0,04
2	3760-318-121	0,802	0,136	0,597	0,307	1,01	0,77	5,93	6,03	16	0,04
2	3760-319-116	0,435	0,104	0,274	0,146	3,02	2,37	7,08	7,26	18	0,04
2	3760-319-117	0,951	0,092	0,477	0,179	2,43	1,93	6,36	6,49	15	0,05
2	3760-319-118	1,451	0,130	0,623	0,263	8,33	5,85	10,54	11,11	12	0,04
2	3760-319-119	0,900	0,099	0,535	0,243	1,48	1,28	5,94	6,58	14	0,03
2	3760-319-120	1,189	0,168	0,809	0,378	2,75	2,46	6,38	7,05	23	0,04
2	3760-319-121	1,326	0,227	0,799	0,410	3,78	3,19	8,17	8,60	31	0,04
2	3760-319-340	0,937	0,096	0,528	0,257	1,03	0,87	6,26	6,50	12	0,17
2	3760-319-342	1,064	0,101	0,608	0,273	1,29	0,97	6,74	7,08	25	0,03

Continuación de tabla anterior											
2	3760-319-344	1,007	0,107	0,517	0,253	1,70	1,10	7,07	7,71	35	0,07
3	3310-103-118	0,611	0,017	0,052	0,020	0,90	0,71	2,76	4,14	11	0,09
3	3310-103-146	0,616	0,025	0,116	0,040	0,71	0,59	1,32	1,83	14	0,09
3	3310-103-148	0,980	0,037	0,299	0,091	0,93	0,72	1,59	1,87	11	0,12
3	3310-103-151	1,312	0,026	0,070	0,032	2,20	0,68	3,27	4,21	12	0,08
3	3310-103-617	0,578	0,025	0,082	0,028	0,65	0,52	1,67	2,11	11	0,13
3	3310-103-622	1,088	0,039	0,203	0,068	1,16	1,03	1,75	2,05	12	0,47
3	3325-263-134	0,907	0,303	0,664	0,374	1,75	0,99	2,79	3,60	123	0,05
3	3325-263-138	0,954	0,266	0,443	0,310	1,28	0,73	2,19	3,08	59	0,16
3	3325-263-213	0,649	0,189	0,429	0,244	1,43	1,40	2,73	3,36	51	0,06
3	3310-LB170050-103-121	0,326	0,008	0,162	0,009	1,52	1,28	2,46	3,08	10	0,10
3	3295-LB170050-121-139	0,232	0,006	0,157	0,008	0,96	0,32	1,89	2,26	10	0,19
3	3310-LB170054-106-123	0,363	0,014	0,179	0,021	0,96	0,55	2,11	3,07	10	0,09
3	3295-LB170054-123-140	0,342	0,012	0,181	0,017	1,27	0,62	2,30	2,82	10	0,15
4	3295-140-101	0,617	0,064	0,165	0,090	1,17	0,91	1,64	2,04	91	0,18
4	3295-140-102	0,697	0,067	0,300	0,132	1,01	0,92	1,19	1,62	449	0,17
4	3295-140-103	0,623	0,049	0,151	0,067	0,98	0,89	1,43	1,87	193	0,11
4	3295-140-110	0,607	0,040	0,147	0,058	1,09	0,91	1,39	1,85	204	0,13
4	3295-141-107	1,440	0,097	0,350	0,119	3,09	2,73	3,53	4,05	607	0,07
4	3295-141-110	0,337	0,013	0,030	0,015	0,73	0,62	2,24	2,75	10	0,29
4	3295-141-111	0,388	0,019	0,052	0,020	1,33	1,06	2,60	3,07	53	0,17
4	3295-141-113	0,668	0,085	0,213	0,110	2,03	1,93	2,85	3,85	173	0,03
4	3295-141-121	0,963	0,151	0,292	0,179	2,46	2,13	3,46	3,94	10	0,27
4	3295-141-124	0,573	0,027	0,047	0,028	0,90	0,86	1,41	2,62	16	0,10
4	3295-141-125	0,410	0,017	0,039	0,019	0,92	0,87	2,53	2,86	10	0,09
4	3295-141-127	0,662	0,069	0,206	0,115	1,34	1,03	1,83	2,44	102	0,05
5	3505-701-107	0,636	0,301	0,181	0,319	0,69	0,60	2,87	4,82	92	0,22
5	3505-701-123	0,786	0,402	0,350	0,516	0,75	0,60	2,30	3,86	19	0,09
5	3505-701-706	0,052	0,020	0,029	0,027	0,27	0,15	4,35	11,61	67	0,12
5	3505-701-707	0,229	0,132	0,083	0,144	0,17	0,13	3,42	4,86	24	0,20
5	3505-701-708	0,154	0,092	0,055	0,080	0,10	0,10	3,65	4,35	10	0,10
5	3505-701-709	0,146	0,038	0,058	0,044	0,30	0,20	3,27	3,60	10	0,20
5	3505-702-146	0,141	0,044	0,057	0,048	0,48	0,45	3,82	4,01	15	0,12

Continuación de tabla anterior											
5	3505-702-149	0,179	0,050	0,075	0,061	0,64	0,33	4,77	5,69	21	0,18
5	3505-702-722	0,294	0,089	0,153	0,108	0,42	0,37	3,43	4,76	14	0,06
5	3505-702-821	0,276	0,040	0,103	0,049	0,56	0,45	6,02	6,44	20	0,08
5	3505-702-824	0,636	0,113	0,199	0,125	1,38	1,18	6,60	6,88	17	0,06
5	3505-702-827	0,305	0,112	0,168	0,122	0,55	0,49	3,87	5,68	17	0,23
6	3775-241-138	0,136	0,016	0,044	0,016	1,47	1,15	3,93	4,42	10	0,06
6	3775-241-140	0,128	0,006	0,019	0,004	2,31	2,06	4,47	5,27	12	0,05
6	3775-241-142	0,114	0,006	0,019	0,005	0,71	0,56	3,73	4,20	11	0,09
6	3775-241-203	0,196	0,045	0,107	0,054	2,96	2,71	3,69	5,18	17	0,05
6	3775-241-239	0,156	0,037	0,083	0,042	1,35	0,87	3,10	3,41	11	0,05
6	3775-241-274	0,313	0,055	0,136	0,062	3,71	2,47	4,41	4,84	22	0,06
6	3775-241-298	0,565	0,095	0,252	0,142	3,14	2,48	4,26	4,76	10	0,05
6	3775-241-300	0,336	0,047	0,118	0,049	1,44	1,16	3,94	4,58	41	0,06
6	3775-241-334	0,380	0,092	0,244	0,140	1,11	1,01	3,50	3,92	11	0,11
6	3775-241-424	1,002	0,189	0,407	0,266	1,94	1,82	4,55	5,14	13	0,04
6	3775-241-426	0,149	0,041	0,054	0,041	0,80	0,62	3,64	4,05	15	0,06
6	3775-241-458	0,483	0,233	0,237	0,230	1,31	1,03	3,79	4,64	15	0,05
6	3790-234-138	0,325	0,006	0,035	0,007	1,98	1,38	4,07	4,57	10	0,09
6	3790-234-140	0,193	0,008	0,020	0,006	0,86	0,81	3,28	3,46	10	0,22
6	3790-234-142	0,105	0,004	0,011	0,007	1,08	0,85	3,66	3,91	10	0,16
6	3790-241-152	0,100	0,003	0,014	0,003	1,11	0,77	4,20	4,46	15	0,10
6	3790-241-153	0,203	0,017	0,040	0,017	1,09	0,85	4,12	4,34	11	0,10
6	3790-241-155	0,079	0,006	0,015	0,004	0,70	0,59	3,21	3,44	10	0,11

### Anexo 3: Descripción Macroscópica de Muestras.

ID Muestra					Descripción Macroscópica					
Zona	Fase	Banco	Malla / Sondaje	Pozo / Tramo	Litología	LIM	ARC	OX CuT	ALT 1	
1	INF05	3745	200	147	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
1	INF05	3745	200	148	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	200	150	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
1	INF05	3745	200	152	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	200	163	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
1	INF05	3745	200	165	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
1	INF05	3745	201	385	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Moderada
1	INF05	3745	201	428	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Moderada
1	INF05	3745	201	511	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
1	INF05	3745	201	558	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	206	168	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Moderada
1	INF05	3745	206	233	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	196	Brecha Infiernillo	Moderada	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	212	Brecha Infiernillo	Débil	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	247	Brecha Infiernillo	Moderada	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	403	Brecha Infiernillo	Moderada	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	405	Brecha Infiernillo	Débil	SIN	Cha	QS	Débil
1	INF05	3745	209	406	Brecha Infiernillo	Débil	SIN	Cha	QS	Débil
2	INF05	3760	318	118	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	318	120	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	318	121	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	116	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	117	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	118	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	119	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	120	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	121	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	340	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	342	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
2	INF05	3760	319	344	Brecha Infiernillo	SIN	SIN	SIN	QS	Débil

Continuación de tabla anterior										
3	CASINO	3310	103	118	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	103	146	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	103	148	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	103	151	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	103	617	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	103	622	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3325	263	134	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	Cha	QS	Débil
3	CASINO	3325	263	138	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3325	263	213	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	Cha	QS	Débil
3	CASINO	3310	LB170050	103-121	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3295	LB170050	121-139	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	SIN	QS	Débil
3	CASINO	3310	LB170054	106-123	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	SIN	QS	Moderada
3	CASINO	3295	LB170054	123-140	Cuarzo Monzonita	Débil	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	140	101	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
4	CASINO	3295	140	102	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
4	CASINO	3295	140	103	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
4	CASINO	3295	140	110	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
4	CASINO	3295	141	107	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	110	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	111	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	113	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	121	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	124	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Moderada
4	CASINO	3295	141	125	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
4	CASINO	3295	141	127	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	701	107	Brecha Central	Moderada	Débil	Cha	QS	Débil
5	INF7	3505	701	123	Brecha Central	Moderada	Débil	Cha	QS	Débil
5	INF7	3505	701	706	Brecha Occidental	Débil	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	701	707	Brecha Central	Débil	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	701	708	Brecha Central	Débil	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	701	709	Brecha Occidental	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	702	146	Brecha Central	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	702	149	Brecha Central	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil

Continuación de tabla anterior										
5	INF7	3505	702	722	Brecha Central	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	702	821	Brecha Central	Moderada	Débil	Cha	QS	Débil
5	INF7	3505	702	824	Brecha Central	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil
5	INF7	3505	702	827	Brecha Central	Moderada	Débil	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	138	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	140	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	142	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	203	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	239	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	274	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	298	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	300	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	334	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	424	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	426	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3775	241	458	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	234	138	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	234	140	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	234	142	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	241	152	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	241	153	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil
6	INF05	3790	241	155	Cuarzo Monzonita	SIN	SIN	SIN	QS	Débil

LIM = Limonitas; ARC = Arcillas; OX CuT = Oxidados de Cobre; Cha = Crisocola/Chalcantita; ALT 1 = Alteración Primaria;  
 QS = Cuarzo Sericita.

## Anexo 4: Descripción de Briquetas Pulidas.

ID Muestra			Descripción Briquetas (% p/p)																	
Zona	Fase	Pozo	Py	Cpy	Cc	Cv	Bn	Spe	Mag	Mo	Ten	Eng	Esf	Cu	Rt	Cup	Del	Lm	Cu Ox	Gn
1	INF05	3745-200-147	2,51	0,89	0,10	0,01	0,00	1,10	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	95,12
1	INF05	3745-200-148	3,73	1,00	0,10	0,03	0,00	1,17	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	93,81
1	INF05	3745-200-150	4,60	0,69	0,44	0,07	0,00	0,31	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	93,86
1	INF05	3745-200-152	1,96	0,50	0,39	0,14	0,00	0,90	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	96,03
1	INF05	3745-200-163	3,44	0,62	0,43	0,09	0,00	0,69	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	94,62
1	INF05	3745-200-165	4,23	0,61	0,49	0,06	0,00	0,85	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	93,64
1	INF05	3745-201-385	4,67	1,03	0,69	0,07	0,00	2,25	0,11	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	91,11
1	INF05	3745-201-428	3,79	1,12	0,64	0,05	0,00	2,20	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	92,17
1	INF05	3745-201-511	5,14	0,72	0,46	0,05	0,00	1,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	92,55
1	INF05	3745-201-558	2,15	0,74	0,45	0,12	0,00	0,99	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	95,43
1	INF05	3745-206-168	2,10	0,66	0,49	0,13	0,00	1,14	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	95,32
1	INF05	3745-206-233	1,16	0,74	0,41	0,08	0,00	1,28	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	96,25
1	INF05	3745-209-196	0,90	1,87	0,75	0,03	0,00	0,10	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,15	0,00	95,99
1	INF05	3745-209-212	1,39	1,12	0,21	0,04	0,00	0,07	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,02	0,04	0,00	96,73
1	INF05	3745-209-247	1,40	1,84	0,36	0,17	0,00	0,54	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,03	0,00	95,58
1	INF05	3745-209-403	3,49	1,53	0,58	0,08	0,00	0,25	0,36	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,09	0,00	93,54
1	INF05	3745-209-405	0,34	1,55	0,33	0,12	0,00	0,11	0,25	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,00	0,10	0,00	97,06
1	INF05	3745-209-406	0,64	2,38	0,47	0,09	0,01	0,48	0,17	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,36	0,00	95,31
2	INF05	3760-318-118	0,83	0,72	0,62	0,12	0,01	1,07	1,32	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,02	0,00	95,04
2	INF05	3760-318-120	0,62	1,00	1,00	0,00	0,01	0,33	1,21	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,02	0,00	95,28
2	INF05	3760-318-121	0,55	0,52	0,65	0,01	0,00	0,51	1,36	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	96,03
2	INF05	3760-319-116	2,75	0,46	0,26	0,00	0,00	0,07	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00	95,60
2	INF05	3760-319-117	1,36	1,37	0,43	0,06	0,00	0,23	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,02	0,00	95,35
2	INF05	3760-319-118	4,40	2,04	0,76	0,07	0,00	1,19	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	90,92
2	INF05	3760-319-119	0,53	1,06	0,58	0,02	0,00	0,32	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	96,43
2	INF05	3760-319-120	1,29	1,03	0,82	0,08	0,00	0,91	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,01	0,03	0,00	95,16
2	INF05	3760-319-121	1,80	1,31	0,86	0,04	0,00	1,98	0,35	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,02	0,00	93,45
2	INF05	3760-319-340	0,40	1,14	0,61	0,00	0,00	0,61	1,24	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,02	0,00	95,67
2	INF05	3760-319-342	0,40	1,24	0,68	0,04	0,00	1,70	0,73	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00	95,02
2	INF05	3760-319-344	0,66	1,36	0,57	0,01	0,00	0,69	1,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,01	0,00	95,38

## Continuación de tabla anterior

3	CASINO	3310-103-118	0,12	1,68	0,00	0,00	0,03	1,51	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,01	0,00	96,51
3	CASINO	3310-103-146	0,07	1,49	0,01	0,00	0,12	0,12	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,01	0,00	98,02
3	CASINO	3310-103-148	0,08	2,32	0,00	0,00	0,24	0,21	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,02	0,00	96,89
3	CASINO	3310-103-151	0,71	3,64	0,00	0,01	0,05	0,85	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,03	0,00	94,52
3	CASINO	3310-103-617	0,18	1,52	0,00	0,00	0,06	0,17	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,01	0,00	97,73
3	CASINO	3310-103-622	0,10	2,64	0,00	0,01	0,23	0,07	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,02	0,00	96,75
3	CASINO	3325-263-134	1,43	0,69	0,32	0,26	0,02	1,00	0,17	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,20	0,01	0,05	0,08	0,00	95,74
3	CASINO	3325-263-138	0,76	1,02	0,55	0,03	0,02	0,77	0,08	0,01	0,00	0,04	0,00	0,06	0,30	0,00	0,32	0,16	0,00	95,88
3	CASINO	3325-263-213	1,06	0,63	0,16	0,22	0,00	0,75	0,25	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,21	0,00	0,03	0,03	0,00	96,63
3	CASINO	3310-LB170050-103-121	1,13	0,93	0,00	0,00	0,00	0,18	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	97,43
3	CASINO	3295-LB170050-121-139	0,92	0,58	0,00	0,00	0,05	0,27	0,24	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	97,89
3	CASINO	3310-LB170054-106-123	0,14	1,00	0,00	0,00	0,03	0,71	0,05	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,02	0,00	97,84
3	CASINO	3295-LB170054-123-140	0,17	0,98	0,00	0,00	0,01	0,15	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	98,43
4	CASINO	3295-140-101	0,62	1,62	0,06	0,00	0,00	0,02	0,05	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,00	0,01	0,13	0,00	97,39
4	CASINO	3295-140-102	0,67	1,49	0,18	0,00	0,00	0,22	0,07	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,16	0,00	0,00	0,14	0,00	97,01
4	CASINO	3295-140-103	0,63	1,55	0,09	0,00	0,00	0,04	0,01	0,06	0,00	0,03	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,09	0,00	97,40
4	CASINO	3295-140-110	1,84	1,62	0,05	0,00	0,00	0,14	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,07	0,00	96,08
4	CASINO	3295-141-107	2,99	3,78	0,13	0,00	0,00	0,41	0,05	0,02	0,00	0,05	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,06	0,00	92,33
4	CASINO	3295-141-110	0,92	0,93	0,01	0,01	0,00	0,21	0,38	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,06	0,00	97,38
4	CASINO	3295-141-111	1,32	1,10	0,01	0,00	0,00	0,19	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,02	0,00	97,00
4	CASINO	3295-141-113	3,27	1,62	0,11	0,00	0,00	0,12	0,18	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,07	0,00	94,54
4	CASINO	3295-141-121	4,09	2,65	0,06	0,00	0,00	0,14	0,32	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,10	0,00	92,57
4	CASINO	3295-141-124	1,23	1,63	0,01	0,00	0,00	0,19	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,07	0,00	96,51
4	CASINO	3295-141-125	0,64	0,95	0,07	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,14	0,00	0,00	0,15	0,00	97,96
4	CASINO	3295-141-127	1,12	1,91	0,00	0,00	0,00	0,12	0,38	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,18	0,00	96,22
5	INF7A	3505-701-107	1,41	0,61	0,06	0,01	0,00	0,42	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,04	0,38	0,54	0,35	96,11
5	INF7A	3505-701-123	1,08	1,78	0,13	0,00	0,01	0,61	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	0,09	0,15	0,03	96,01
5	INF7A	3505-701-706	0,33	0,12	0,00	0,01	0,01	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,71	0,00	94,06
5	INF7A	3505-701-707	0,14	0,57	0,00	0,02	0,01	1,02	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,02	0,13	0,00	97,56
5	INF7A	3505-701-708	0,02	0,39	0,01	0,00	0,00	0,37	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,11	0,02	98,81
5	INF7A	3505-701-709	0,41	0,32	0,02	0,01	0,00	0,34	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,38	0,03	97,96



Continuación de tabla anterior																				
5	INF7A	3505-702-146	0,66	0,32	0,04	0,00	0,00	0,48	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,14	0,00	97,95
5	INF7A	3505-702-149	0,55	0,40	0,03	0,01	0,00	0,76	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,02	0,44	0,00	96,72
5	INF7A	3505-702-722	0,38	0,66	0,05	0,02	0,00	1,48	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,03	0,38	0,00	96,86
5	INF7A	3505-702-821	0,27	0,64	0,04	0,02	0,01	1,33	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,35	0,00	97,27
5	INF7A	3505-702-824	1,66	1,44	0,14	0,04	0,00	1,76	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,30	0,00	94,44
5	INF7A	3505-702-827	0,43	0,65	0,05	0,06	0,00	0,44	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,37	0,00	97,73
6	INF05	3775-241-138	1,19	0,28	0,03	0,00	0,00	0,50	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,04	0,00	97,42
6	INF05	3775-241-140	1,07	0,34	0,01	0,00	0,00	0,56	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,01	0,00	97,79
6	INF05	3775-241-142	0,62	0,30	0,01	0,00	0,00	0,54	0,18	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,04	0,00	98,16
6	INF05	3775-241-203	2,61	0,29	0,07	0,01	0,00	1,49	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,04	0,00	95,24
6	INF05	3775-241-239	1,28	0,26	0,05	0,01	0,00	0,04	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,02	0,00	97,63
6	INF05	3775-241-274	3,33	0,61	0,07	0,01	0,00	0,23	0,28	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	95,28
6	INF05	3775-241-298	2,54	0,90	0,26	0,00	0,00	0,74	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,01	0,04	0,00	95,06
6	INF05	3775-241-300	1,46	0,73	0,07	0,00	0,00	0,62	0,69	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,01	0,00	96,09
6	INF05	3775-241-334	1,01	0,34	0,24	0,02	0,00	0,23	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,01	0,04	0,00	97,13
6	INF05	3775-241-424	1,27	1,71	0,39	0,01	0,00	0,63	0,29	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,32	0,01	0,10	0,02	0,00	95,23
6	INF05	3775-241-426	0,78	0,29	0,03	0,01	0,00	1,76	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,01	0,00	0,02	0,00	96,58
6	INF05	3775-241-458	1,79	0,52	0,25	0,01	0,00	1,63	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,02	0,12	0,04	0,00	95,10
6	INF05	3790-234-138	1,25	0,93	0,00	0,00	0,00	0,32	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,01	0,00	97,07
6	INF05	3790-234-140	0,91	0,55	0,00	0,00	0,00	0,07	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,01	0,00	98,02
6	INF05	3790-234-142	0,77	0,30	0,00	0,00	0,00	0,07	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,02	0,00	98,28
6	INF05	3790-241-152	0,75	0,29	0,00	0,00	0,00	0,63	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,01	0,00	97,69
6	INF05	3790-241-153	0,98	0,53	0,01	0,00	0,00	0,55	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00	97,22
6	INF05	3790-241-155	0,79	0,22	0,00	0,00	0,00	0,10	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,05	0,00	98,21
Py = Pirita; Cpy = Calcopirita; Cc = Calcocina; Cv = Covelina; Bn = Bornita; Spe = Especularita/Hematita; Mag = Magnetita; Mo = Molibdenita; Ten = Tennantita; Eng = Enargita; Esf = Blenda; Cu = Cobre nativo; Rt = Rutilo; Cup = Cuprita; Del = Delafosita; Lm = Limonita; Cu Ox = Óxidos de Cobre; Gn = Ganga.																				