



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



**CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES QUÍMICAS Y
ESPECTRALES CON EL COMPORTAMIENTO
METALÚRGICO EN EL YACIMIENTO ESCONDIDA, REGIÓN
DE ANTOFAGASTA, CHILE**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Joaquín Alberto Copaja Thielemann

Profesor Patrocinante : Dr. Osvaldo Miguel Rabbia Dalmaso

Profesional Guía : Msc. Marcelo Joaquín Cortés López

Profesores Comisión : Msc. Abraham Elías González Martínez

Dr. Oscar Alfonso Jerez Riveros

Concepción, 2018

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. <i>Objetivo General</i>	1
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	1
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS	1
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	3
1.3.1. <i>Bases de datos</i>	3
1.3.2. <i>Métodos Analíticos</i>	4
1.3.2.1. ICP-MS	4
1.3.2.2. NIR	5
1.3.2.3. Pruebas Metalúrgicas.....	6
1.3.1. <i>Análisis Estadísticos</i>	7
1.4. TRABAJOS ANTERIORES	7
1.5. AGRADECIMIENTOS	9
2. MARCO GEOLÓGICO	10
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.2. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL.....	11
2.2.1. <i>Generalidades</i>	11
2.2.2. <i>Rocas Estratificadas</i>	11
2.2.2.1. Formación La Tabla.....	11
2.2.2.2. Formación El Profeta	11
2.2.2.3. Formación Santa Ana	12
2.2.2.4. Formación Augusta Victoria.....	12
2.2.2.5. Formación Pampa de Mulas	13
2.2.2.6. Depósitos no Consolidados.....	13
2.2.3. <i>Rocas Intrusivas</i>	13
2.2.3.1. Paleozoico.....	13
2.2.3.2. Mesozoico.....	13
2.2.3.3. Cenozoico	14
2.2.4. <i>Marco Tectónico Distrital</i>	14
2.3. MARCO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO ESCONDIDA	17
2.3.1. <i>Generalidades</i>	17
2.3.2. <i>Litología</i>	17
2.3.2.1. Andesitas.....	17
2.3.2.2. Pórfido Feldespático	18
2.3.2.3. Pórfido Feldespático Tardío	18
2.3.2.4. Pórfido Cuarzífero	19
2.3.2.5. Unidad de Brechas	19
2.3.2.6. Gravas	19
2.3.3. <i>Alteración</i>	21

2.3.3.1. Evento Hidrotermal Temprano	21
2.3.3.2. Evento Hidrotermal Transicional	22
2.3.3.3. Evento Hidrotermal Principal	22
2.3.3.4. Evento Hidrotermal Tardío	22
2.3.4. <i>Mineralización</i>	24
2.3.4.1. Zona Lixiviada	25
2.3.4.2. Zona Oxidada	26
2.3.4.3. Zona de Mixtos	26
2.3.4.4. Zona de Parcial Lixiviado	26
2.3.4.5. Zona de Enriquecimiento Secundario	26
2.3.4.6. Zona Primaria	27
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	29
3.1. INTRODUCCIÓN	29
3.2. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	29
3.2.1. <i>Generalidades</i>	29
3.2.1. <i>Interpretación de Score Plot</i>	30
3.2.1. <i>Interpretación de Loading Plot</i>	31
3.3. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE	33
3.4. ANÁLISIS DE <i>BOXPLOTS</i>	33
4. CONTEXTO METALÚRGICO Y GEOMETALÚRGICO	34
4.1. PROCESO PRODUCTIVO DE MINERA ESCONDIDA	34
4.1.1. <i>Generalidades</i>	34
4.1.2. <i>Proceso de Concentración</i>	35
4.1.2.1. Etapa de Molienda	36
4.1.2.2. Etapa de Flotación	37
4.2. COMPORTAMIENTO METALÚRGICO	38
4.2.1. <i>Generalidades</i>	38
4.2.2. <i>Variables Geometalúrgicas</i>	38
4.2.2.1. Recuperación	38
4.2.2.2. SPI (<i>SAG Power Index</i>)	39
4.2.3. <i>Influencia de la geología sobre el proceso metalúrgico</i>	39
4.2.3.1. Efecto de la litología sobre la recuperación	39
4.2.3.2. Efecto de la alteración sobre la recuperación	40
4.2.3.3. Efecto de la litología sobre el mSPI	41
4.2.3.4. Efecto de la alteración sobre el mSPI	43
5. CORRELACIÓN ENTRE DATOS DE ICP Y VARIABLES GEOMETALÚRGICAS	
5.1. INTRODUCCIÓN	44
5.2. BASES DE DATOS	44
5.3. ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN	45
5.3.1. <i>Análisis de Componentes Principales (ACP)</i>	45
5.3.1.1. ACP: Definición de Poblaciones	45
5.3.1.2. ACP: <i>Score Plot</i>	46
5.3.1.3. ACP: <i>Loading Plot</i>	48

5.3.2. <i>Análisis de Boxplots</i>	49
5.3.2.1. <i>Boxplots de Rendimiento</i>	49
5.3.2.2. <i>Dominios de Recuperación</i>	51
5.3.2.3. <i>Litio (Li)</i>	51
5.3.2.3. <i>Continuidad espacial de los dominios de recuperación</i>	55
5.4. <i>ANÁLISIS DEL MODIFIED SAG POWER INDEX (MSPI)</i>	57
5.4.1. <i>Análisis de Componentes Principales (ACP)</i>	57
5.4.1.1. <i>ACP: Definición de Poblaciones</i>	57
5.4.1.2. <i>ACP: Score Plot</i>	58
5.4.1.3. <i>ACP: Loading Plot</i>	59
5.4.2. <i>Análisis de Boxplots</i>	61
5.4.2.1. <i>Calcio (Ca)</i>	61
5.4.2.2. <i>Continuidad espacial de los dominios de mSPI</i>	63
6. CORRELACIÓN ENTRE DATOS NIR Y VARIABLES GEOMETALÚRGICAS	
6.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	66
6.2. <i>BASES DE DATOS</i>	66
6.3. <i>FACTOR ALTERACIÓN</i>	67
6.3.1. <i>ACP: Score Plot</i>	67
6.3.2. <i>ACP: Loading Plot</i>	68
6.4. <i>ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN</i>	70
6.4.1. <i>Análisis de Componentes Principales (ACP)</i>	70
6.4.1.1. <i>ACP: Definición de Poblaciones</i>	70
6.4.1.1. <i>ACP: Score Plot</i>	71
6.4.1.1. <i>ACP: Loading Plot</i>	72
6.4.2. <i>Análisis de Boxplots</i>	73
6.4.2.1. <i>Clorita (Chl)</i>	73
6.4.2.2. <i>Continuidad espacial de los dominios de recuperación</i>	75
6.5. <i>ANÁLISIS DEL MODIFIED SAG POWER INDEX (MSPI)</i>	77
6.5.1. <i>Análisis de Componentes Principales (ACP)</i>	77
6.5.1.1. <i>ACP: Definición de Poblaciones</i>	77
6.5.1.2. <i>ACP: Score Plot</i>	78
6.5.1.3. <i>ACP: Loading Plot</i>	79
6.5.2. <i>Análisis de Boxplots</i>	81
6.5.2.1. <i>Clorita (Chl)</i>	81
6.5.2.2. <i>Continuidad espacial de los dominios de mSPI</i>	84
6.6. <i>OTRAS APLICACIONES: CASO DE ARCILLAS</i>	86
6.6.1. <i>Generalidades</i>	86
6.6.2. <i>Velocidad de Sedimentación</i>	88
6.6.3. <i>Efecto del contenido de arcillas sobre la velocidad de sedimentación</i> ...	89
7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	91
8. REFERENCIAS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos al distrito Escondida	2
1. 2. Porcentaje de digestión por agua regia de especies minerales.....	5
2. 1. Distribución de Franjas Metalogénicas del Norte Grande de Chile	10
2. 2. Mapa geológico simplificado del Distrito Escondida	15
2. 3. Mapa geológico del Distrito Escondida	16
2. 4. Mapa litológico de superficie del rajo Escondida.....	20
2. 5. Sección esquemática de perfil A-A' (108.800 N) para alteraciones del rajo Escondida.....	20
2. 6. Mapa de alteraciones de superficie del rajo Escondida	23
2. 7. Sección esquemática de perfil A-A' (108.800 N) para las alteraciones del rajo Escondida.....	23
2. 8. Esquema resumen del perfil vertical generado por el proceso de enriquecimiento secundario en el yacimiento Escondida	25
2. 9. Mapa de zonas mineralógicas en la superficie del rajo Escondida	28
2.10. Sección esquemática de perfil A-A' (108.000) N para las zonas mineralógicas del rajo Escondida	28
3. 1. Ejemplo de <i>Score Plot</i>	31
3. 2. Ejemplo de <i>Loading Plot</i>	32
3. 3. Ejemplo de <i>Boxplot</i>	34
4. 1. Esquema de los procesos productivos de Minera Escondida.....	35
4. 2. Diagrama del Proceso de Concentración en Minera Escondida	36
4. 3. <i>Boxplot</i> recuperación versus litologías de Escondida.....	40
4. 4. <i>Boxplot</i> recuperación versus alteraciones de Escondida.....	41
4. 5. <i>Boxplot</i> mSPI versus litologías de Escondida.....	42
4. 6. <i>Boxplot</i> mSPI versus alteraciones de Escondida	43
5. 1. Gráfico Probabilístico de la variable Rec30	45
5. 2. <i>Score Plot</i> ICP filtrado por poblaciones de recuperación	46
5. 3. <i>Loading Plot</i> ICP	48
5. 4. <i>Boxplot</i> de rendimiento tomando como ejemplo el elemento aluminio ...	50
5. 5. <i>Boxplot</i> de rendimiento del elemento litio	52
5. 6. <i>Boxplot</i> de rendimiento de litio, ampliando últimos deciles.....	53
5. 7. <i>Boxplot</i> de rendimiento de litio considerando deciles intermedios	54
5. 8. Distribución espacial de dominios de recuperación a la altura de la cota 2.750.....	55
5. 9. Vistas en planta a la cota 2.750 de los dominios de recuperación versus modelo geológico de litología y alteración del rajo Escondida	56
5.10. Gráfico Probabilístico de variable mSPI.....	58
5.11. <i>Score Plot</i> ICP filtrado por poblaciones de mSPI.....	59
5.12. <i>Loading Plot</i> ICP	60
5.13. <i>Boxplot</i> de rendimiento calcio	61
5.14. <i>Boxplot</i> de rendimiento de calcio, ampliando últimos 4 deciles.....	62
5.15. Distribución espacial de los dominios de mSPI, a la altura de la cota 2.750.....	64

5.16.	Vistas en planta de los dominios de mSPI a la altura de la cota 2.750 versus modelo de bloques de litología y alteración del rajo Escondida ..	64
6. 1.	<i>Score Plot</i> NIR filtrado por alteraciones principales	68
6. 2.	<i>Loading Plot</i> NIR.....	69
6. 3.	Gráfico Probabilístico de la variable r_fls	70
6. 4.	<i>Score Plot</i> NIR filtrado por poblaciones de recuperación	71
6. 5.	<i>Loading Plot</i> NIR.....	72
6. 6.	<i>Boxplot</i> de rendimiento de clorita	73
6. 7.	<i>Boxplot</i> de rendimiento clorita, ampliando últimos deciles.....	74
6. 8.	Distribución Espacial dominios de Recuperación a partir de la variable clorita a la altura de la cota 2.750	76
6. 9.	Vistas en planta de los dominios de recuperación a partir de clorita versus modelo geológico de litología y alteración del rajo Escondida.....	77
6.10.	Gráfico Probabilístico de variable mSPI.....	78
6.11.	<i>Score Plot</i> NIR, filtrado por poblaciones de mSPI.....	79
6.12.	<i>Loading Plot</i> NIR.....	80
6.13.	<i>Boxplot</i> de rendimiento de clorita para variable mSPI	81
6.14.	<i>Boxplot</i> de rendimiento de clorita para variable mSPI, ampliando últimos deciles	82
6.15.	<i>Boxplot</i> de rendimiento de clorita para variable mSPI, ampliando deciles intermedios.....	83
6.16.	Distribución espacial de dominios de mSPI definidos a partir de la variable Clorita a la altura de la cota 2.750	85
6.17.	Vistas en planta de los dominios de mSPI a partir de Clorita versus modelo geológico de litología y alteración del rajo Escondida	85
6.18.	<i>Boxplots</i> de rendimiento de recuperación (izq.) y mSPI (der.) para la variable arcillas	86
6.19.	Recuperación de Cu versus contenido porcentual de cada especie arcillosa analizada.....	87
6.20.	<i>Boxplot</i> de rendimiento de arcillas para la variable velocidad de sedimentación	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1. 1.	Número de datos y soporte de los análisis considerados	3
5. 1.	Poblaciones de recuperación definidas para interpretación de ACP	45
5. 2.	Matriz de correlación de Pearson para variable Rec30 y elementos químicos.....	48
5. 3.	Deciles de aluminio y sus respectivos rangos porcentuales.....	49
5. 4.	Deciles ampliados de litio y sus respectivos rangos en ppm	53
5. 5.	Deciles intermedios de litio con sus respectivos rangos en ppm	54
5. 6.	Dominios de Recuperación a partir del elemento litio.....	55
5. 7.	Poblaciones de mSPI definidas para interpretación de ACP	58

5. 8.	Matriz de correlación de Pearson para variable mSPI y elementos químicos.....	60
5. 9.	Deciles de Calcio con sus respectivos rangos porcentuales.....	62
5.10.	Dominios de mSPI a partir del elemento calcio.....	63
6. 1.	Poblaciones de recuperación definidos para interpretación de ACP	70
6. 2.	Matriz de correlación de Pearson entre variables NIR y variable r_fls	73
6. 3.	Deciles ampliados de Clorita y sus respectivos rangos porcentuales	74
6. 4.	Dominios de Recuperación a partir de la variable clorita (Chl)	75
6. 5.	Poblaciones de recuperación definidas para interpretación de ACP	78
6. 6.	Matriz de correlación de Pearson entre variables NIR y variable r_fls	80
6. 7.	Deciles ampliados de clorita y sus respectivos rangos porcentuales	82
6. 8.	Deciles intermedios ampliados de clorita y sus respectivos rangos porcentuales	83
6. 9.	Dominios de mSPI a partir de la variable clorita	84
6.10.	Yacimientos y especies arcillosas consideradas en el estudio	85
6.11.	Deciles de arcillas y sus respectivos rangos porcentuales	90



RESUMEN

Actualmente, la mayoría de las faenas mineras en operación utilizan métodos cualitativos para la captura de parámetros geológicos desde frentes de mapeo o sondajes. Si bien la metodología de mapeo ha demostrado ser útil y apropiada para tal fin, en algunos casos ésta no es del todo certera y puede ser subjetiva dependiendo de la experiencia del geólogo a cargo. En una industria minera cada vez más exigente, se hace relevante el poder aumentar la confiabilidad de los parámetros geológicos que conforman la primera parte del proceso productivo mediante la aplicación de métodos cuantitativos como complemento a la caracterización cualitativa. En ese sentido, esta memoria de título busca evaluar el potencial de utilizar datos químicos y espectrales, obtenidos desde muestras de sondajes mediante los métodos ICP y NIR respectivamente, como variables independientes para la predicción del comportamiento metalúrgico durante el proceso de concentración de cobre de Minera Escondida.

Para facilitar el procesamiento de los datos, se utilizaron técnicas estadísticas multivariantes tales como Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Correlación Múltiple (ACM) que permitieron acotar el número de variables utilizadas y orientar el estudio hacia aquellas más relevantes para la investigación. Mediante estas técnicas se logró determinar los elementos químicos y minerales de alteración que mayor correlación presentan con las variables de recuperación de cobre y mSPI (*modified SAG Power Index*), obtenidas desde pruebas metalúrgicas de flotación y molienda respectivamente. Para cuantificar de forma global el efecto de estos elementos y minerales sobre cada uno de estos procesos, se realizó un análisis univariable mediante diagramas de caja que facilitó la definición de dominios de rendimiento metalúrgico, los cuales permitieron caracterizar zonas del rajo Escondida según su comportamiento metalúrgico esperado.

En lo que a las variables químicas se refiere, se determinó que en el rajo Escondida los elementos Al, Li, Mg, Ga, V, Be, Y, P y Sc se encuentran altamente correlacionados entre sí y se asocian a bajos porcentajes de recuperación de cobre durante el proceso de flotación. Dentro de ellos, el Li mostró un comportamiento idóneo para la definición de dominios de recuperación. Por su parte, el índice mSPI del proceso de molienda mostró una baja correlación con los elementos químicos, sin embargo el Ca demostró un buen comportamiento para la definición de dominios de mSPI. La distribución espacial de los dominios de recuperación y mSPI en el rajo, permite relacionar las zonas de bajo rendimiento metalúrgico con parámetros geológicos tales como litología y alteración, en particular con las andesitas y las alteraciones sericita-clorita-arcillas y biotítica.

En lo referente a minerales de alteración, la clorita mostró ser un mineral de ganga altamente nocivo tanto para el proceso de molienda como de flotación, pues altos contenidos de este filosilicato se relacionan con bajos rendimientos de ambos procesos. Los dominios de recuperación y mSPI definidos a partir de este mineral mostraron una correlación espacial con aquellos definidos para los elementos químicos, indicando nuevamente a las andesitas y las alteraciones antes mencionadas como las más perjudiciales para el proceso productivo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Analizar correlación entre variables químicas y espectrales, obtenidas desde muestras de sondajes, con el comportamiento metalúrgico del mineral alimentado a planta concentradora en los procesos de molienda y flotación.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar variables químicas y espectrales que presenten mayor correlación con el comportamiento metalúrgico en los procesos de molienda y flotación.
- Cuantificar el efecto de variables químicas y espectrales sobre el proceso metalúrgico.
- Definir dominios de rendimiento metalúrgico a partir de variables químicas y espectrales para caracterizar zonas del rajo Escondida según su comportamiento metalúrgico esperado.

1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

El distrito minero Escondida es un sistema de yacimientos tipo pórfido cuprífero que se ubica a 145 km al SE de la ciudad de Antofagasta, Región de Antofagasta, Chile (Figura 1.1). El distrito se emplaza en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko, a una altitud promedio de 3.150 m s.n.m.

Para acceder desde Antofagasta, se debe tomar la salida S de esta ciudad, conocida como Avenida La Minería, y recorrer 16 km en dirección al E hasta interceptar la Ruta 5 Norte. Desde ahí, se debe seguir la ruta B-475, asfaltada y en buen estado, por la cual se recorren aproximadamente 130 km en dirección SE hasta llegar a las dependencias de la Compañía Minera Escondida Limitada (MEL).

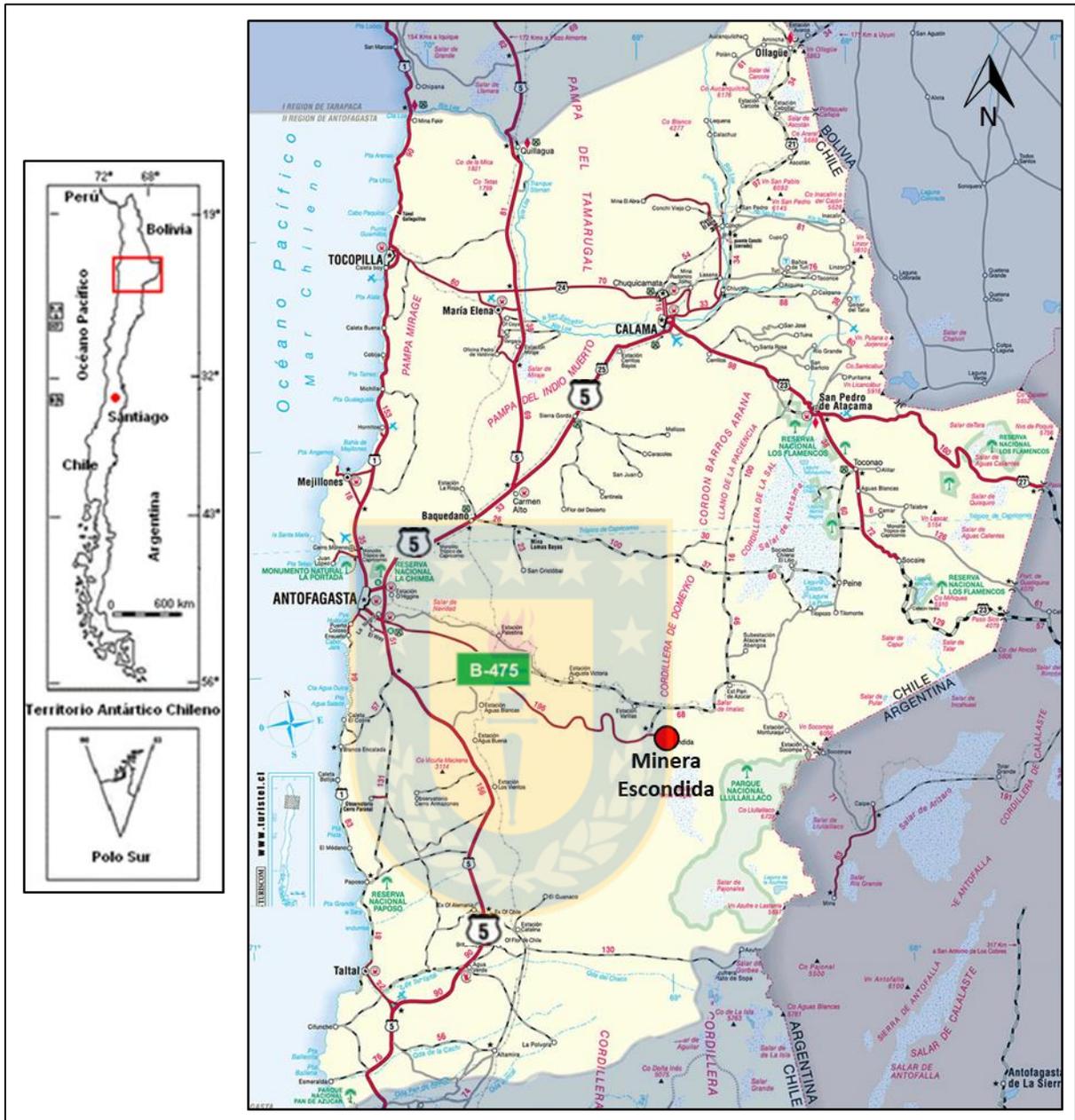


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos a Minera Escondida.

1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.3.1. Bases de Datos

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron las bases de datos de sondajes analizados por espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado (ICP-MS, por sus siglas en inglés) y espectrometría de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), así como también datos de pruebas metalúrgicas del yacimiento Escondida.

La base de datos ICP-MS cuenta con más de 47.000 registros, correspondientes a compósitos de muestras de sondajes en un soporte de 15 metros, con información de 50 elementos químicos analizados de acuerdo a los procedimientos de análisis químicos de Minera Escondida.

La base de datos NIR cuenta con aproximadamente 40.000 registros, correspondientes a compósitos de sondajes de 15 metros, analizados por espectrometría de infrarrojo cercano. Cada registro presenta una estimación porcentual de la abundancia de los minerales de alteración albita, alunita, biotita, clorita, sericita gris-verde, sericita-muscovita y arcillas (caolín, pirofilita y esmectita).

La base de datos de pruebas metalúrgicas contiene la información de más de 6.000 pruebas metalúrgicas realizadas en el rajo Escondida, efectuadas en muestras de sondajes en un soporte de 15 metros. Cada registro incluye los resultados de las pruebas de flotación y molienda, de donde se obtienen las variables geometalúrgicas Recuperación y SPI (*SAG Power Index*) respectivamente (tabla 1.1).

Tabla 1.1 : Número de datos y soporte de los análisis considerados en la investigación

Análisis	Registros	Soporte
ICP – MS	47.000	15 m
NIR	40.000	15 m
Pruebas Metalúrgicas	6.000	15 m

Las bases de datos ICP y NIR se compilan por separado con la base de datos de pruebas metalúrgicas, con el objetivo de analizar la correlación entre los datos de cada método analítico y las variables geometalúrgicas de interés.

1.3.2. Métodos Analíticos

1.3.2.1. Espectrometría de Masas por Inducción de Plasma (ICP-MS)

La espectrometría de masas por inducción de plasma (ICP-MS o ICP) es un método analítico a partir del cual es posible detectar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica considerando límites de detección bajos y precisiones correctas. Otra de sus ventajas es que los elementos son medidos de forma simultánea con tiempos de análisis cercanos a los 2 minutos por muestra (Rollinson, 1993).

Para el análisis por ICP, la muestra debe ser puesta en solución para luego ser expuesta a un plasma, lo que provoca la ionización de los átomos. Los átomos pasan a través de un cuadrupolo, que se consigue aplicando potenciales constantes y alternos a cuatro barras conductoras, el cual separa las distintas masas por diferencias de voltaje, las que son finalmente recogidas y medidas por un espectrómetro de masas.

En Minera Escondida, el procedimiento para el análisis mediante ICP considera la medición en pulpas compositadas a 14 y 16 metros que son preparadas mecánicamente y divididas hasta obtener una muestra representativa de 0,25 g, la cual es puesta en solución a través de un ataque ácido por agua regia. La particularidad del ataque por este reactivo es que corresponde a una digestión parcial, debido a que el agua regia no es capaz de romper el tetraedro de silicio, el cual constituye la estructura fundamental de los silicatos. Así, la digestión por agua regia sólo afecta a ciertas fases minerales, resaltando la presencia de grupos minerales como sulfuros, carbonatos y algunas micas por sobre los silicatos, acotando de esta forma las posibles fuentes de los elementos y resaltando el factor litológico por sobre la alteración. Otra de las ventajas del agua regia es que retiene elementos como el As, Hg, S y Sb, los cuales se volatizan fácilmente al utilizar ácidos más fuertes (Cárdenas, 2015).

Church y otros (1987) realizaron un estudio comparando los resultados obtenidos por disolución parcial por agua regia con la disolución total por 3 ácidos (HF-HNO₃-HClO₄). La disolución por agua regia es total, o cercana a la total, para los sulfuros, carbonatos y ciertos óxidos, mientras que minerales como piroxenos, anfíboles, muscovitas y feldespatos alcalinos prácticamente no son afectados (figura 1.2).

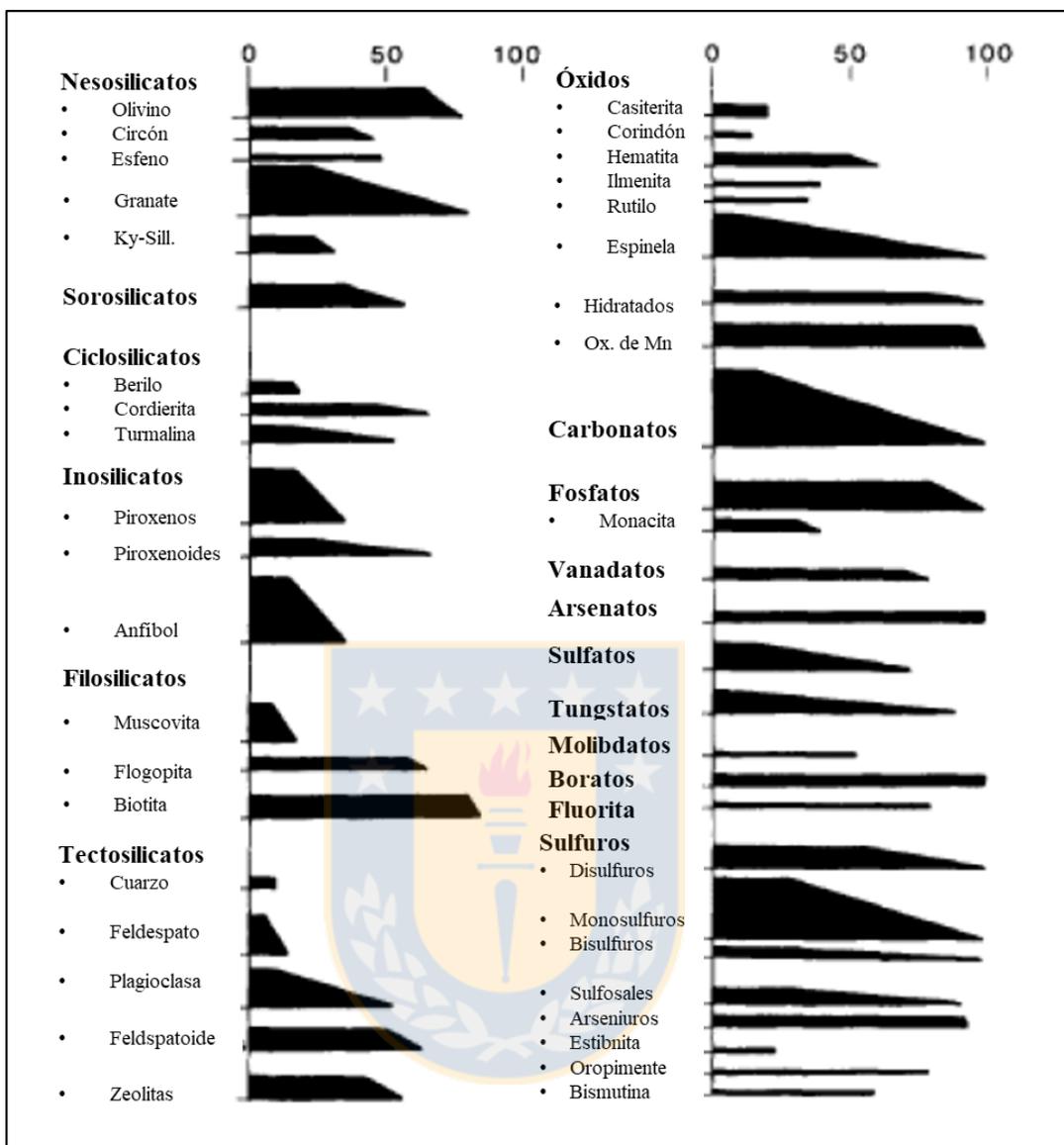


Figura 1.2 : Porcentaje de digestión por agua regia de especies minerales. Grosor de las barras indican cantidad de muestras utilizadas en el estudio. Modificado de Church y otros (1987).

1.3.2.2. Espectrometría de Infrarrojo Cercano (NIR)

La espectrometría de infrarrojo cercano (NIR), es un método analítico semi-cuantitativo capaz de medir de forma rápida y sencilla ciertos minerales de alteración. Su fundamento radica en el hecho de que los minerales tienen respuestas específicas al incidir radiación electromagnética sobre ellos. Así, de acuerdo a su composición, los minerales pueden absorber y reflejar de manera selectiva ciertas longitudes de onda del espectro del infrarrojo cercano (450 – 4.000 nm), lo que

permite estimar semi-cuantitativamente la abundancia porcentual de un mineral en una muestra determinada por correlación con un modelo quimiométrico calibrado con anterioridad.

En Minera Escondida, los modelos quimiométricos se han ido construyendo y robusteciendo mediante la utilización de una fórmula de regresión por mínimos cuadrados que relacionan cada concentración como función de la reflectancia del mineral (Menacho, 2014). Un modelo quimiométrico robusto y calibrado correctamente, supone una predicción muy cercana al valor real de la abundancia porcentual del mineral analizado en la muestra, siendo los minerales biotita, clorita, caolín y sericita aquellos que presentan los modelos más robustos en la actualidad y, por lo tanto, los que son considerados para este estudio.

En Minera Escondida, el análisis NIR se realiza con el instrumento *LabSpec* y el procedimiento considera la pulverización de la muestra bajo los 150 micrones, hasta obtener una pulpa homogeneizada. Una pequeña porción representativa de la muestra pulverizada es colocada y comprimida en un portamuestra, con tal de no dejar espacios vacíos, la cual es introducida y medida en el instrumento. El espectro obtenido es finalmente comparado con el modelo quimiométrico predictivo, lo cual permite obtener una estimación semi-cuantitativa de la concentración porcentual de un mineral en la muestra analizada (Menacho, 2014).

1.3.2.3. Pruebas Metalúrgicas

Los datos metalúrgicos utilizados en este estudio se obtienen a partir de pruebas metalúrgicas, las cuales constituyen la base del modelamiento geometalúrgico. Son pruebas realizadas en laboratorio y su objetivo es predecir, con el mayor grado de certeza posible, el comportamiento del mineral en el proceso metalúrgico. Se realizan en muestras de sondajes donde se caracterizan diversas variables metalúrgicas, tales como Índice de Chancado, SPI (*Sag Power Index*), BWI (*Bond Work Index*), Recuperación *Rougher* y Velocidad de Sedimentación. Las variables escogidas para realizar esta investigación corresponden al porcentaje de Recuperación *Rougher* y el índice SPI, los cuales son parámetros determinantes para la predicción del rendimiento de los procesos de flotación y molienda respectivamente.

1.3.3. Análisis Estadísticos

Con la información de las bases de datos compiladas, se realizaron análisis estadísticos para analizar la correlación entre las variables metalúrgicas y los datos químicos y espectrales. En primer lugar, se realizó un análisis multivariable, mediante la técnica estadística denominada Análisis de Componentes Principales (ACP), con el objetivo de reducir el número de variables relevantes para el estudio e identificar patrones y tendencias de interés en los datos. Una vez acotadas las variables de interés, se realizó un Análisis de Correlación Múltiple para determinar aquellas variables que presentaran mayores coeficientes de correlación con las variables metalúrgicas. Luego, se realizó un análisis univariable a través de *boxplots*, con el fin de cuantificar de forma global el efecto de ciertas variables químicas y espectrales sobre el proceso metalúrgico. A partir de los resultados obtenidos, se definieron dominios de rendimiento metalúrgico que permitieron caracterizar distintas zonas del rajo Escondida según su comportamiento metalúrgico esperado. La información de las bases de datos se procesó mediante el *software Excel* y los análisis estadísticos se realizaron en el *software Minitab 17*, mientras que la definición y representación de dominios se realizó con la ayuda del *software Vulcan 9.2*.

1.4. TRABAJOS ANTERIORES

Las publicaciones referidas a la utilización de datos ICP y NIR como variables para la predicción del comportamiento metalúrgico en el yacimiento Escondida son escasas. El antecedente más reciente que se tiene corresponde a un reporte interno de **Preece (2016)** en el cual el autor realiza modelos de regresión y análisis discriminantes con el objetivo de predecir índices de recuperación y dureza a partir de variables ICP y NIR, obteniendo relaciones estadísticas significativas para la recuperación pero débiles para la dureza. A continuación se presenta una breve compilación de los principales estudios geológicos realizados en el distrito Escondida.

Perelló (1983) realiza una actualización de la geología de Escondida.

Véliz y Padilla (1997) estudian las estructuras del yacimiento Escondida, y establecen una caracterización geométrica que permitió definir cinco sistemas estructurales principales.

Richards y otros (1999) efectúan una revisión y compilación de la información geológica del distrito Escondida. A partir de dataciones radiométricas del área realizan una reconstrucción de

la evolución magmática en el distrito y estiman las edades de los eventos de intrusión magmática y alteración hidrotermal.

Richards y otros (2001) realizan una actualización de la evolución geológica del distrito Escondida, elaborando un modelo para la localización espacial y temporal de la mineralización de Cu.

Padilla y otros (2001) hacen un estudio geológico-estructural de Escondida, en el cual investigan la evolución tectónica y las condiciones estructurales que favorecieron el emplazamiento del pórfido Escondida. Caracterizan la evolución magmática-hidrotermal del yacimiento, definiendo tres fases hidrotermales principales y la ocurrencia de tres pulsos intrusivos.

Véliz (2004) presenta una descripción de la geología de Escondida, con énfasis en la descripción de un sistema epitermal de alta sulfidación sobrepuesto al sistema porfídico.

Maureira (2009) elabora un modelamiento probabilístico de la zona mineralógica oxidada en el depósito Escondida.

Townley y otros (2012) en un reporte interno para Minera Escondida, analizan el comportamiento y distribución de algunos elementos con el objetivo de generar variables sintéticas que permitieron definir alteraciones hidrotermales a partir de elementos químicos.

Hervé y otros (2012), realizan una actualización de la información geológica del distrito Escondida, incluyendo antecedentes de Escondida Este, y de la evolución hidrotermal y tectónica del distrito.

Menacho (2014), mediante datos NIR estudia la distribución de los minerales caolinita y sericita y analiza su relación con variables geometalúrgicas de dureza en el rajo Escondida Norte.

Cárdenas (2015), hace una caracterización geoquímica y mineralógica de las alteraciones hidrotermales de Escondida, presentando un algoritmo de clasificación para predecir la ocurrencia de alteraciones hidrotermales a partir de datos químicos ICP.

Cortés (2015), separa las principales unidades de rocas presentes en el rajo Escondida utilizando elementos químicos obtenidos por ICP como discriminadores entre litologías.

1.5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo. En primer lugar, a Minera Escondida por darme la oportunidad de desarrollar esta memoria de título y en especial a Marcelo Cortés, mi tutor y líder excepcional durante mi estadía en la compañía. Agradezco también a todos mis compañeros de oficina, a Andrés Salazar, Ramiro Gálvez, Gloria Bizama, William Collado, Ricardo Zuluaga, Leonardo Retamal, Julie Pérez, Pamela Contreras, Susana Magri, Fernanda Alvarado y Gerardo Palma, por la buena onda y aportes que contribuyeron al desarrollo de mi investigación. A los asistentes Fabián Espina, Cristián Catalán, Arturo Salazar y Roberto Rojo por la simpatía y disposición a ayudarme cada vez que lo requerí. Agradezco también a los equipos de Estimación de Recursos y Geometalurgia, en particular a los señores Luis Soto y Rodrigo Maureira, por las recomendaciones y ayuda prestada en la etapa final de la investigación.

Mis sinceros agradecimientos a todo el personal académico de la Universidad de Concepción con los que compartí durante los 6 años de carrera, en particular al profesor Osvaldo Rabbia por su disposición para ser patrocinante de esta memoria de título y por aportar con su conocimiento en la revisión del presente documento. A Carolina Rojas y María Esperanza Aravena, mi gratitud por la simpatía, gentileza y buena disposición para ayudarme en todos los trámites que requerí en esta etapa final.

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo constante durante toda mi carrera. A mis amados padres Beatriz y Daniel, pilares fundamentales durante toda mi vida y educación, y a mis queridos hermanos Ignacio, Constanza y Esteban por todo el cariño que me han entregado.

Finalmente quiero agradecer a Sofía, mi fiel compañera durante estos últimos años y parte importantísima en este período de mi vida. Gracias por estar siempre presente y apoyarme en todo lo que me propongo.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. INTRODUCCIÓN

El distrito Escondida es un sistema de yacimientos tipo pórfido cuprífero, perteneciente a la franja metalogénica del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior (figura 2.1), que se ubica en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko (Hervé y otros, 2012). Corresponde a un depósito con enriquecimiento secundario y mineralización primaria relacionada genéticamente a un complejo intrusivo, de composición monzonita a granodiorita, en intrusión con rocas volcánicas y cuerpos subvolcánicos (Véliz y Camacho, 2003). Cubriendo el depósito se encuentra una potente capa de gravas aluviales y coluviales modernas, de 200 m de espesor.

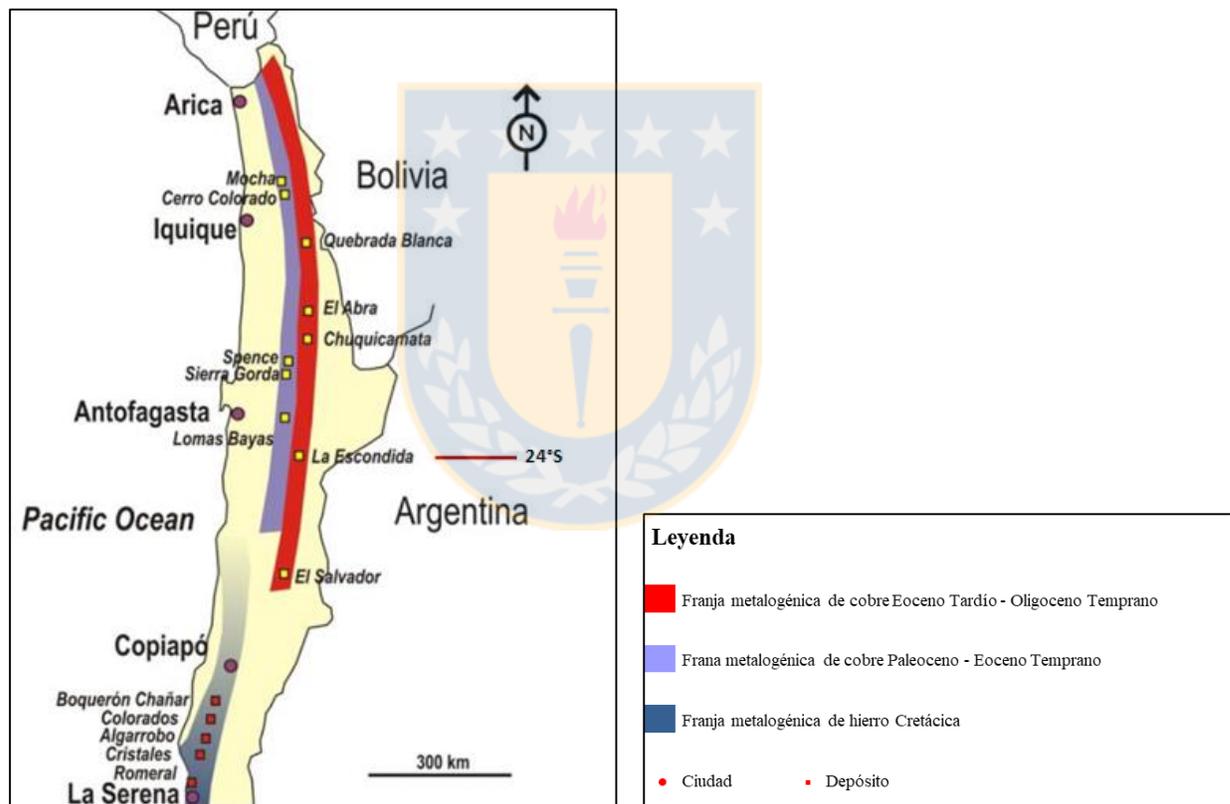


Figura 2.1 : Distribución de Franjas metalogénicas del Norte Grande de Chile. Modificado de Oyarzún y Lillo (2012).

2.2. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL

2.2.1. Generalidades

El distrito Escondida se encuentra inserto en un ambiente tectónico de subducción, dominado por rocas volcánicas e ígneas. En el entorno del depósito se reconocen unidades sedimentarias, volcano-sedimentarias e intrusivas que denotan un amplio rango de edades, abarcando desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. El distrito se encuentra controlado por un dominio estructural N-S, asociado al Sistema de Fallas de Domeyko (SFCD), que favoreció el emplazamiento de los pórfidos mineralizadores.

2.2.2. Rocas Estratificadas

2.2.2.1. Formación La Tabla

Definida por García (1967) como una secuencia continental bimodal, constituida por una sucesión de rocas volcánicas silíceas que corresponden a las rocas más antiguas identificadas en el área y constituyen el basamento del distrito. Se distribuyen por la parte oriental del distrito, principalmente en altos topográficos respecto de la cobertura cenozoica con un evidente control estructural a través de las fallas regionales que limitan los segmentos de la Cordillera de Domeyko. Las secuencias se constituyen de rocas riolíticas, brechas y aglomerados andesíticos a basálticos, con intercalaciones de tobas riolíticas a dacíticas y volcarenitas. Marinovic y otros (1995) estiman una potencia total de 800 a 1.000 m para esta formación.

Se asigna a la formación La Tabla una edad Carbonífero Superior – Pérmico, la cual se encuentra bien determinada por 20 dataciones U-Pb en circones, realizadas tanto en las rocas andesíticas como riolíticas que entregan un rango de edad ~300 – 288 Ma (Richards y otros, 1999; Urzúa, 2009).

2.2.2.2. Formación El Profeta

Definida por Chong (1973) como una secuencia de rocas sedimentarias marinas y continentales intercaladas con rocas volcánicas que se distribuye en una franja discontinua por todo el margen occidental del distrito. Subyace en conformidad a la formación Santa Ana. Las rocas de esta formación corresponden a calizas, lutitas, margas, conglomerados y areniscas marinas

fosilíferas carbonatadas, además de intercalaciones de yeso, anhidrita y horizontes de baritina (Chong, 1973). No se tiene registro de la potencia estimada de esta formación.

A partir del amplio registro fosilífero de las secuencias clásticas y calcáreas de esta formación, Chong (1973) determina una edad comprendida entre el Triásico Superior (Rético) y el Jurásico Superior (Kimmeridgiano).

2.2.2.3. Formación Santa Ana

Definida por Naranjo y Puig (1984) como una delgada unidad clástica marina continental que se distribuye en una angosta franja discontinua de orientación NS por el margen occidental del distrito. Sobreyace en concordancia a la Formación El Profeta.

Corresponde a una secuencia de rocas constituida por lavas, tobas, brechas y aglomerados volcánicos de colores grisáceos, y cuya composición litológica varía desde basáltica a riolítica (Naranjo y Puig, 1984). No se tiene registro de la potencia estimada de esta formación. A partir de su registro fosilífero, se ha determinado una edad Jurásico Superior – Neocomiano (Naranjo y Puig, 1984).

2.2.2.4. Formación Augusta Victoria

Definida por García (1967) como una secuencia volcano-sedimentaria que aflora en los alrededores de la Estación Augusta Victoria del Ferrocarril Antofagasta – Salta. Corresponde a la roca caja del distrito Escondida y se distribuye en una franja discontinua por su mitad occidental, sobreyaciendo en inconformidad las formaciones anteriores (Hervé y otros, 2012).

Compuesta principalmente por andesitas de piroxeno, andesitas basálticas de olivino y piroxeno, tobas, brechas dacíticas a riolíticas y areniscas volcanoclásticas. No se tiene registro de la potencia estimada de esta formación. Marinovic y otros (1995) asignan a esta formación una edad Cretácico Superior – Eoceno, determinada mediante dataciones radiométrica K-Ar que arrojaron valores entre $66,6 \pm 2,2$ y $41,2 \pm 2,2$ Ma. Urzúa (2009) determina una edad más acotada de ~58-53 Ma mediante dataciones U-Pb.

2.2.2.5. Formación Pampa de Mulas

Definida por Chong (1973) como una secuencia sedimentaria siliciclástica cuya depositación se asocia a remociones en masa, producto de un fuerte alzamiento y subsecuente erosión de la cordillera de Domeyko. Cubre en discordancia angular a las formaciones Augusta Victoria, Santa Ana, y El Profeta e infrayace a los sedimentos aluviales y coluviales antiguos y modernos (Marinovic y otros, 1995).

Está representada por una secuencia de conglomerados y brechas polimícticas, mal consolidadas y pobremente estratificadas de hasta 240 m de espesor (Hervé y otros, 2012). Marinovic y otros (1995) y Urzúa (2009) asignan esta formación al intervalo Oligoceno – Mioceno Medio, según dataciones realizadas en tobas en horizontes de caída sobreyaientes, que arrojaron valores entre $8,7 \pm 0,4$ y $4,2 \pm 0,2$ Ma respectivamente.

2.2.2.6. Depósitos No Consolidados

Corresponden a depósitos aluviales y coluviales del Mioceno Superior – Plioceno, que corresponden a gravas pobremente estratificadas con lentes de arenas, limos e intercalaciones de cenizas. Se reconocen además depósitos coluviales y aluviales modernos compuestos por gravas, arenas y limos que cubren gran parte del distrito.

2.2.3. Rocas Intrusivas

2.2.3.1. Paleozoico

Las rocas intrusivas más antiguas reconocidas en el distrito corresponden a granitoides del Carbonífero – Pérmico, cuyas edades fluctúan entre los 300 y 282 Ma, determinadas por dataciones U-Pb en circones (Richards y otros, 1999).

2.2.3.2. Mesozoico

La actividad intrusiva a comienzos del Mesozoico es reducida y poco documentada. Durante el Cretácico Superior se inicia una deformación compresiva que dio origen a un fuerte plegamiento de las secuencias volcansedimentarias y una significativa actividad magmática a lo largo de la vertiente occidental de la Cordillera de Domeyko (Richards, 2001). A nivel distrital, esta actividad magmática derivó en el emplazamiento de stocks y diques de gabros alcalinos asociados con dioritas, monzonitas y granitos de edades U-Pb $\sim 77-72$ Ma, que se reconocen al SW

del distrito. La significancia geotectónica de estos complejos es incierta pero se sospecha de un contexto de tras-arco (Hervé y otros, 2012).

2.2.3.3. Cenozoico

Durante el Eoceno Medio – Oligoceno Inferior la actividad intrusiva dio origen a los complejos epizonales asociados a la formación del mega-depósito Escondida. Las rocas intrusivas más antiguas de este período corresponden a dioritas y monzodioritas que constituyen los pulsos precursores de las intrusiones mineralizadoras (Hervé y otros, 2012). La mayoría de estas rocas se emplazaron entre los ~43-41 Ma (Urzúa, 2009), en forma de stocks en la zona noroeste del distrito, así como también en forma de pequeños cuerpos intrusivos distribuidos entre Chimborazo y Pampa Escondida, y en las cercanías de Escondida Este y Baker (Hervé y otros, 2012).

Entre los 38 – 34,5 Ma se emplaza el complejo mineralizador del distrito Escondida (Hervé y otros, 2012), correspondiente a una serie de pulsos intrusivos de composición granodiorítica a dacítica de textura porfídica, que intruyeron las rocas volcánicas de la Formación Augusta Victoria (Véliz, 2004). A los 34 Ma ocurre la intrusión de un pórfido riolítico en Escondida Este, composicionalmente más evolucionado que los pulsos anteriores y reconocido como el último evento intrusivo acaecido en el distrito (Hervé y otros, 2012).

2.2.4. Marco Tectónico Distrital

El distrito Escondida se encuentra inserto en el lente de cizalle llamado Escondida – Sierra de Varas, perteneciente al Sistema de Fallas de Domeyko (Mpodozis y otros, 1993). Este sistema se extiende por más de 1.000 km, desde Collahuasi por el norte hasta el valle del Río Copiapó por el sur, y ha sido dividido en 5 segmentos que denotan características estructurales distintivas (Mpodozis y otros, 1993).

El distrito Escondida se ubica en el cuarto segmento, denominado Caracoles – Punta Negra, que corresponde a una ancha franja compuesta por una serie de fallas sinuosas y anastomosadas y se encuentra relacionado con una importante componente transpresiva ocurrida durante el Eoceno Tardío – Oligoceno a lo largo de sus principales fallas (Mpodozis y otros, 1993). Según Mpodozis y otros (1993), este segmento está limitado por dos fallas de carácter regional asociadas al Sistema de Falla de Domeyko: la Falla Sierra de Varas al W y la Falla Escondida -

Salar de Punta Negra, al E (figura 2.2). La primera de ellas correspondería a la falla maestra de más de 150 km de extensión a lo largo del borde oriental, con una fuerte concavidad hacia el este; mientras que la segunda, es una estructura maestra del SFCD, extendiéndose por cerca de 300 km a lo largo de la Cordillera de Domeyko, donde constituye el límite occidental de Sierra de Varas (Mpodozis y otros, 1993).

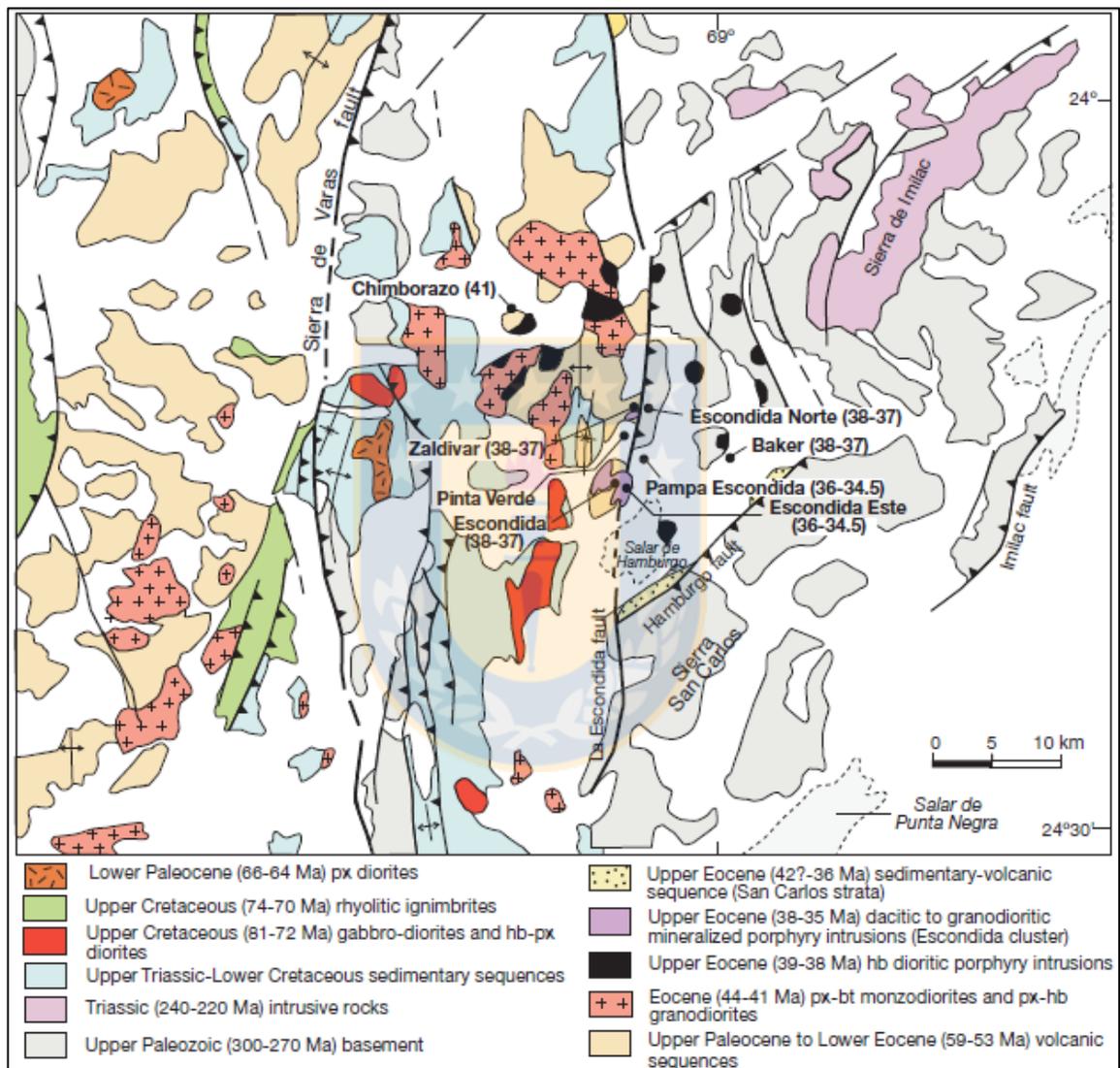


Figura 2.2 : Mapa geológico simplificado del Distrito Escondida, destacando fallas mayores (Sierra de Varas y Escondida) y fases intrusivas. Obtenido de Mpodozis y Cornejo (2012).

En la figura 2.2 se presenta un mapa geológico simplificado destacando los principales rasgos tectónicos mencionados anteriormente y en la figura 2.3 un mapa geológico, que muestra la distribución de las principales formaciones y unidades de roca en el Distrito Escondida.

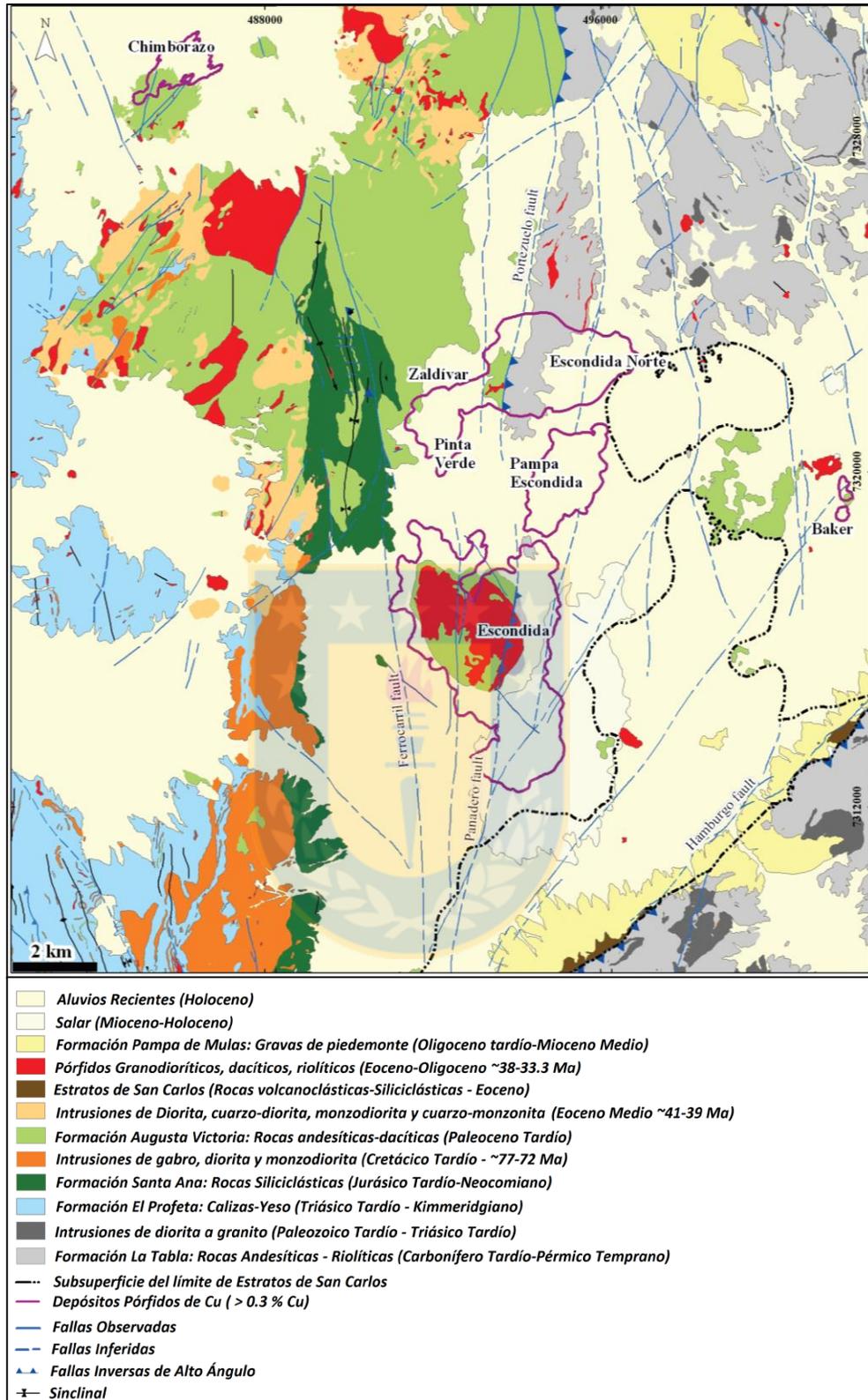


Figura 2.3 : Mapa geológico del distrito Escondida. Modificado de Hervé y otros (2012).

2.3. MARCO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO ESCONDIDA

2.3.1. Generalidades

El yacimiento Escondida es un depósito tipo pórfido cuprífero con desarrollo de enriquecimiento secundario y una mineralización primaria relacionada genéticamente a un complejo intrusivo.

El rajo está constituido principalmente por rocas intrusivas sub-volcánicas de composición monzodiorítica a granodiorítica, definidas por Véliz (2004) como Complejo Feldespático Escondida (CIFE) cuya edad de intrusión es de $37,9 \pm 0.2$ Ma (Richard y otros, 1999). El complejo intruye rocas volcánicas de la Formación Augusta Victoria, de edad Cretácico Superior – Eoceno, que se distribuyen principalmente por los sectores N y SW de la mina.

Los procesos de intrusión generaron una serie de eventos de alteración hidrotermal que aportaron la mineralización primaria e imprimieron en el yacimiento una zonación característica de sistemas tipo pórfidos cupríferos. Un evento de alteración supérgena, acaecido durante el Mioceno (Hervé y otros, 2012) generó el enriquecimiento secundario del depósito. La mineralogía de mena principal está representada por un gran volumen de calcosina y covelina que se distribuye en la zona supérgena o secundaria, mientras que la mineralización hipógena se caracteriza por la presencia de las asociaciones de calcopirita, bornita, pirita, molibdenita y magnetita, distribuidas mayoritariamente en finas vetillas y en menor proporción en forma diseminada.

Las siguientes descripciones de las unidades presentes en el yacimiento Escondida están referidas a las unidades que actualmente afloran en el rajo.

2.3.2. Litología

2.3.2.1. Andesitas

Corresponden a lavas de composición andesítica pertenecientes a la Formación Augusta Victoria, de edad Cretácico Superior – Eoceno, entre las que se distinguen andesitas afaníticas, microporfídicas y brechas volcánicas. Constituyen la roca caja del depósito y afloran principalmente por los sectores N, W y SW del rajo.

Son rocas con textura porfídica de color verde oliva, gris oscuro y pardo claro, dependiendo de la alteración, que presentan fenocristales de plagioclasa (10%-25%) de 2 mm y

máficos de anfíbol y biotita inmersos en una masa fundamental afanítica (Geología de Minas, 2015).

2.3.2.2. *Pórfido Feldespático (Complejo Intrusivo Feldespático Escondida)*

Definido como una serie de pulsos intrusivos de composiciones monzodioríticas, granodioríticas a dacíticas de textura porfídica, que pertenecen a un mismo sistema debido a similitudes texturales y cercanía entre ellos (Véliz, 2004). Es la principal unidad litológica de Escondida, cubriendo aproximadamente el 60% del rajo y distribuyéndose por la parte central de éste. A esta unidad se relacionan los procesos de alteración hidrotermal y de mineralización primaria del depósito, por lo que se encuentra en gran parte afectado por una alteración hidrotermal pervasiva que, en muchos casos, oblitera la textura original. El complejo intruye a las andesitas y es cortado por cuerpos de brecha hidrotermal y por diques de composición dacítica (Véliz, 2004).

Son rocas con textura porfídica seriada que exhiben fenocristales de plagioclasa subhedrales a euhedrales de 0,5 – 7 mm de tamaño que comprenden entre 40-60% del volumen total de la roca. Presentan fenocristales de biotita de <3 mm de tamaño que representan ente el 3 al 5% del volumen total y fenocristales de cuarzo euhedrales subredondeados que representan el 15% del volumen total de la roca aproximadamente. La masa fundamental es cristalina y de composición felsofídica (Geología de Minas, 2015).

2.3.2.3. *Pórfido Feldespático Tardío*

Corresponde a una unidad intrusiva de textura porfídica que aflora principalmente en el sector NW del rajo, aumentando su volumen en profundidad. Es una roca de composición granodiorítica a monzodiorítica, caracterizada por presentar una textura inequigranular porfídica con fenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita, hornblenda y cuarzo. Su masa fundamental se compone por un intercrecimiento de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo (Geología de Minas, 2015). Este cuerpo es posterior al Pórfido Feldespático y, en comparación a éste, presenta menor mineralización y se encuentra menos afectado por alteraciones hidrotermales pervasivas.

2.3.2.4. *Pórfido Cuarcifero*

Es un cuerpo intrusivo de textura porfídica y composición equivalente a una riodacita. Cubre aproximadamente el 10% del área total de la mina y presenta una forma elongada con

orientación NS, aflorando en la Pared Este del rajo actual. De acuerdo a observaciones de terreno, esta unidad intruye al Pórfido Feldespático y al Pórfido Feldespático Tardío y se encuentra en contacto por intrusión y falla con las andesitas.

Esta unidad se caracteriza presentar una textura porfídica seriada y sus rocas muestran un color gris claro a blanco. Presenta fenocristales de plagioclasa con tamaños variables entre 0,5 mm y 4 mm, además de cristales de cuarzo cuyos tamaños alcanzan los 3 mm, generalmente exhibiendo un evidente embahiamiento y fracturamiento. Se caracteriza por una escasa presencia de máficos, los que comúnmente corresponden a cristales de biotita decolorados. La masa fundamental es fanerítica fina de color gris claro, constituida por feldespato y cuarzo.

2.3.2.5. Unidad de Brechas

Corresponden a cuerpos menores que cortan a las anteriores litologías, aflorando principalmente por el sector E del rajo. Se clasifican de acuerdo a su matriz y relleno en brechas hidrotermales o ígneas. Las brechas hidrotermales presentan matriz compuesta de polvo de roca, mientras que su relleno es de cuarzo y sulfuros de cobre y hierro, presentando abundante contenido de calcosina y covelina. Los fragmentos son sub-angulosos a sub-redondeados y compuestos de los diferentes tipos litológicos presentes en el rajo. Por su parte, las brechas ígneas se caracterizan por una matriz de origen ígneo conformada por cristales de feldespato, relictos de máficos y relativa abundancia de cristales de cuarzo insertos en una masa de composición felsosídica. Los fragmentos son subangulosos a subredondeados compuestos de Pórfido Feldespático y en menor proporción Andesitas.

2.3.2.6. Gravas

Unidad reconocida como una secuencia de sedimentos continentales semi-consolidados, mal seleccionados y matrices soportados constituidos por fragmentos polimícticos con tamaños variables entre algunos milímetros a decímetros. Esta unidad se dispone de forma subhorizontal y se reconoce en las periferias del rajo.

En las figuras 2.4 y 2.5 se presentan un mapa litológico y una sección esquemática respectivamente, las cuales muestran la distribución en superficie y en profundidad de las litologías recién descritas.

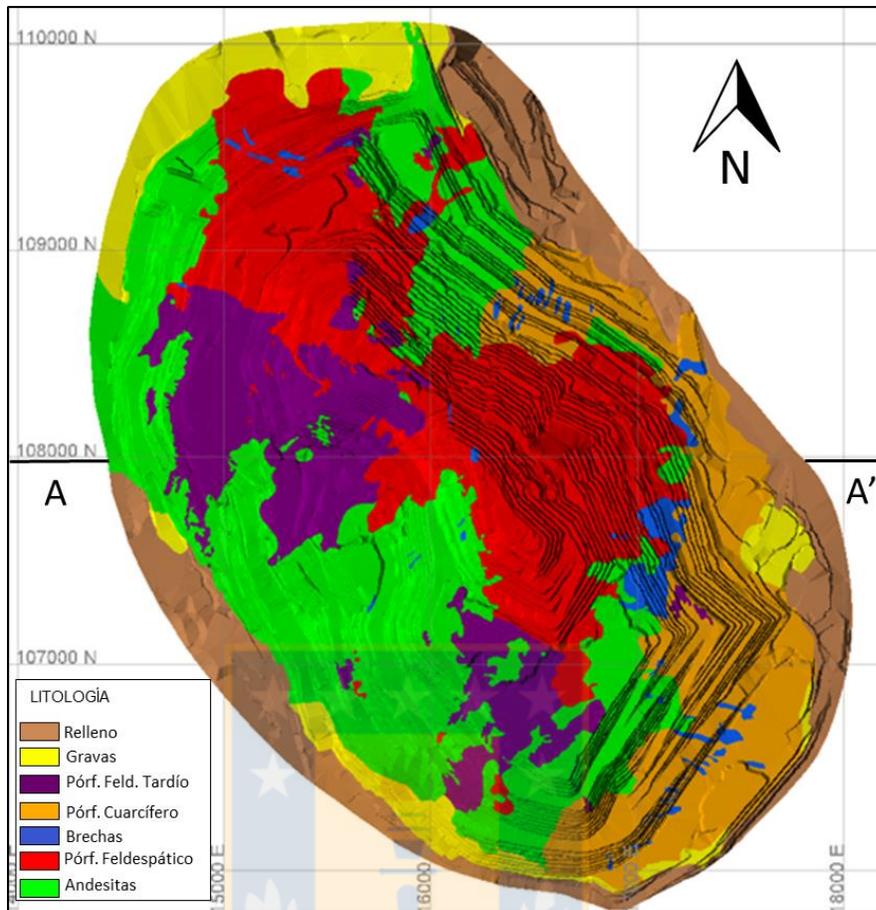


Figura 2.4 : Mapa Litológico de superficie del rajo Escondida (Superintendencia de Geología de Minas).

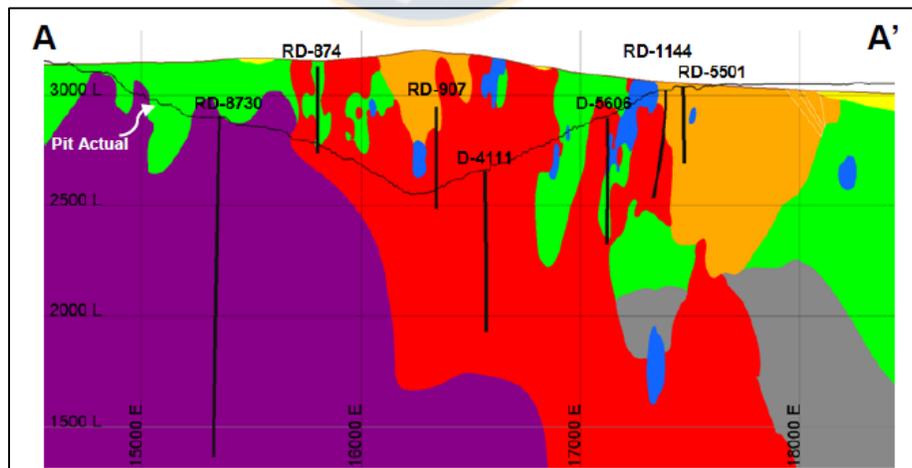


Figura 2.5 : Sección esquemática de perfil A-A' (108.000 N) para la litología del rajo Escondida. Líneas verticales representan sondajes y se incluye línea indicadora de *pit* a enero de 2015 como referencia.

2.3.3. Alteración

Las alteraciones descritas en el rajo Escondida han sido agrupadas en 4 eventos secuenciales, que conforman la etapa de alteración hidrotermal que originó la mineralización del depósito. Esta secuencia corresponde a los eventos Hidrotermal Temprano, Hidrotermal Transicional, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardío (Alcayaga, 1984; Quiroz, 1998).

2.3.3.1. Evento Hidrotermal Temprano o Tardímagmático

A. Alteración Potásica

En Escondida el evento potásico ha sido separado en dos alteraciones (potásica y biotítica) según mineralogía predominante y litología afectada. La alteración potásica representa el estado más temprano de alteración y su principal característica es el ataque alcalino, reflejado por un aporte de feldespato potásico dispuesto en vetillas, diseminado en forma de entre-crecimiento con cuarzo o como borde de reemplazo en fenocristales de plagioclasa. Se asocia al CIFE y se reconoce principalmente en sondajes profundos.

B. Alteración Biotítica

A diferencia de la potásica, ocurre principalmente en andesitas y se caracteriza por el crecimiento de cristales de biotita secundaria reemplazando minerales ferromagnesianos. Se reconoce por imprimir una coloración marrón a las andesitas, debido a la presencia moderada a intensa de biotita secundaria que ocurre en forma diseminada, intersticial y en vetillas.

C. Alteración Sericita Gris-Verde

Se asocia a la porción terminal de la alteración potásica y se caracteriza por una abundante mineralización de sulfuros hipógenos con alto contenido de Cu (Cortés, 2015). Es de carácter pervasiva implicando una fuerte hidrólisis en los arreglos mineralógicos generados anteriormente, tales como feldespato potásico y biotita hidrotermal. Suele asociarse a la ocurrencia de vetillas de cuarzo, las cuales ocurren principalmente como *stockwork* de vetillas.

D. Alteración Propilítica

Caracterizada por la asociación epidota – clorita y menor calcita, albita y piritita en rocas principalmente de origen volcánico. Ocurre por lo general como un halo gradacional de la alteración potásica, distribuyéndose por la periferia y en zonas distales del rajo, rodeando a las demás alteraciones.

2.3.3.1. Evento Hidrotermal Transicional

A. Alteración Sericita-Clorita-Arcillas (SCC)

Representa una etapa transicional entre la alteración potásica y la alteración cuarzo-sericita. La alteración Sericita-Clorita-Arcillas (SCC, por sus siglas en inglés) ocurre en la porción occidental del rajo y su principal característica es la presencia de clorita en biotitas. Se reconoce por biotitas reemplazadas por la asociación clorita-sericita-pirita y plagioclasas alteradas a sericita-arcilla.

2.3.3.2. Evento Hidrotermal Principal

A. Alteración Cuarzo-Sericita-Arcillas (QSC)

Corresponde al evento hidrotermal de mayor relevancia para el depósito, en el cual los procesos de mineralización se desarrollaron de forma más intensa. La alteración Cuarzo-Sericita-Arcillas (QSC, por sus siglas en inglés) es de carácter pervasiva y está constituida por un agregado de cuarzo-sericita ± arcillas. La alteración QSC se caracteriza además por presentar una ausencia total de máficos y feldespato potásico.

2.3.3.3. Evento Hidrotermal Tardío

A. Alteración Argílica Avanzada (AA)

Se distribuye muy acotadamente por las partes altas del yacimiento y se caracteriza por la formación de cúmulos irregulares de color blanco. Está constituida por cuarzo sacaroidal, pirofilita y alunita primaria insertos en una masa gris compuesta principalmente de sílice, siendo común la ocurrencia de formas amorfas, cavidades y sílice residual. La mineralogía de la alteración AA incluye también abundante jarosita y menor hematita.

B. Alteración Argílica Supérgena (AS)

A la igual que la anterior, se distribuye por zonas altas del yacimiento, muchas de las cuales ya han sido explotadas. Está caracterizada por abundante caolín, generalmente asociado con sericita lo cual le otorga una coloración blanquecina a la roca. Puede afectar en profundidad puesto que su presencia está controlada por sectores de alta permeabilidad, fallas y estructuras mayores.

En las figuras 2.6 y 2.7 se presentan un mapa y una sección esquemática respectivamente, las cuales muestran la distribución en superficie y en profundidad de las alteraciones recién descritas.

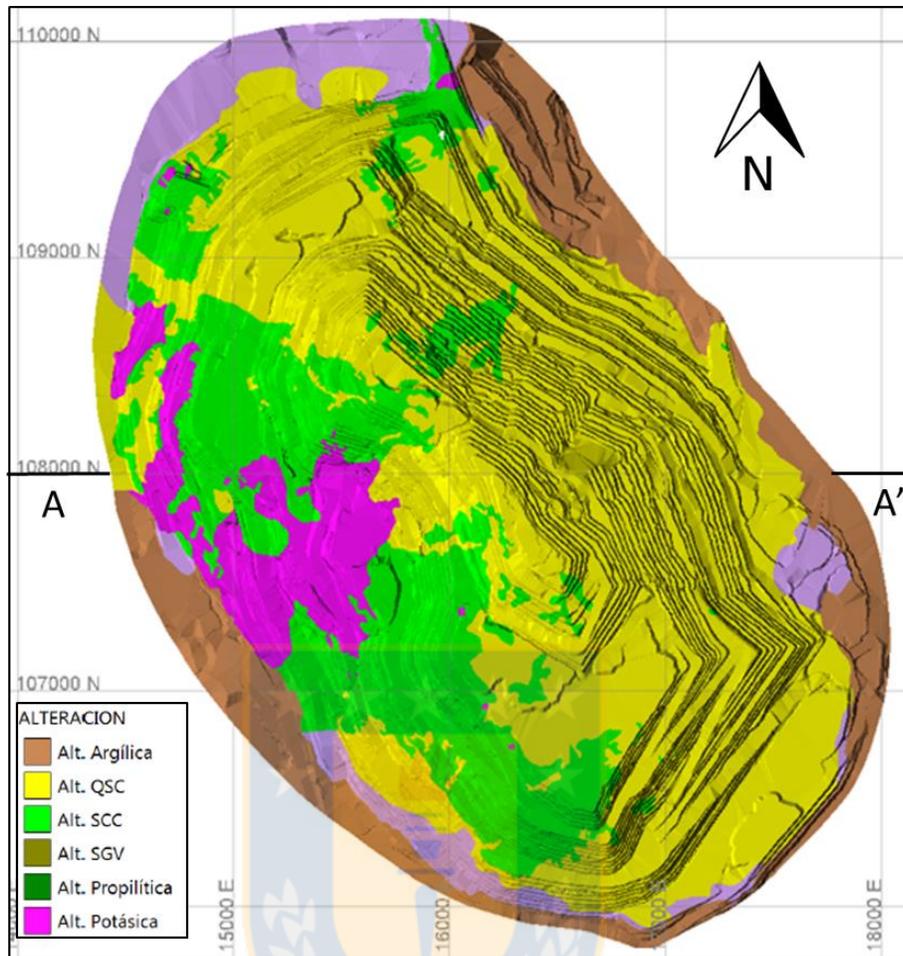


Figura 2.6 : Mapa de Alteraciones en la superficie del rajo Escondida. Alteración biotítica incluida en alteración potásica (Superintendencia de Geología de Minas).

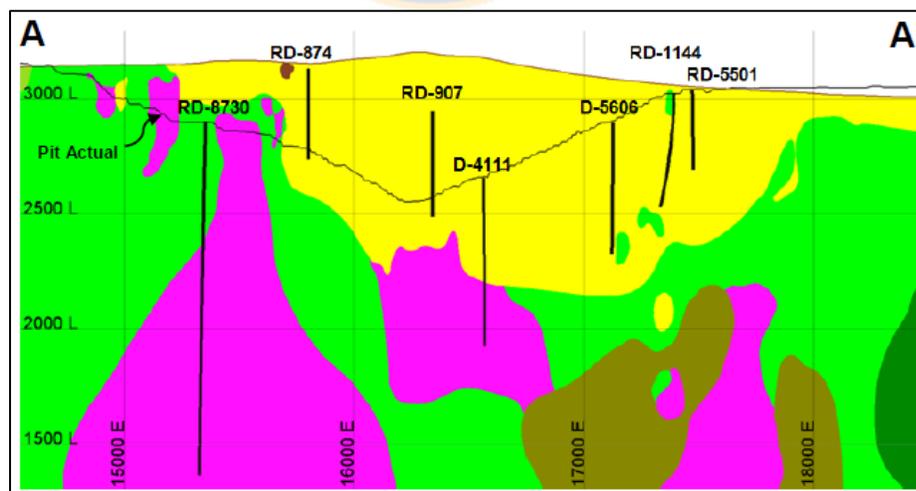


Figura 2.7 : Sección esquemática de perfil A-A' (108.000 N) para las alteraciones del rajo Escondida. Líneas verticales representan sondajes.

2.3.4. Mineralización

En Escondida se han reconocido dos etapas principales de mineralización (Véliz, 2004). La primera de ellas se relaciona directamente con la intrusión del Complejo Intrusivo Feldespático Escondida que aportó los fluidos hidrotermales responsables de la etapa de alteración hidrotermal y, con ello, la mineralización primaria del depósito. La segunda etapa de mineralización se relaciona a un evento de alteración supérgena, que dio origen al enriquecimiento secundario del yacimiento.

Los procesos de alteración hidrotermal y posterior enriquecimiento secundario que afectaron a Escondida generaron un típico perfil vertical de un sistema tipo pórfido cuprífero. En virtud de esto, Véliz (2004) define diferentes zonas mineralógicas o *minzones* según la mineralización predominante, las cuales se encuentran limitadas por superficies o “techos” definidos de acuerdo a la aparición o desaparición de ciertas especies minerales. A continuación se resumen los techos reconocidos en Escondida.

- **Techo de Óxidos (TOx):** Corresponde a la primera aparición de óxidos de cobre.
- **Techo de Sulfuros (TS):** Se define como la primera aparición de sulfuros, ya sean de cobre o hierro, tanto de origen primario como secundario.
- **Techo Dominante de Sulfuros (TDS):** Delimita la parte superior de la zona de enriquecimiento y se caracteriza por la primera aparición continua de sulfuros de cobre (tanto de origen primario como secundario), lo cual puede, en algunos casos, coincidir con el TS. Por otro lado, correspondería a la última aparición de limonitas dominantes autóctonas.
- **Techo Dominante de Covelina (TDCv):** Indica la presencia continua de covelina.
- **Techo Dominante de Calcopirita (TDCpy):** Corresponde al límite que separa la zona de Alto Enriquecido de la zona de Bajo Enriquecido y se define como el límite superior de la presencia continua de calcopirita.
- **Techo de Bornita (TBr):** Esta superficie está definida por la primera presencia de bornita dentro de la zona primaria. No se incluyen aquellas zonas de bornita que se presentan en vetas tardías, o encapsuladas en vetas de cuarzo.

En la figura 2.8 se presenta un esquema resumen del perfil vertical de enriquecimiento secundario de Escondida, mostrando los techos recién descritos.

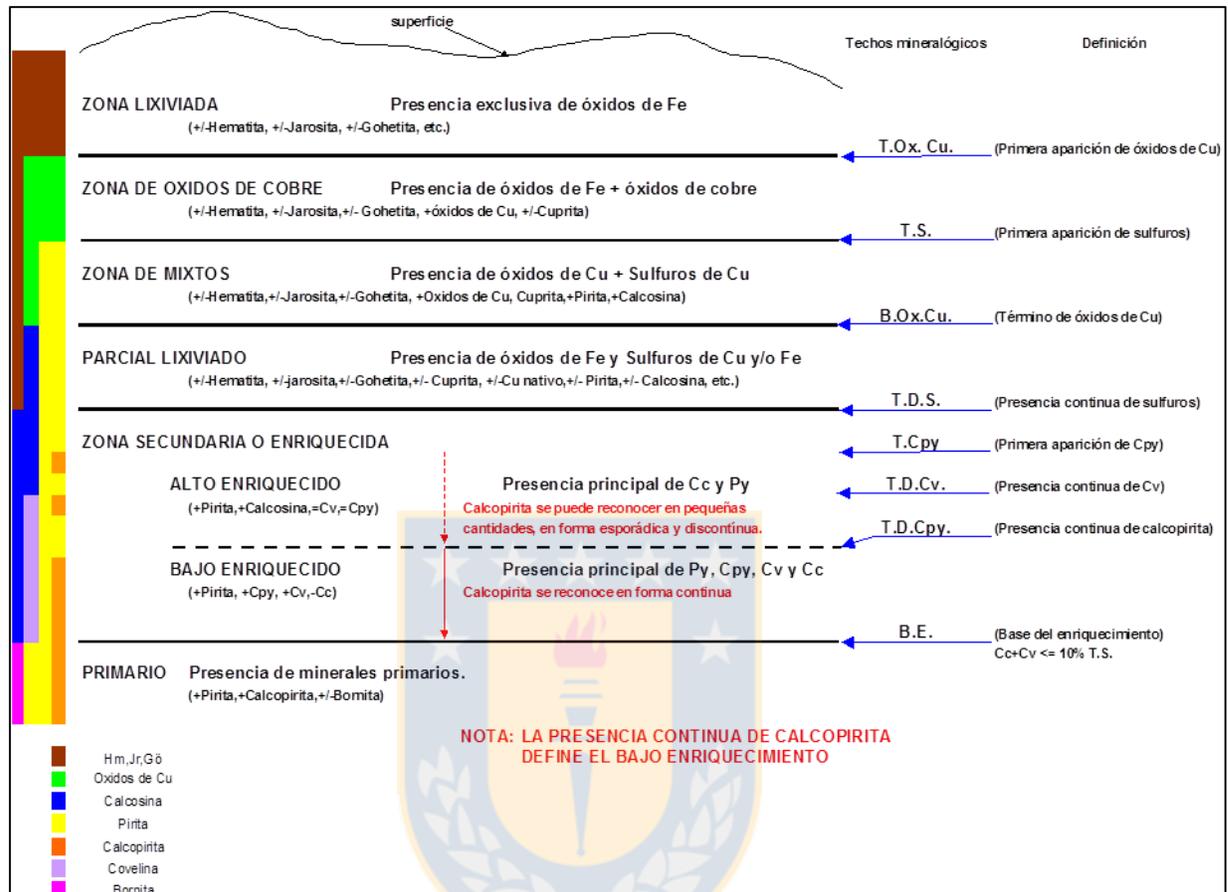


Figura 2.8: Esquema resumen del perfil vertical generado por el proceso de enriquecimiento secundario en el yacimiento Escondida (Véliz 2004).

Las zonas mineralógicas definidas por Véliz (2004) corresponden a: Zona Lixiviada, Zona Oxidada, Zona de Mixtos, Zona de Parcial Lixiviado, Zona de Enriquecimiento Secundario y Zona Primaria (figura 2.8), las cuales se definen a continuación.

2.3.4.1. Zona Lixiviada

Corresponde a la zona superior del yacimiento, con espesores variables entre 50 y 300 metros, y está caracterizada por una mineralización típica de procesos de lixiviación tales como limonitas, hematita, goethita y, en menor medida, jarosita. Si bien los procesos de lixiviación han removido casi la totalidad de los sulfuros, es posible observar algunos parches colgados de sulfuros de cobre primarios y secundarios parcial o completamente oxidados.

2.3.4.2. Zona Oxidada

Zona ubicada bajo la zona lixiviada y caracterizada por la aparición de óxidos de cobre. La mineralogía está dominada por especies sulfatadas tales como brocantita y antlerita, y en forma subordinada, crisocola, atacamita, pseudo-malaquita, *copper wad* y “arcillas de cobre”. En ciertos sectores es posible encontrar cuprita y cobre nativo.

La distribución de los óxidos de cobre denota una fuerte zonación, reconociéndose un núcleo formado por brocantita y antlerita, rodeado por un halo que aumenta gradualmente a atacamita y crisocola.

2.3.4.3. Zona de Mixtos

Esta zona generalmente se ubica inmediatamente sobre el TDS y está caracterizada por la coexistencia de sulfuros y oxidados de Cu. En esta zona se observa una cantidad importante de óxidos de Cu con una razón cobre soluble / cobre total (CuS/CuT) que varía entre 0,15 y 0,5. Los óxidos dominantes corresponden a antlerita y brocantita, mientras que los sulfuros principales son pirita y calcosina.

2.3.4.4. Zona de Parcial Lixiviado

Zona ubicada sobre el enriquecimiento secundario y caracterizada por la presencia de sulfuros parcialmente oxidados por óxidos de hierro, tales como hematita, jarosita, y menor goethita.

2.3.4.5. Zona de Enriquecimiento Secundario

Corresponde a la zona donde se desarrollan los procesos de enriquecimiento secundario producto del re-equilibrio de la mineralogía hipógena, constituyendo la principal fuente de recursos del depósito. Los sulfuros secundarios dominantes corresponden a calcosina y covelina, los cuales se encuentran reemplazando a otras especies sulfuradas, tales como pirita y calcopirita. Esta zona ha sido dividida en dos sub-zonas, Alto y Bajo Enriquecido, en base a sus asociaciones mineralógicas.

A. Alto Enriquecido (HE)

Ubicado inmediatamente bajo el TDS y el Parcial Lixiviado, corresponde a la zona donde los procesos de enriquecimiento secundario se desarrollaron con mayor intensidad, y por ende, presenta los mayores contenidos de Cu. La mineralogía está caracterizada por una asociación pirita

+ calcosina con menor covelina, las cuales ocurren en forma de stockwork de vetillas, en vetas y diseminadas. El principal sulfuro secundario corresponde a calcosina, pero la relación calcosina/covelina tiende a disminuir en profundidad.

B. Bajo Enriquecido (LE)

Se ubica bajo el HE y mineralógicamente es muy similar a éste, con la diferencia de que el LE tiene presencia continua de calcopirita y denota un aumento en los contenidos de covelina. Producto de la menor disponibilidad de Cu para realizar reemplazos, la calcopirita tiende a aumentar en profundidad a la par que la covelina pasa a ser el sulfuro secundario principal.

2.3.4.6. Zona Primaria

Se ubica bajo el LE, y está caracterizada por una mineralización de Cu y/o de Fe con un contenido menor al 10% en volumen de sulfuros secundarios (calcosina y/o covelina). Su mineralogía se compone principalmente por pirita y cantidades variables de calcopirita \pm covelina \pm bornita \pm molibdenita. La pirita y la calcopirita ocurren diseminadas o en vetillas, siendo común encontrar intercrecimientos de calcopirita-pirita y calcopirita-molibdenita. La bornita está en las zonas centrales del pórfido, diseminada y en vetillas.

En las figuras 2.9 y 2.10 se presentan un mapa y una sección esquemática respectivamente, las cuales muestran la distribución en superficie y en profundidad de las zonas mineralógicas recién descritas.

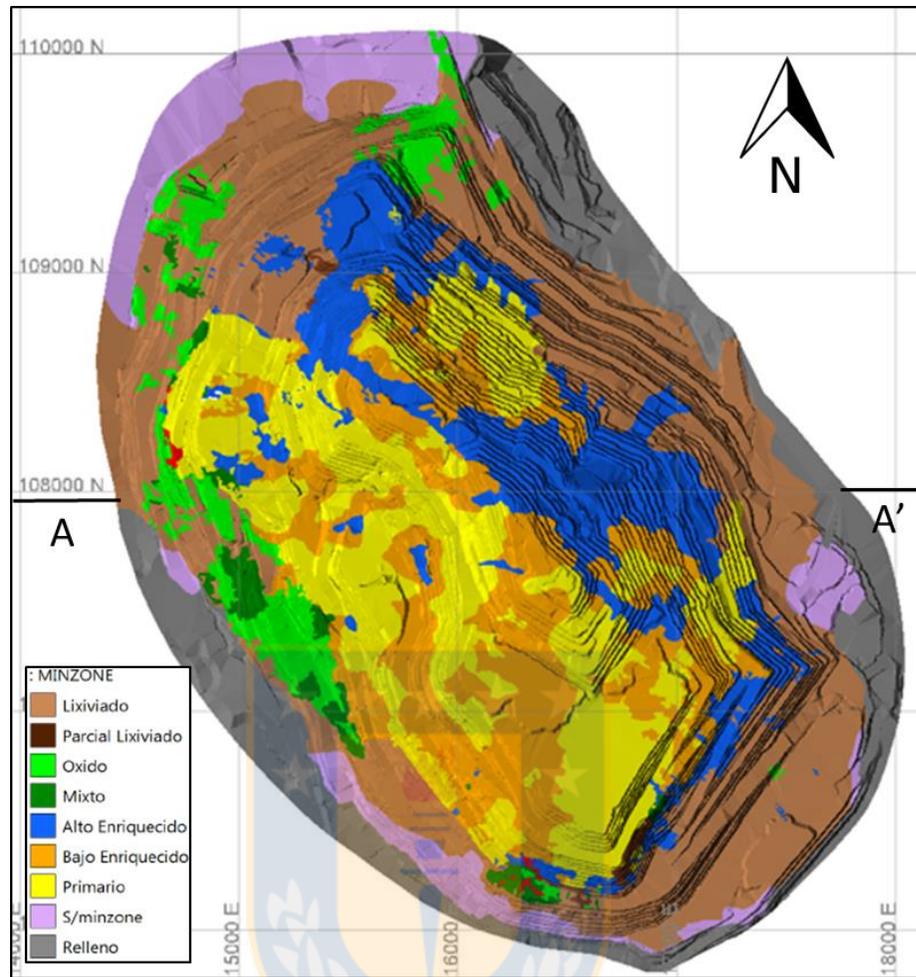


Figura 2.9 : Mapa de zonas mineralógicas en la superficie del rajo Escondida (Superintendencia de Geología de Minas).

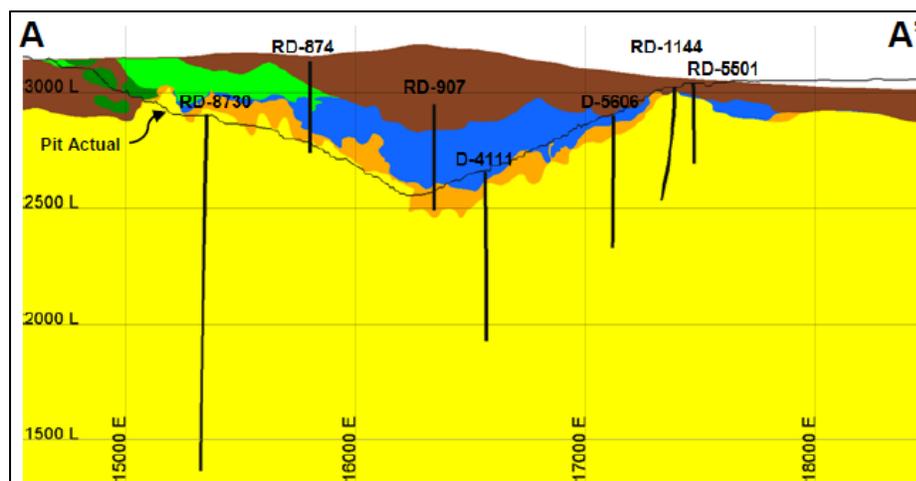


Figura 2.10 : Sección esquemática de perfil A-A' (108.000 N) para las zonas mineralógicas del rajo Escondida. Líneas verticales representan sondajes.

3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

3.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de esta investigación involucra una fuerte componente estadística, por lo que es necesario realizar una breve reseña acerca de las técnicas y métodos estadísticos utilizados. En virtud del gran volumen de datos disponibles y las numerosas variables a analizar, es que se hace de utilidad la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes que permitan procesar gran cantidad de información y analizar el comportamiento de diferentes variables al mismo tiempo.

Es por este motivo que el procedimiento escogido en esta investigación considera la aplicación de la técnica estadística denominada Análisis de Componentes Principales (ACP), la cual permite reducir la dimensionalidad de un gran conjunto de datos y orientar el estudio hacia aquellas variables más relevantes para el problema planteado. A las variables más relevantes se les realiza un Análisis de Correlación Múltiple (ACM) y son posteriormente analizadas individualmente mediante estadística univariante, en particular a través del análisis de diagramas de caja (o *boxplots*).

3.2. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

3.2.1. Generalidades

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística multivariante útil a la hora de analizar bases de datos en las que las observaciones se describen mediante diversas variables dependientes, cuantitativas e interrelacionadas. El objetivo del ACP es extraer la información más importante de una base de datos y representarla como un conjunto de nuevas variables ortogonales llamadas componentes principales, las cuales son una combinación lineal de las variables originales, mostrando el patrón de similitud de las observaciones y de las variables en forma de puntos y vectores en gráficos (Abdi y Williams, 2010).

El ACP cobra relevancia al analizar bases de datos con gran número de variables pues permite agrupar aquellas redundantes o que se encuentren midiendo la misma característica o fenómeno multidimensional y representarlas de forma gráfica a través de menos variables. Es justamente éste el objetivo fundamental del ACP, es decir, hallar una combinación lineal de las variables originales que mejor represente cierta característica multidimensional. La nueva

combinación lineal, o componente principal, que exhiba la mayor varianza y el menor error asociado, será la Primera Componente Principal (o PC1). Se entiende como varianza de una componente a la cantidad de información que lleva incorporada, es decir, cuanto mayor varianza, mayor será la cantidad de información explicada por dicha componente. La Segunda Componente Principal (PC2) y las sucesivas componentes se ordenan de forma descendente en cuanto a la cantidad de varianza que explican, por lo tanto, la Primera y Segunda Componente son las que mayor información incorporan y, generalmente, las más relevantes para el análisis.

Al realizar un ACP, los resultados pueden ser presentados en forma de una tabla de componentes, donde se resume cada uno de los componentes principales y las variables que más influyen a la hora de construir cada uno de ellos, o de forma gráfica mediante los gráficos *Score* y *Loading*. Si bien la tabla entrega bastante información, la máxima utilidad del ACP se obtiene combinando el análisis de los gráficos *Score* y *Loading*, pues permiten al usuario interpretar y determinar asociaciones relevantes para la problemática de estudio. A continuación se explica cómo combinar e interpretar ambos gráficos.

3.2.2. Interpretación de *Score Plot*

En este gráfico se presentan las dos primeras Componentes Principales (PC1 y PC2) en forma de ejes ortogonales, y además, la distribución de cada una de las observaciones o muestras contenidas en la Base de Datos, respecto a estas componentes. La utilidad de este gráfico radica en que permite determinar cuál de las componentes es la que entrega más información o es más relevante para el problema. Para ello se recomienda definir poblaciones, agrupando los datos en variables categóricas que tengan directa relación con el problema planteado y permitan diferenciar grupos dentro del gráfico.

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo sencillo donde se representa el ACP de un conjunto de 97 muestras de roca, analizadas por 14 variables químicas y agrupadas en dos poblaciones que representan dos litologías distintas (litologías 1 y 2). La problemática planteada en este caso consiste en determinar si es que existen elementos químicos que permitan diferenciar ambas litologías, o dicho de otro modo, se busca determinar qué elementos químicos se relacionan con cada una de las litologías.

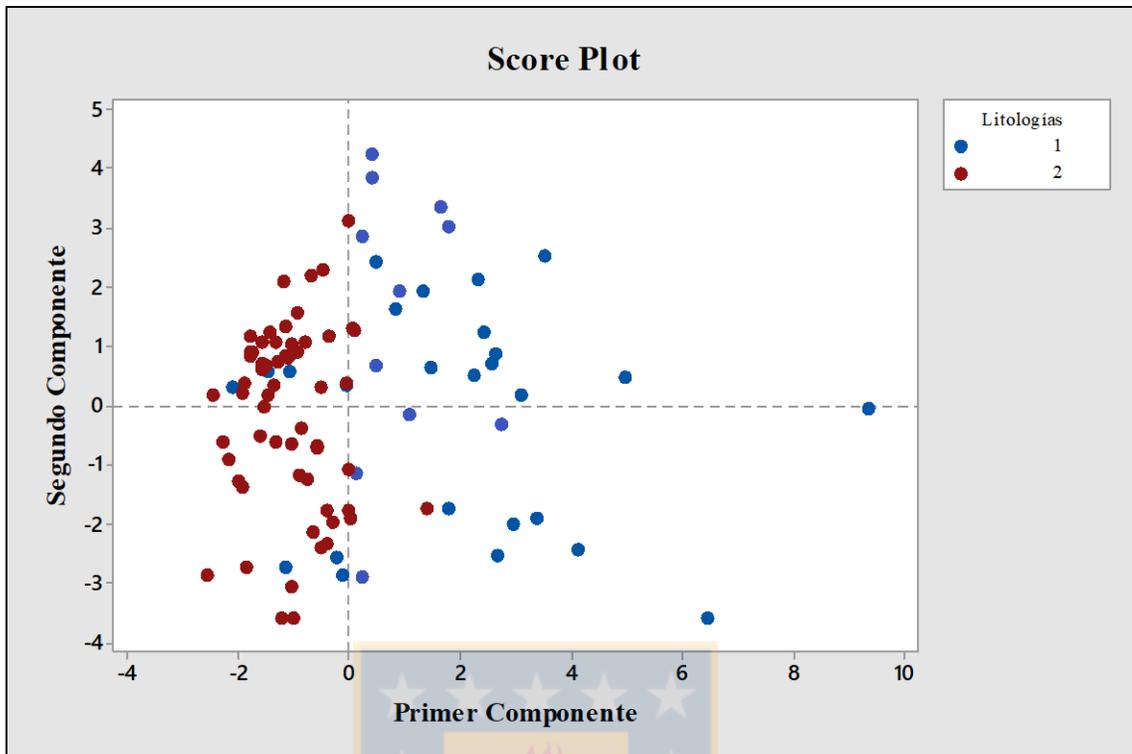


Figura 3.1 : Ejemplo de *Score Plot*. Notar distribución de ambas poblaciones, las cuales representan las dos litologías analizadas

Se observa que ambas poblaciones se distribuyen a lados opuestos del Primer Componente (línea segmentada vertical), salvo unas pocas muestras mal clasificadas, mientras que no se observa una clasificación de las poblaciones por parte del Segundo Componente (línea segmentada horizontal). De lo anterior se concluye que el Primer Componente es efectivo al separar ambas poblaciones y, por ende, es el más relevante para el problema planteado. La interrogante que surge es definir qué variables químicas fueron las más influyentes a la hora de construir el PC1, lo cual se determina analizando el *Loading Plot*.

3.2.3. Interpretación de *Loading Plot*

En este gráfico se representan las variables originales como vectores cuya proyección sobre cada eje ortogonal representa el peso de la variable respectiva sobre el componente principal. Los vectores se distribuyen respecto a un círculo imaginario cuyo origen corresponde a la intersección de ambas componentes (figura 3.2)

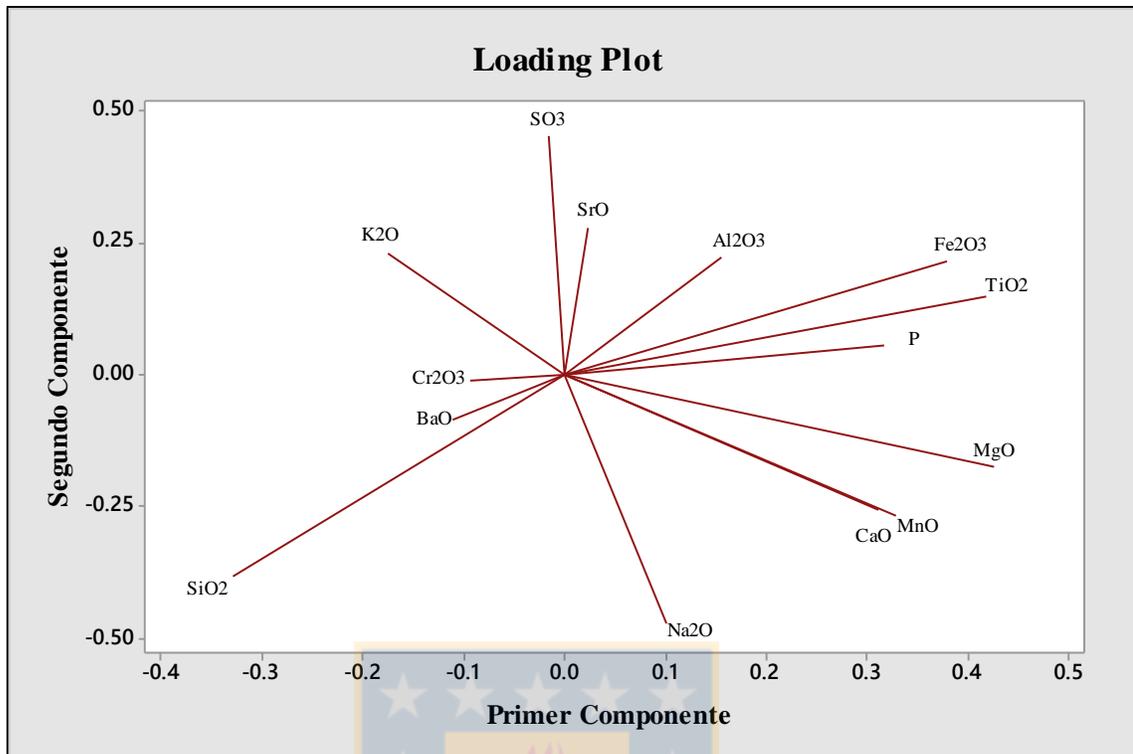


Figura 3.2 : Ejemplo de *Loading Plot*. Distribución de las variables se condice con la distribución de las poblaciones del *Score Plot*.

El coseno del ángulo entre los vectores de las variables originales es una medida directa de la correlación entre dichas variables, siempre y cuando se encuentren alejadas del origen. Así, si el ángulo es próximo a cero, la correlación es alta y positiva (ej.: Fe₂O₃ y TiO₂); si el ángulo es cercano a 180°, la correlación es también alta pero negativa (ej.: SiO₂ y Fe₂O₃). Por último, si el ángulo es cercano a 90°, las variables están escasamente relacionadas (ej.: Na₂O y Fe₂O₃). Debe quedar claro que si dos variables se encuentran cercanas, pero próximas al origen del círculo (ej.: Cr₂O₃ y BaO), éstas no se encuentran correlacionadas y tampoco influyen significativamente en los componentes.

Como ya se dijo anteriormente, la influencia de cada variable sobre la componente de interés se mide en la proyección sobre cada eje ortogonal, por lo que en este caso, son relevantes aquellas variables cuya proyección sea mayor en el eje horizontal (Primer Componente). Así, Fe₂O₃, TiO₂ y MgO son las que más influyen positivamente en el PC1, es decir, que la Litología 1 (población azul en figura 3.1) se relaciona con altos contenidos de esos elementos. Por su parte, el

SiO₂ influye negativamente en el PC1, y se deduce que la Litología 2 (población roja en figura 3.1) se relaciona con altos contenidos de ese elemento.

3.3. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

Este análisis tiene por objetivo cuantificar el grado de asociación lineal entre pares de variables de una base de datos, a partir de la determinación de un coeficiente de correlación. En este estudio se opta por la utilización del coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide el grado de asociación lineal entre dos variables cualesquiera y se calcula dividiendo la covarianza de ambas variables entre el producto de las desviaciones estándar de cada variable (Reinmann y otros, 2008).

Así, para un par de variables el coeficiente de correlación de Pearson puede tomar cualquier valor entre -1 y 1, siendo positivo cuando exista correlación directa entre ambas variables y negativo si la relación es inversa. Un valor ± 1 indica una relación lineal perfecta entre ambas variables (ya sea positiva o negativa), mientras que un valor de 0 indica que no existe relación lineal entre las variables. En general, un coeficiente de correlación de $\pm 0,7$ indica una asociación significativa entre dos variables, no obstante, esto varía según el número de muestras analizadas ya que al incrementar el número de muestras, los valores absolutos del coeficiente de correlación tienden a disminuir (Reimann y otros, 2008).

3.4. ANÁLISIS DE *BOXPLOTS*

El diagrama de caja, o *boxplot*, es una herramienta gráfica sencilla pero muy útil a la hora de representar un conjunto de datos y compararlo con otros grupos. Permite visualizar un conjunto de datos mediante sus percentiles 25, 50 y 75, también llamados Cuartil Inferior (Q1), Mediana (Q2) y Cuartil Superior (Q3) respectivamente (Krzywinski y Altman, 2014). El gráfico se compone de una caja que representa los datos comprendidos entre el Q1 y el Q3, que por lo tanto simboliza el 50% de los datos centrales, y por dos brazos o bigotes que representan el 25% superior e inferior de los datos del conjunto (figura 3.3). La línea horizontal dentro de la caja representa la mediana, es decir, delimita el 50% de los datos superiores e inferiores, mientras que el círculo corresponde a la media aritmética, la cual no necesariamente coincide con la mediana. La coincidencia entre mediana y media aritmética se da en poblaciones de datos con distribución normal o gaussiana.

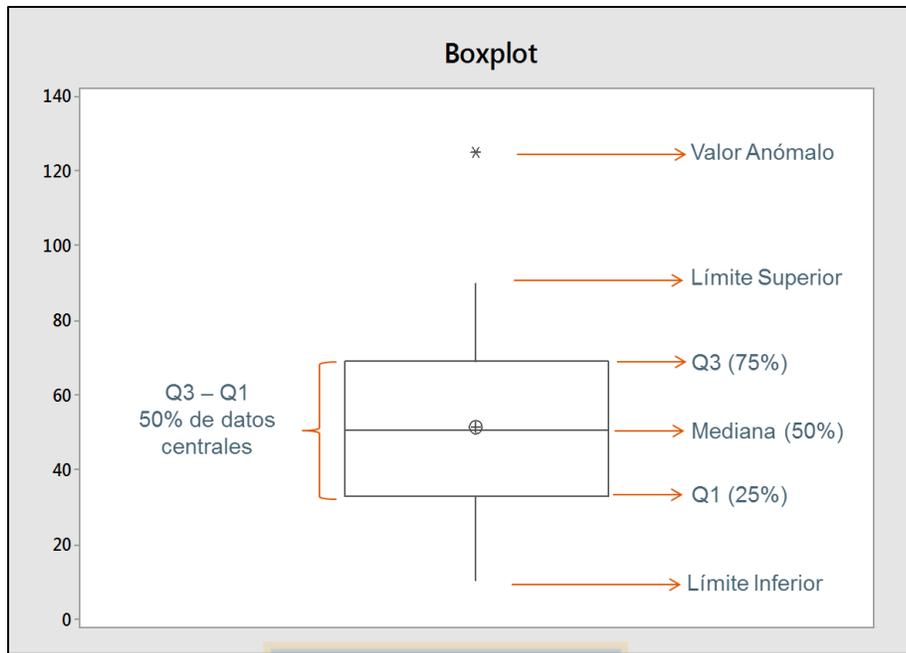


Figura 3.3 : Ejemplo de *boxplot*.

Respecto a los estadígrafos, la mediana es preferida por sobre la media aritmética para efectos de análisis de poblaciones con distribución asimétrica o irregular. Esto se debe a que la mediana es menos sensible a valores anómalos, y por lo tanto, no se ve sesgada por ellos, mientras que la media aritmética es altamente sensible a estos valores, y en tal caso, puede estar bastante sesgada y alejada del grueso de los datos.

4. CONTEXTO METALÚRGICO Y GEOMETALÚRGICO

4.1. PROCESO PRODUCTIVO DE MINERA ESCONDIDA

4.1.1. Generalidades

Minera Escondida es una compañía dedicada a la extracción y beneficio de minerales de cobre. La compañía opera los rajos Escondida y Escondida Norte, que en conjunto alimentan plantas concentradoras, pilas de bio-lixiviación y pilas de lixiviación ácida según ley y/o naturaleza del mineral extraído. Sulfuros de Cu de alta ley ($>0,7\%$ Cu) son tratados mediante flotación convencional en 3 plantas concentradoras, mientras que sulfuros de baja ley ($<0,7\%$ y $>0,3\%$ Cu) y óxidos de cobre son procesados mediante bio-lixiviación y lixiviación ácida respectivamente, con subsecuente extracción por solvente (SX) y electro-obtención (EW). Debido a que el alcance de este estudio involucra solamente el proceso de concentración, se omite una descripción más detallada del proceso de obtención de cátodos en planta SX-EW, el cual se resume esquemáticamente en la figura 4.1.

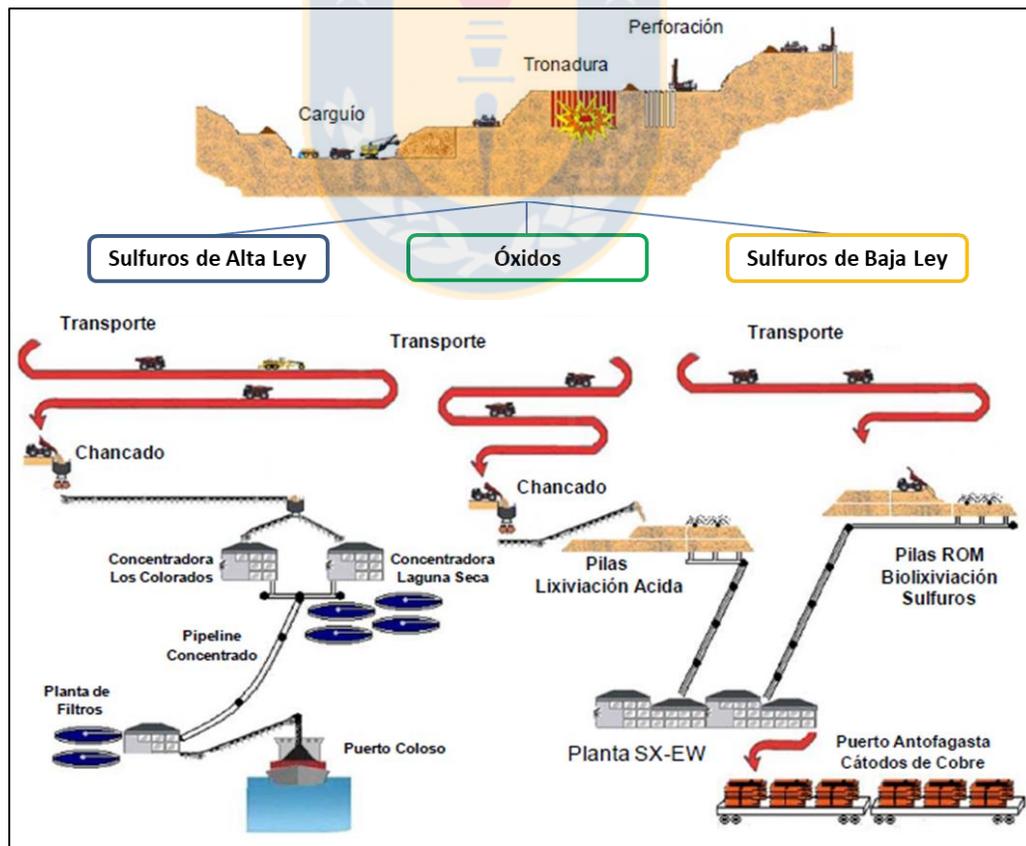


Figura 4.1 : Esquema de los procesos productivos de Minera Escondida. Modificado de Delgado (2013).

4.1.2. Proceso de Concentración

El proceso de concentración ha sido diseñado para procesar los minerales sulfurados de alta ley obteniendo como producto final concentrado de cobre, el cual corresponde al principal producto de la compañía, abarcando aproximadamente el 72% de sus ventas (Delgado, 2013).

Las dos etapas principales del proceso de concentración corresponden a las etapas de molienda y flotación. La molienda tiene por objetivo lograr la máxima liberación de las partículas de cobre contenidas en la roca mediante conminución del material alimentado, mientras que en la flotación se busca recuperar las partículas valiosas liberadas durante la molienda, concentrándolas en forma de espuma en la superficie. La pulpa obtenida en este proceso es luego tratada en espesadores para aumentar el porcentaje de sólidos del concentrado y recuperar el agua utilizada en el proceso. En la figura 4.2 se presenta un diagrama que resume el proceso de concentración, cuyas principales etapas se describen a continuación.

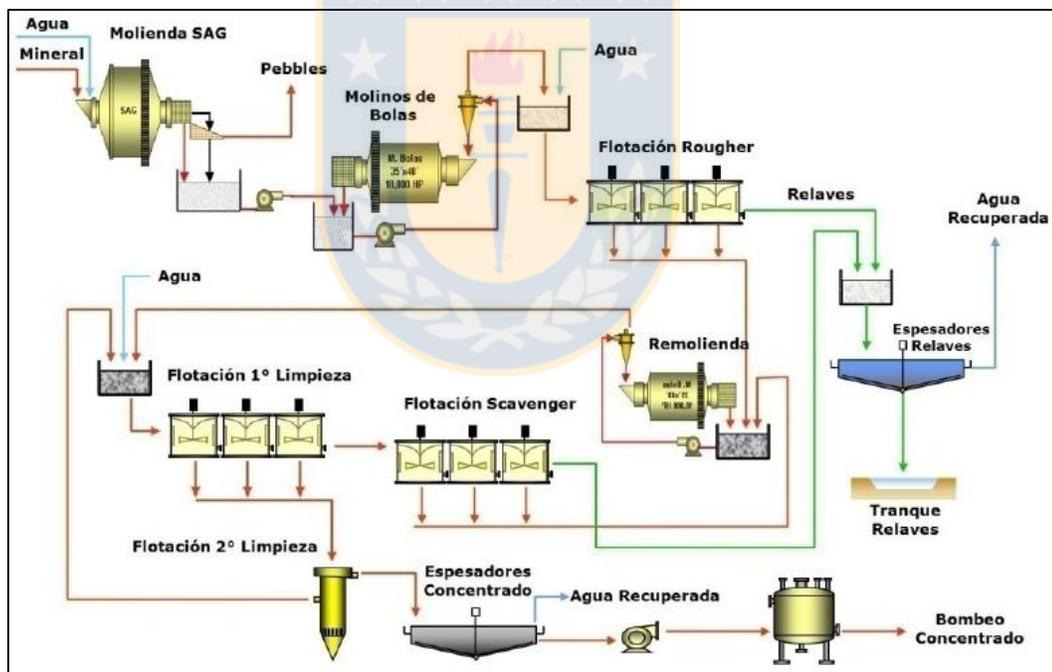


Figura 4.2 : Diagrama del Proceso de Concentración en Minera Escondida. Obtenido de Delgado (2013).

4.1.2.1. Etapa de Molienda

Esta etapa tiene como objetivo liberar las partículas de mena de la roca, a partir de la conminución del mineral alimentado. Se inicia con una etapa de molienda primaria o semi-

autogéna (molienda SAG), en donde el mineral proveniente directamente desde el chancador primario es mezclado con agua y cal en el molino SAG, con el objetivo de formar una pulpa. En esta etapa, la conminución del material alimentado se produce por el efecto combinado de las mismas partículas del mineral y bolas de acero de aproximadamente 5 pulgadas de diámetro que ocupan entre el 10 y 12% del volumen total del molino. El producto resultante de la molienda SAG es clasificado por hidrociclones que separan la fracción fina de la fracción gruesa. La fracción fina (bajo 150 micrones) es enviada directamente a flotación, mientras que la fracción gruesa pasa al circuito de molienda de bolas convencional (figura 4.2), donde se obtiene un producto fino bajo los 150 micrones que es óptimo para pasar al proceso de concentración por flotación (Delgado, 2013).

4.1.2.2. Etapa de Flotación

La flotación es un proceso físico-químico que aprovecha las diferencias de propiedades superficiales de las partículas sólidas para separar la mena valiosa de la ganga, mediante adhesión selectiva de las partículas de mena a burbujas de aire.

La pulpa proveniente de la molienda es depositada en celdas de flotación con agua y diferentes reactivos químicos que favorecen la flotación de las partículas sulfuradas de interés. Desde el fondo de las celdas se inyecta aire al sistema, generando burbujas a las cuales se adhieren las partículas de mena, las que son arrastradas hacia la superficie de la celda concentrándose en forma de espuma. La espuma rebasa por el borde de la celda y es capturada por canaletas que conducen el concentrado hacia las etapas siguientes.

En Minera Escondida, el circuito de flotación consta de 3 etapas, siendo la primera de ellas la flotación primaria o *rougher* que tiene como único objetivo recuperar la máxima cantidad de especies útiles y no una alta calidad de concentrado (Delgado, 2013). Las últimas dos etapas corresponden a la flotación *cleaner* y *scavenger*, las cuales tienen por objetivo eliminar impurezas y mejorar la ley del concentrado final. Finalmente, tanto el concentrado como el relave obtenidos del proceso de flotación, se envían a distintos espesadores donde se aumenta el porcentaje de sólidos y se recupera el agua utilizada en el proceso (figura 4.2).

4.2. COMPORTAMIENTO METALÚRGICO

4.2.1. Generalidades

Se entiende como comportamiento metalúrgico a una amplia gama de variables geometalúrgicas que definen el rendimiento del mineral durante el proceso de extracción de la mena valiosa en planta de procesamiento. Es por lo tanto, un término global aplicable a cualquier proceso metalúrgico, no obstante, el alcance de esta investigación se restringe netamente al proceso de concentración, en particular, a las etapas de molienda y flotación que han sido descritas en el apartado anterior. Estas etapas son críticas para el proceso productivo, pues la molienda representa entre el 50 y 70% del total de la energía consumida durante el procesamiento del mineral, mientras que la flotación define la calidad y ley del concentrado que se obtiene como producto final del proceso.

Para poder caracterizar ambas etapas se utilizará la información obtenida de las pruebas metalúrgicas de molienda y flotación realizadas sobre muestras de sondajes en laboratorio. De las pruebas de flotación se obtiene el índice de recuperación de Cu y de las pruebas de molienda se obtiene el índice SPI (*Sag Power Index*). Ambas variables son parámetros determinantes en el modelamiento geometalúrgico para la predicción del rendimiento de los procesos de molienda y flotación y, por lo tanto, corresponden a las variables geometalúrgicas que se busca correlacionar con las variables químicas y mineralógicas (espectrales) en este estudio. A continuación se realiza una breve reseña de ambas variables.

4.2.2. Variables Geometalúrgicas

4.2.2.1. Recuperación

Se define como el porcentaje (%) de partículas de Cu recuperadas luego del proceso de flotación. En Minera Escondida, la variable utilizada como índice de recuperación se denomina Rec30 y corresponde a la recuperación obtenida en la prueba de flotación *rougher* para la granulometría 30% sobre malla 100, lo que significa que el 30% del material alimentado es mayor a 150 micrones. Debido a esto, no se incluye en esta variable el porcentaje final del proceso de recuperación, el cual incorpora también las etapas de flotación *cleaner* y *scavenger*. Cabe destacar que la variable Rec30 es la que actualmente utiliza la Superintendencia de Geometalurgia para efectos de estimación, y a partir de un factor de escalamiento aplicada a ésta, se obtienen las

variables de recuperación final para cada planta concentradora, las cuales se incluyen en el modelo geometalúrgico de la mina.

4.2.2.2. *SPI (SAG Power Index)*

Se define como el tiempo de residencia del mineral en el molino SAG, medido en minutos, hasta alcanzar una granulometría óptima para pasar a la siguiente etapa del proceso (Delgado, 2013). Un tiempo de molienda mayor, indica mayor resistencia del mineral al proceso de conminución y, por lo tanto, un menor rendimiento del molino lo que se ve reflejado en un menor tonelaje de material procesable por la planta.

Por razones intrínsecas del proceso de molienda, la variable SPI carece de linealidad por lo que para efectos de este estudio se utiliza una variante del SPI, denominada mSPI (*modified SAG Power Index*) la cual es una transformación matemática de la variable original, como se muestra en (1), con tal de convertirla en una variable lineal.

$$mSPI = SPI^{0.55} \dots\dots\dots 1$$

4.2.3. **Influencia de la geología en el proceso metalúrgico**

Diversos estudios han determinado que tanto la recuperación como el mSPI tienen directa relación con la naturaleza geológica del material que ingresa a la planta concentradora (Preece, 2016; Pérez y otros, 2013). En particular, la litología y la alteración han sido reconocidos como factores determinantes en bajos rendimientos del proceso metalúrgico, por lo que a continuación se realiza una breve reseña del efecto de ambos factores sobre las variables geometalúrgicas de interés. Para el análisis se consideran 30.000 compósitos de sondajes que se encuentran bajo el Techo Dominante de Sulfuros (TDS), a los cuales se les asigna la información correspondiente de los modelos geológico y geometalúrgico de la mina.

4.2.3.1. *Efecto de la litología sobre la recuperación*

En la figura 4.3 se presenta un *boxplot* donde se grafican las principales litologías presentes en el rajo Escondida, obtenidas del modelo geológico, versus los porcentajes de recuperación final para la Planta Laguna Seca, obtenidos del modelo geometalúrgico. Las litologías analizadas corresponden a Pórfido Feldespático (PF), Pórfido Cuarzífero (PQZ), Andesitas (AND), Brechas Ígneas e Hidrotermales (BRX) y Pórfido Feldespático Tardío (TAR). Se incluye en el

gráfico una línea roja segmentada que indica el valor 80% de recuperación, correspondiente a un límite significativo para el proceso.

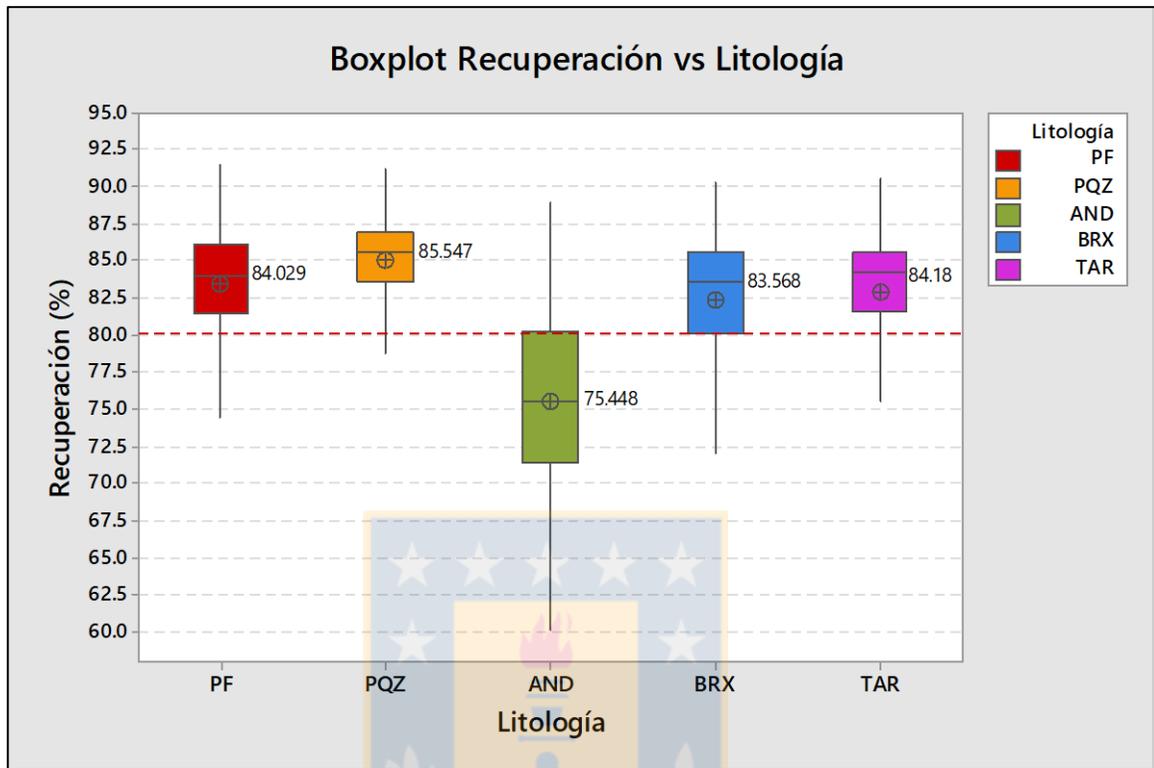


Figura 4.3: *Boxplot* recuperación versus litologías de Escondida. Notar comportamiento de las andesitas.

Se observa que la mayoría de las litologías presentan un comportamiento similar en cuanto a porcentajes de recuperación, con medianas entre el 83 y 86%. Por su parte, las andesitas denotan un rendimiento sustancialmente más bajo que otras litologías, con una mediana de recuperación de 75%. El hecho de que la caja del diagrama de andesitas se encuentre bajo el 80% de recuperación es estadísticamente significativo, puesto que el 75% de los datos totales correspondientes a andesitas se encuentren bajo aquel límite de recuperación.

4.2.3.2. Efecto de la alteración sobre la Recuperación

En la figura 4.4 se presenta un *boxplot* donde se grafican las principales alteraciones presentes en el rajo Escondida, obtenidas del modelo geológico de la mina, versus los porcentajes de recuperación final para la Planta Laguna Seca, extraídos del modelo gemetalúrgico. Las

alteraciones analizadas corresponden a Cuarzo-Sericita-Arcillas (QSC), Sericita-Clorita-Arcillas (SCC), Potásica (POT), Biotítica (BIO) y Sericita Gris Verde (SGV).

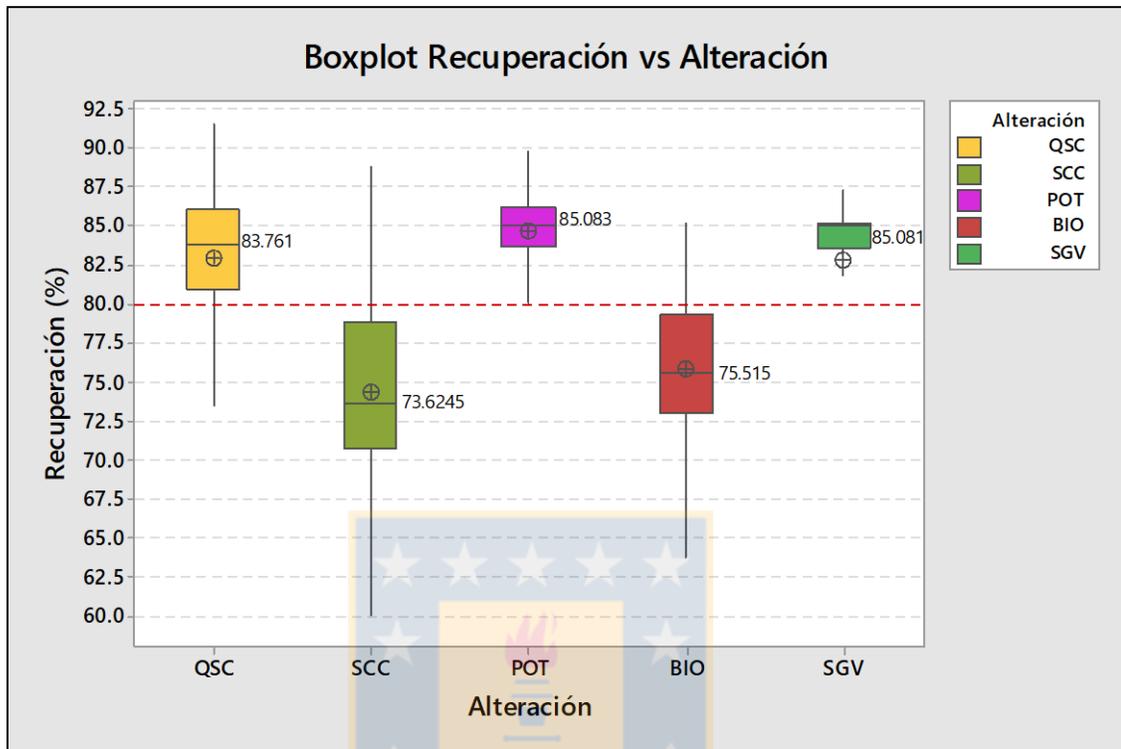


Figura 4.4 : *Boxplot* recuperación versus alteraciones de Escondida. Notar comportamiento de las alteraciones SCC y BIO.

En la figura 4.4 se observa que las alteraciones QSC, Potásica y Sericita Gris-Verde muestran comportamientos similares, con medianas de recuperación entre 83 y 85%, mientras que las alteraciones SCC y Biotítica se asocian a porcentajes de recuperación notoriamente más bajos con medianas cercanas al 75%. El hecho de que las cajas de los diagramas de estas dos últimas alteraciones se encuentren por debajo de la línea indicadora de 80% de recuperación es estadísticamente significativo, con lo que se destaca el control de ambas alteraciones sobre el rendimiento del proceso.

4.2.3.3. Efecto de la litología sobre el mSPI

En la figura 4.5 se presenta un *boxplot* donde se grafican las principales litologías presentes en el rajo Escondida, obtenidas del modelo geológico de la mina, versus los índices mSPI extraídos del modelo geometalúrgico. La línea roja segmentada del gráfico indica el valor 9,2 mSPI, correspondiente al máximo valor de diseño de funcionamiento óptimo del molino SAG de

la Planta Laguna Seca. Al alimentar rocas con valores mSPI por sobre este valor de diseño, es altamente probable que el molino disminuya su rendimiento y, por ende, disminuya también el tonelaje procesable por la planta.

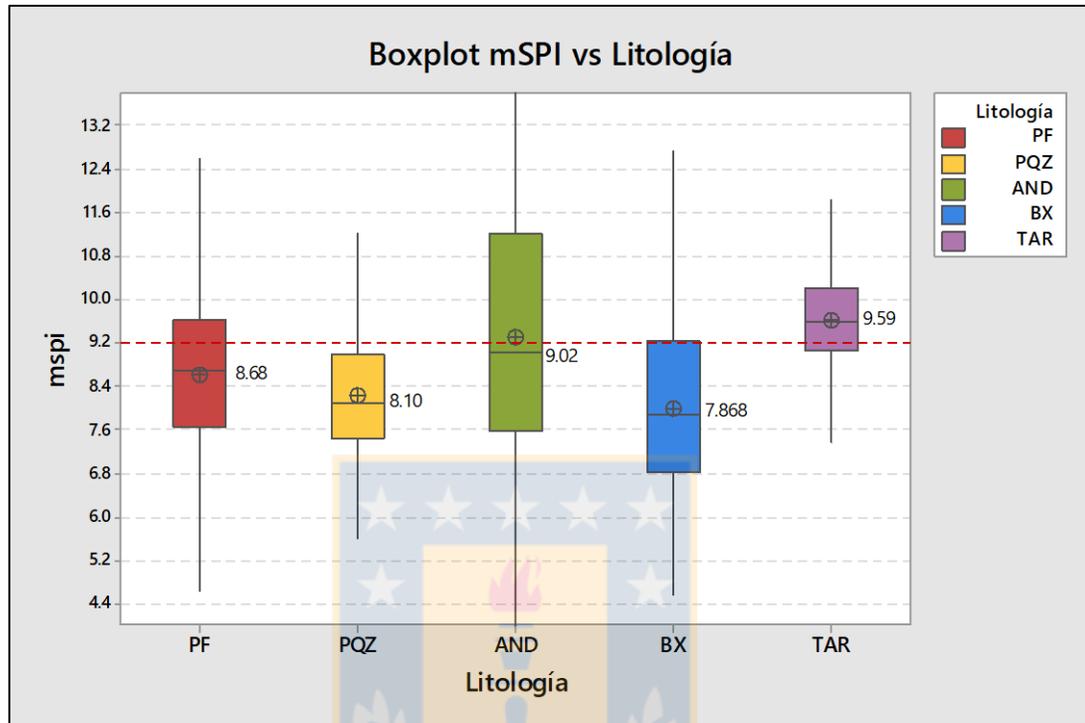


Figura 4.5 : *Boxplot* mSPI versus litologías de Escondida. Notar comportamiento de Andesitas y Pórfido Feldespático Tardío.

En la figura 4.5 se observa que sólo el Pórfido Feldespático Tardío presenta una mediana de mSPI por sobre el valor de diseño del molino SAG, mientras que las otras litologías presentan un comportamiento variable. En ese sentido, las andesitas presentan la mayor variabilidad, con una mediana de 9 mSPI y un rango intercuartil que se extiende desde el 7,6 hasta el 11,2 mSPI. En contraparte, Pórfido Feldespático, Pórfido Cuarzífero y Brechas presentan medianas de mSPI sustancialmente más bajas, siendo los dos últimos los que presentan mejor rendimiento en el proceso de molienda.

De lo anterior se concluye que no existe un control litológico claro en lo que respecta a altos valores mSPI, pues si bien el PFT presenta elevados valores de este índice, no es una litología volumétricamente representativa en la alimentación a planta, debido a sus bajas leyes de Cu.

4.2.3.4. Efecto de la Alteración sobre el mSPI

En la figura 4.6 se presenta un *boxplot* donde se grafican las principales alteraciones presentes en el rajo Escondida, obtenidas del modelo geológico de la mina, versus los índices mSPI extraídos del modelo geometalúrgico. Se incluye en el gráfico una línea roja segmentada indicando el valor de diseño del molino SAG (9,2 mSPI).

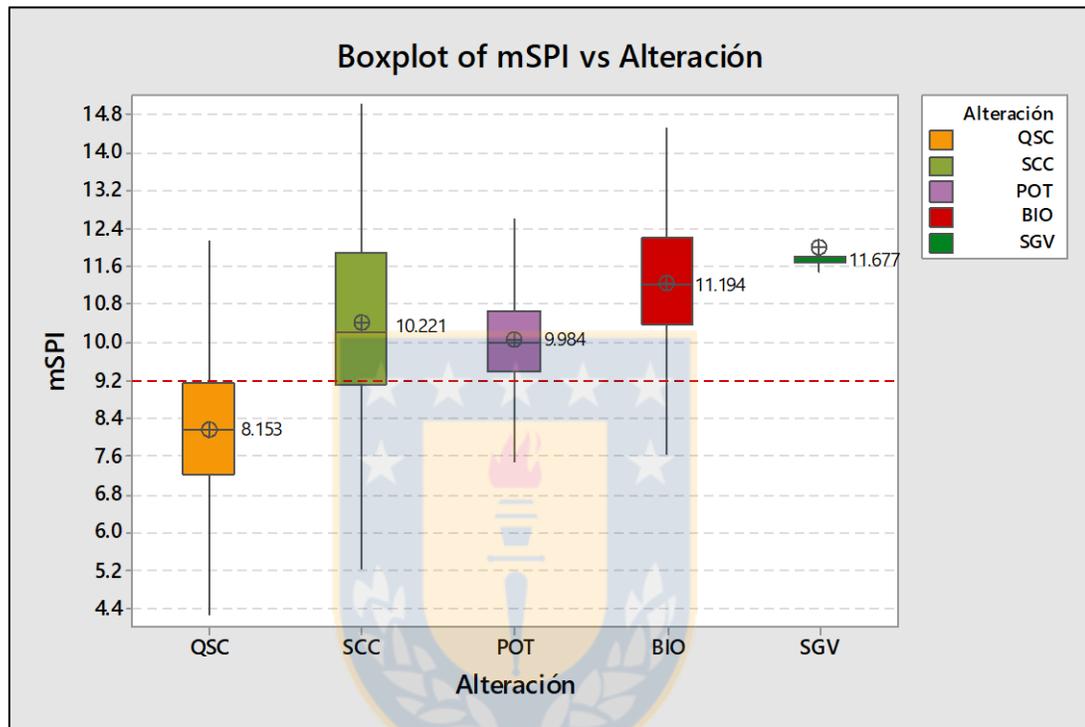


Figura 4.6 : *Boxplot* mSPI versus alteraciones de Escondida.

Se observa que todas las alteraciones, a excepción de la QSC, presentan un comportamiento similar con medianas de mSPI por sobre el valor de diseño del molino. La alteración QSC muestra una mediana sustancialmente más baja que las demás alteraciones, con un valor cercano a 8,1 mSPI, manifestando un marcado control del factor de la alteración hidrotermal sobre la variable en cuestión. Es preciso destacar que la alteración QSC es la predominante en el rajo Escondida, debido a que es la alteración de mayor desarrollo y la responsable de la mineralización del depósito.

5. CORRELACIÓN ENTRE DATOS DE ICP Y VARIABLES GEOMETALÚRGICAS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se busca analizar el potencial de usar elementos químicos, determinados por el método ICP, como variables independientes para la predicción del comportamiento metalúrgico en planta concentradora, identificando aquellos elementos que exhiban una fuerte correlación con los índices de recuperación y mSPI de los procesos de flotación y molienda respectivamente.

Mediante las técnicas de análisis estadístico multi-variable denominadas Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Correlación Múltiple (ACM) se identifican aquellos elementos químicos que muestren una relación estadística significativa con el comportamiento metalúrgico, los cuales son luego analizados individualmente a través de diagramas de cajas para estimar su efecto global sobre los índices de recuperación y mSPI. Para finalizar, se definen dominios de rendimiento metalúrgico a partir de las variables químicas analizadas, los que permiten caracterizar zonas del rajo según su comportamiento metalúrgico esperado.

5.2. BASES DE DATOS

La base de datos ICP utilizada en este estudio, contiene la información histórica de sondajes, diamantinos y de aire reverso, realizados en el rajo Escondida hasta el mes de marzo de 2016. Incluye más de 47.000 muestras analizadas por el método ICP-MS, en un soporte de 15 metros, de acuerdo al protocolo de análisis químicos de Minera Escondida para muestras que se encuentran bajo el Techo Dominante de Sulfuros (TDS). Cada registro incluye los análisis químicos de 50 elementos medidos por la técnica ICP.

La base de datos ICP se compila con la base de datos de Pruebas Metalúrgicas de Escondida, que incluye información obtenida de 6.180 pruebas metalúrgicas realizadas hasta mayo de 2015, y de la cual se extraen las variables Rec30 y mSPI. Así, se obtiene una base de datos compilada final de aproximadamente 5.300 registros, donde para cada uno de ellos se tiene información de 50 elementos químicos analizados por ICP y las variables geometalúrgicas Rec30 y mSPI.

5.3. ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN

5.3.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

5.3.1.1. ACP: Definición de Poblaciones

Para facilitar la interpretación de las herramientas gráficas del ACP, se procede a definir 3 poblaciones de recuperación a partir de los 5.300 datos disponibles. Mediante el gráfico probabilístico de la variable Rec30 (figura 5.1), se definen las poblaciones de alta, media y baja recuperación según rangos porcentuales de recuperación que se especifican en la tabla 5.1. La definición de poblaciones se hace de forma arbitraria pero apoyada por quiebres observados en el gráfico.

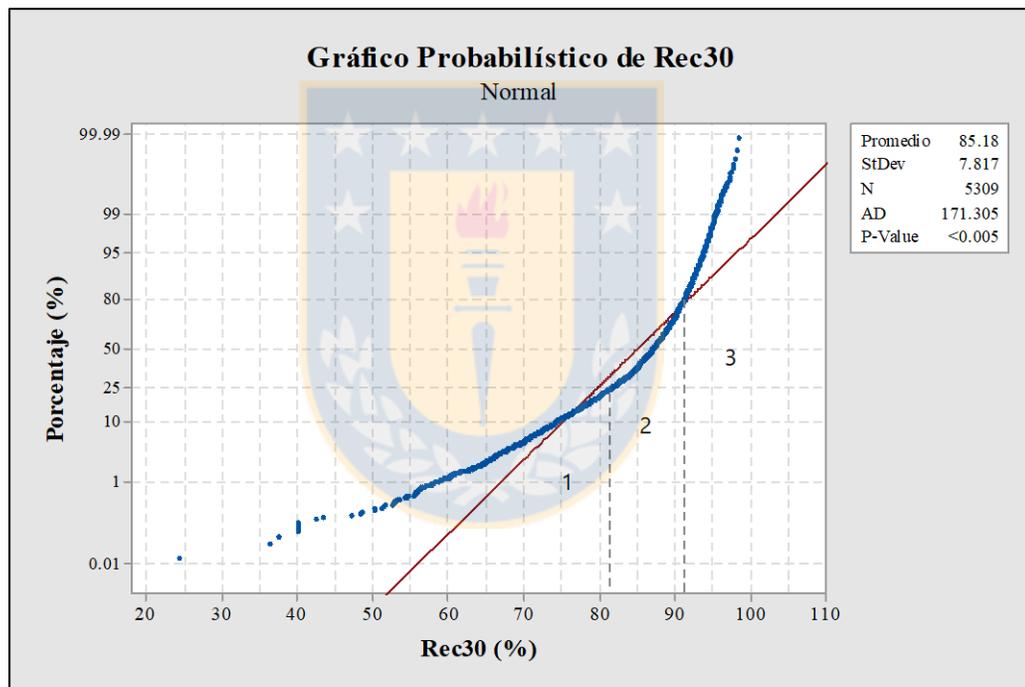


Figura 5.1 : Gráfico Probabilístico de la variable Rec30. Se muestra la definición de poblaciones según rangos determinados. Puntos azules representan cada una de las 5.309 observaciones. En rojo la línea de distribución normal.

Tabla 5. 1: Poblaciones de Recuperación definidas para interpretación de ACP.

Población	ID	Rango Rec. (%)	% Datos
Baja Recuperación	1	< 82	25
Media Recuperación	2	[82 – 91,5)	55
Alta Recuperación	3	≥ 91,5	20

Una vez definidas las poblaciones, se procede a realizar el ACP, cuyos resultados se interpretarán mediante el análisis de los gráficos *Score* y *Loading*. Estos gráficos permiten realizar asociaciones relevantes para la problemática de recuperación, de acuerdo a la distribución de las poblaciones y su correlación con los 50 elementos químicos analizados. Se debe recordar la naturaleza global de este análisis, cuyo objetivo es identificar tendencias o patrones en los datos que sean de utilidad para el estudio.

5.3.1.2. ACP: *Score Plot*

En la figura 5.2 se presenta el *Score Plot* generado por el ACP para las 5.309 observaciones disponibles, considerando la totalidad de las variables reportadas mediante ICP. La utilidad de este gráfico radica en la identificación de la componente de interés para la problemática planteada, es decir, se debe determinar qué componente es la que clasifica correctamente las poblaciones de recuperación. Para ello, se muestran en diferentes colores las poblaciones de baja, media y alta recuperación definidas en base a los límites descritos anteriormente. Los colores azul, amarillo y rojo indican las poblaciones de alta, media y baja recuperación respectivamente.

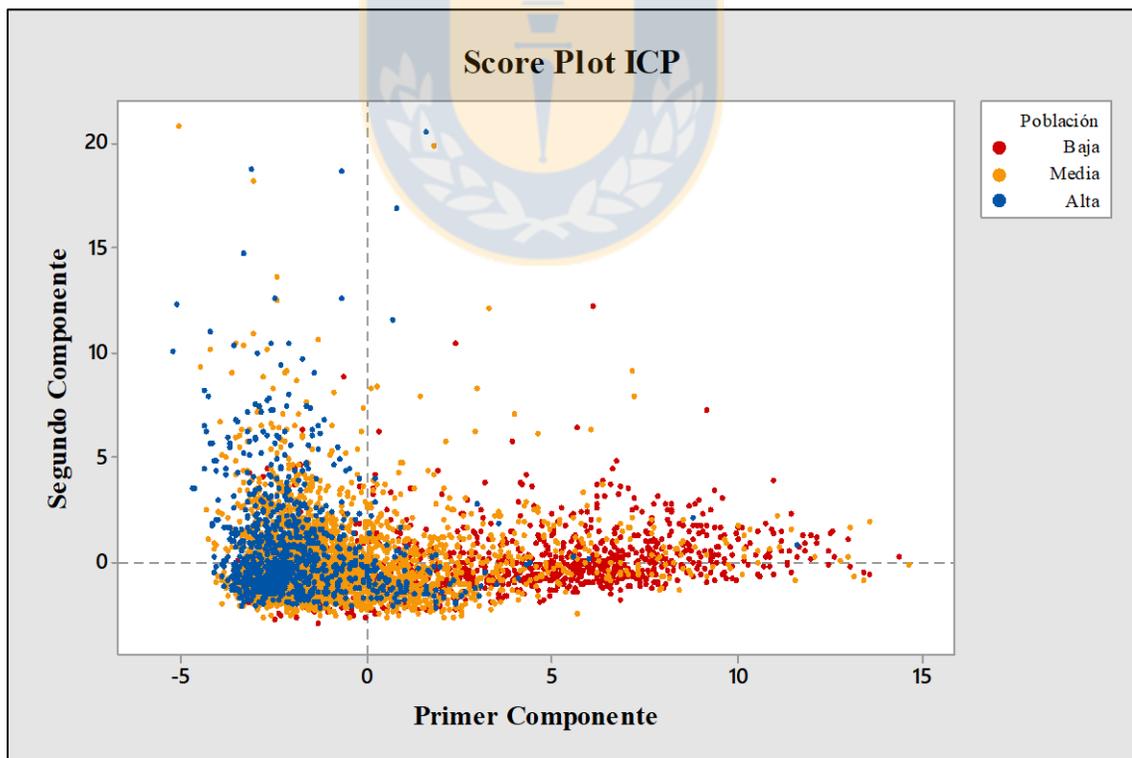


Figura 5.2 : *Score Plot* ICP filtrado por poblaciones de recuperación. Notar distribución de la población roja, correspondiente a baja recuperación, hacia el extremo positivo del primer componente.

Se observa que el primer componente (PC1) realiza una correcta clasificación de las poblaciones de alta y baja recuperación, pues ambas tienden a distribuirse a lados opuestos de este componente. En efecto, la población de alta recuperación se distribuye principalmente por el lado negativo del PC1 y la de baja recuperación por el lado positivo de éste, siendo notoria la dispersión que presentan los datos hacia aquella dirección en el gráfico. Por su parte, la población de media recuperación tiende a distribuirse tanto por el lado negativo y central del gráfico, sin embargo, para efectos del análisis esta población no tiene mayor relevancia pues lo que se busca es contrastar poblaciones opuestas, es decir, las de alta y baja recuperación.

Debido a que el segundo componente (PC2) muestra una nula separación de las poblaciones, se concluye que el PC1 es el componente de interés para la problemática de recuperación planteada, por lo que ahora se debe determinar cuáles son las variables químicas que más influyeron a la hora de construir el PC1, mediante el análisis del *Loading Plot*.

5.3.1.3. *Loading Plot*

En la figura 5.3 se presenta el *Loading Plot* generado por el ACP, en el cual se presentan las variables químicas que más influyen en ambas componentes. La distribución de las variables tiene directa relación con la distribución de las poblaciones observada en el *Score Plot*, por lo que ambos gráficos son complementarios a la hora de interpretar los resultados.

En la figura 5.3 se observa que existe un grupo de 9 elementos químicos que influyen fuertemente en el lado positivo del primer componente, cuyos vectores tienden a alejarse del resto de variables químicas y que están fuertemente correlacionados entre ellos. Esos elementos corresponden a Al, Ga, Mg, V, Li, P, Y, Be y Sc, los cuales se distribuyen en la misma dirección que la población de baja recuperación y por ende se asocian con ésta. Cabe destacar que estos mismos elementos son reconocidos por Cortés (2015) como aquellos relacionados a las andesitas en el rajo Escondida, y que permiten distinguirlas del resto de litologías. Por su parte, el vector asociado a la variable Cu se distribuye por el lado negativo del PC1 y por ende se relaciona con la población de alta recuperación, sin embargo, la pequeña magnitud de su vector indica que no influye fuertemente en el componente. De lo anterior se concluye que las variables más útiles para los objetivos de este estudio corresponden a aquellas que influyen fuertemente en el primer componente, y se relacionan con la población de baja recuperación.

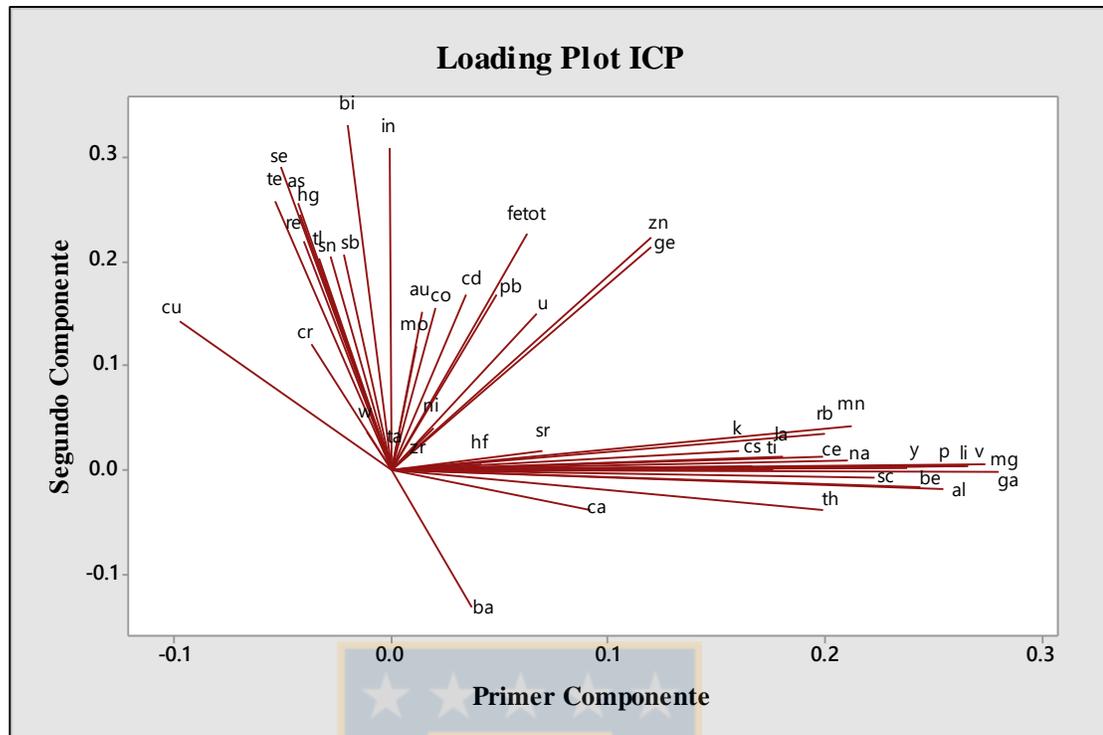


Figura 5.3 : *Loading Plot ICP.* Notar grupo de elementos químicos que influyen fuertemente en el extremo positivo del Primer Componente (Al, Li, Mg, Ga, V, Y, Sc, Be, P).

Una vez acotadas las variables químicas de interés para el estudio (Al, Ga, Mg, V, Li, P, Y, Be y Sc) se procede a calcular los coeficientes de correlación de Pearson de cada una de ellas con la variable Rec30, para determinar aquellas que presenten mayor correlación con la recuperación. En la tabla 5.2 se presenta una matriz de correlación que incluye estas variables químicas y la variable Rec30, donde se resaltan en rojo los coeficientes $< -0,5$.

Tabla 5.2: Matriz de correlación de Pearson para variable Rec30 y elementos químicos.

	rec30	Al	Be	Ga	Li	Mg	P	Sc	V	Y
rec30	1									
Al	-0,610	1								
Be	-0,517	0,713	1							
Ga	-0,536	0,897	0,769	1						
Li	-0,573	0,866	0,729	0,905	1					
Mg	-0,541	0,873	0,737	0,944	0,952	1				
P	-0,528	0,763	0,759	0,827	0,837	0,843	1			
Sc	-0,411	0,733	0,556	0,747	0,653	0,695	0,596	1		
V	-0,498	0,847	0,662	0,912	0,846	0,898	0,750	0,838	1	
Y	-0,480	0,648	0,771	0,725	0,718	0,734	0,726	0,575	0,685	1

Se observa que, en general, los elementos químicos y la variable Rec30 presentan coeficientes de correlación bajos con valores absolutos menores a 0,7 siendo los elementos Al, Li, Mg y Ga los que presentan la mayor correlación negativa con la variable Rec30, destacándose también el alto grado de correlación positiva entre estos 4 elementos ($>0,8$), lo que sugiere que éstos se encuentran midiendo un mismo parámetro geológico. La interrogante que surge ahora es determinar cómo a partir de estas 4 variables químicas asociadas a bajas recuperaciones se puede obtener la mayor información posible para la problemática de estudio. Para ello se opta por la estadística univariable, mediante el análisis de *boxplots* para cada uno de estos 4 elementos químicos.

5.3.2. Análisis de *Boxplots*

5.3.2.1. *Boxplots de Rendimiento*

Para poder cuantificar, de forma global, el efecto de los elementos químicos asociados a bajas recuperaciones sobre el proceso metalúrgico, se opta por la utilización de un tipo de gráfico que denominaremos “*Boxplot* de Rendimiento”, en el cual se grafica la recuperación obtenida en pruebas metalúrgicas versus deciles de un elemento químico en particular, como se muestra a continuación, tomando como ejemplo el aluminio. En estos gráficos, los porcentajes de recuperación se ubican en el eje de las ordenadas y los deciles de elementos se ordenan de forma creciente en el eje de las abscisas, siendo el primer decil aquel que presenta los menores contenidos del elemento analizado, y el último decil el que presenta los mayores contenidos (tabla 5.3).

Tabla 5.3 : Deciles de aluminio y sus respectivos rangos porcentuales

Decil	Rango Al (%)	Decil	Rango Al (%)
1	$<0,33$	6	$[0,64 - 0,74)$
2	$[0,33 - 0,41)$	7	$[0,74 - 0,88)$
3	$[0,41 - 0,48)$	8	$[0,88 - 1,14)$
4	$[0,48 - 0,56)$	9	$[1,14 - 1,70)$
5	$[0,56 - 0,64)$	10	$\geq 1,70$

En la figura 5.4 se muestra el *boxplot* de rendimiento del elemento aluminio, a modo de ejemplificar el uso de este tipo de gráficos.

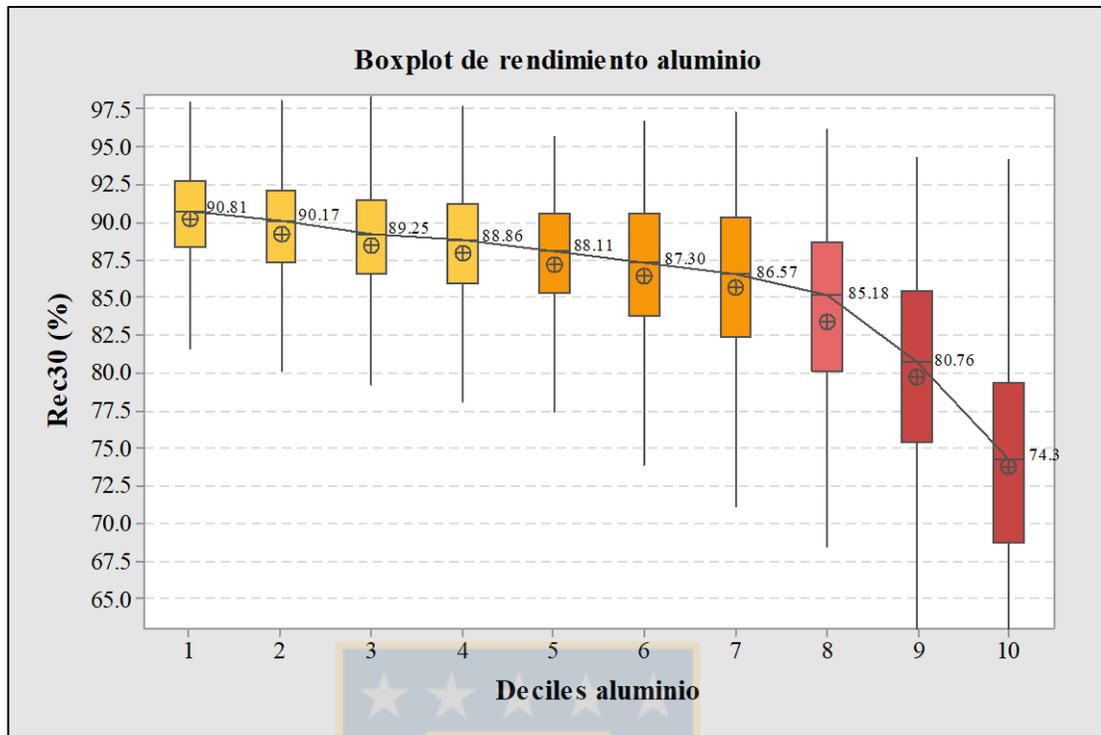


Figura 5.4 : *Boxplot* de rendimiento tomando como ejemplo el elemento aluminio. En cada *boxplot* la mediana se representa con una línea horizontal y la media aritmética con círculo y cruz. Notar comportamiento en deciles superiores.

Como se observa en la figura 5.4, cada decil está representado por un *boxplot*, el cual indica el valor de la mediana de recuperación del decil. A su vez, cada *boxplot* se encuentra unido al subsiguiente mediante una línea que conecta las medianas de dos deciles consecutivos. Esta línea es de suma importancia para el análisis, pues a partir de cambios notorios de su pendiente, se pueden detectar variaciones significativas en el rendimiento del proceso y, de esa forma, cuantificar de forma global el efecto sobre la recuperación del elemento analizado.

Considerando la figura 5.4, se observa que los 8 primeros deciles denotan una disminución sostenida pero moderada de las recuperaciones, sin variaciones significativas en la pendiente de la recta que une los deciles. Sin embargo, entre los deciles 8 y 9 se observa un notorio cambio de pendiente, y en consecuencia, una brusca disminución de las medianas de recuperación por lo que se concluye que entre aquellos deciles, el aluminio comienza a suponer una disminución crítica de la recuperación. De esta forma, es posible definir un dominio de baja recuperación a partir de los últimos dos deciles de aluminio e, incluso, mediante un análisis más detallado de los deciles

intermedios es posible definir dominios de alta y media recuperación, para así caracterizar de forma global el rajo.

5.3.2.2. *Dominios de Recuperación*

Se propone definir dominios de alta, media y baja recuperación según variaciones significativas detectadas en los *boxplots* de rendimiento, al analizar un elemento en particular. La definición de dominios permite caracterizar zonas del rajo según su rendimiento metalúrgico esperado por correlación con las variables químicas estudiadas.

En base a las revisiones realizadas a los *boxplots* de rendimiento de los elementos Al, Li, Mg y Ga (Anexo A), se opta por la utilización del litio (Li) como variable para la definición de dominios de recuperación, debido a que su comportamiento facilita su determinación, como se verá a continuación.

5.3.2.3. *Litio (Li)*

El litio es un elemento químico alcalino que de acuerdo a la clasificación de Goldschmidt (1954) pertenece al grupo de los litófilos, presentando fuerte afinidad con el oxígeno, potencial bajo y facilidad para entrar en combinación con elementos afines. En cuanto a su comportamiento geoquímico, el litio es un elemento moderadamente incompatible el cual tiende a concentrarse en el fundido y eventualmente es removido por cristalización tardía de minerales o por la exsolución de una fase fluida, por lo que concentraciones altas de este elemento suelen estar asociadas a rocas de composiciones ácidas por sobre las básicas o intermedias. No obstante lo anterior, estudios geoquímicos realizados en rocas volcánicas e intrusivas cercanas al área de estudio (Campano y Guerra, 1979; Guerra y Campano, 1997) han detectado valores anormalmente altos de Li en las andesitas de la Fm. Augusta Victoria y un empobrecimiento de este elemento en rocas intrusivas circundantes. Los autores atribuyen esta anomalía a una mayor proporción de ferromagnesianos en las andesitas en comparación con los intrusivos del distrito Escondida, lo cual tiene relación con la tendencia del Li a sustituir al Mg en minerales formadores de roca (anfíboles, micas, piroxenos) debido a la similitud de los radios iónicos de ambos elementos (Seitz y Woodland, 2000). Hechas estas aseveraciones, se presenta en la figura 5.5 el *boxplot* de rendimiento para la variable Rec30 a partir del elemento Li.

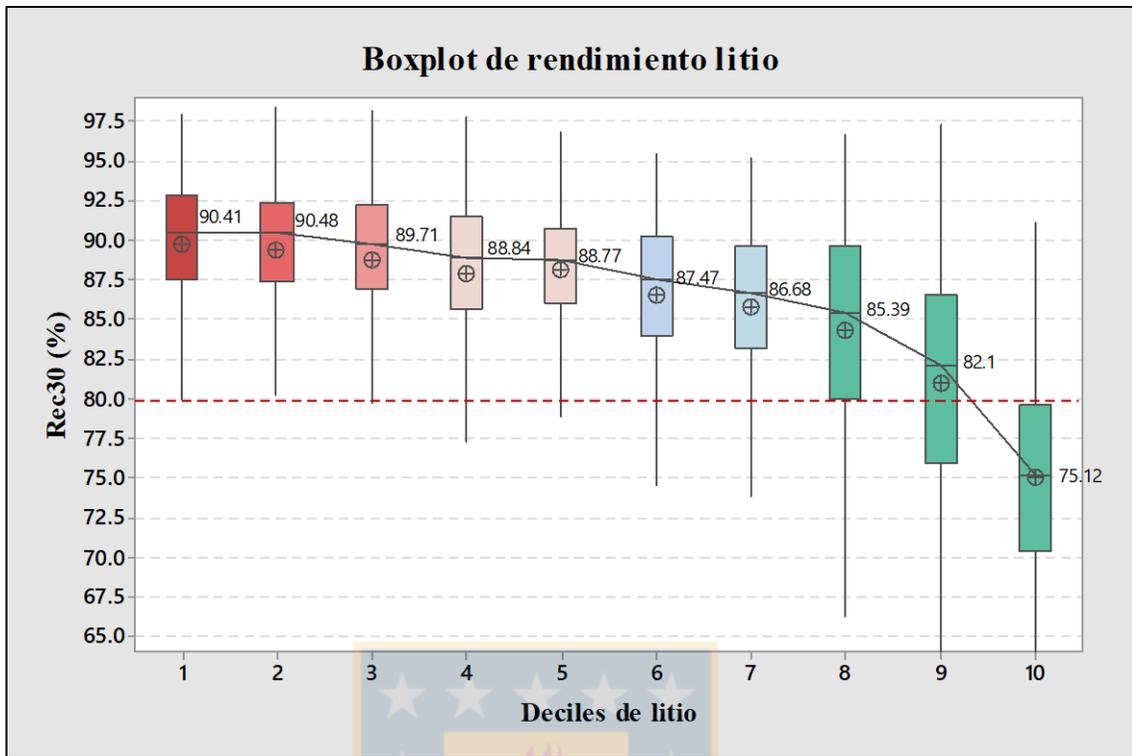


Figura 5.5 : *Boxplot* de rendimiento del elemento litio. Línea roja indica 80% de recuperación. Se observa una disminución acentuada de las recuperaciones a partir de los últimos dos deciles.

Se advierte que los primeros 5 deciles denotan una sostenida pero leve disminución de las recuperaciones, lo cual se ajusta a un dominio de alta recuperación. Por su parte, a partir del decil 5 se observa un quiebre notorio de la recta, con una disminución más acentuada de las recuperaciones hasta el decil 8, lo cual se condice con un dominio de media recuperación. Por último, entre los deciles 8 y 9 se observa una disminución crítica de las recuperaciones, por lo que se definen los últimos dos deciles como dominio de baja recuperación.

Ahora bien, se hace de utilidad poder definir de forma más detallada el dominio de baja recuperación, puesto que es justamente ésta la problemática central de la investigación. Para ello se propone ampliar el detalle de los últimos 4 deciles del *boxplot* de rendimiento del Li, recalculando nuevos deciles a partir del séptimo decil del gráfico. En la figura 5.6 se presenta el gráfico obtenido ampliando los 4 últimos deciles y en la tabla 5.4 los rangos de Li de los nuevos deciles.

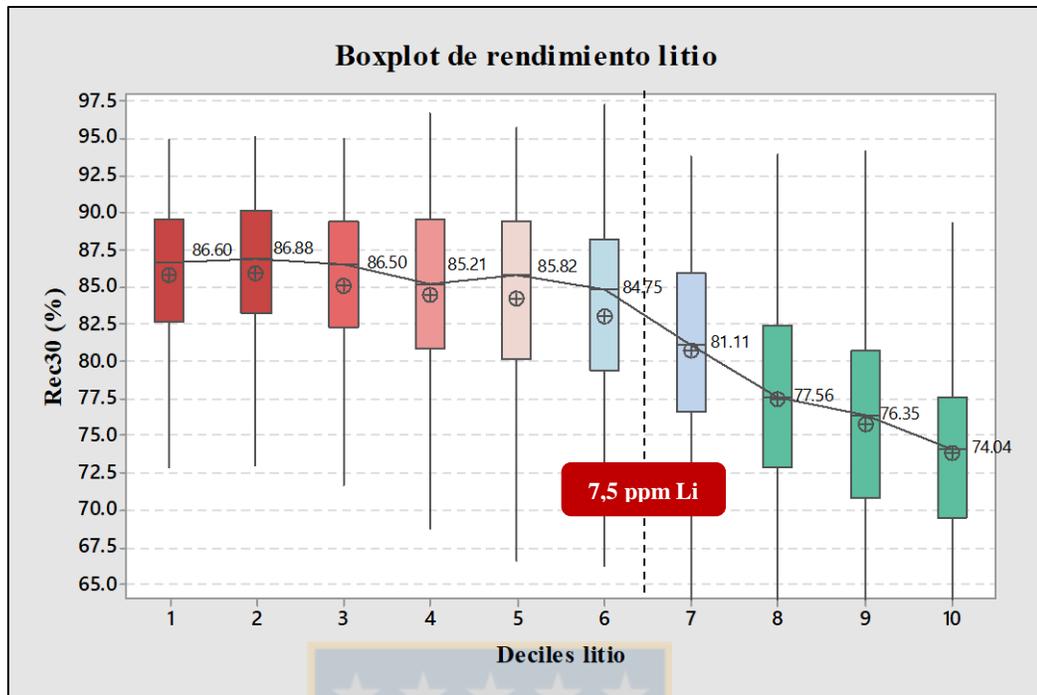


Figura 5.6 : *Boxplot* de rendimiento de litio, ampliando últimos deciles. Notar disminución crítica de las recuperaciones entre los deciles 6 y 7.

Tabla 5.4 : Deciles ampliados de litio y sus respectivos rangos en ppm

Decil	Rango Li (ppm)	Decil	Rango Li (ppm)
1	<1,6	6	[5,4 – 7,5)
2	[1,6 – 2,2)	7	[7,5 – 11,2)
3	[2,2 – 3,1)	8	[11,2 – 14,86)
4	[3,1 – 4,0)	9	[14,86 – 19,1)
5	[4,0 – 5,4)	10	≥19,1

Se observa un notorio quiebre de la recta entre el sexto y el séptimo decil, lo que trae consigo una brusca disminución de las recuperaciones evidenciada por una caída de casi 4% en las medianas de recuperación. En virtud de esto, el dominio de baja recuperación queda definido por los deciles 7, 8, 9 y 10, es decir, todos aquellos valores de Li mayores o iguales a 7,5 ppm.

Una vez definido el dominio de baja recuperación, se procede a definir los dominios de alta y media recuperación. Para ello, se amplían los deciles intermedios de la figura 5.5, es decir los deciles 4, 5, 6 y 7 para obtener mayor detalle y analizar si es que existen algún quiebre notorio en la pendiente de la línea que permita definir el límite entre los dominios de alta y media

recuperación. En la figura 5.7 se presenta el gráfico obtenido y en la tabla 5.5 los rangos de los nuevos deciles. Cabe destacar que se generan solamente 9 deciles, ya que el 20% de los datos menores corresponden al valor 0,5 ppm Li y, por lo tanto, se agrupan en el primer decil.

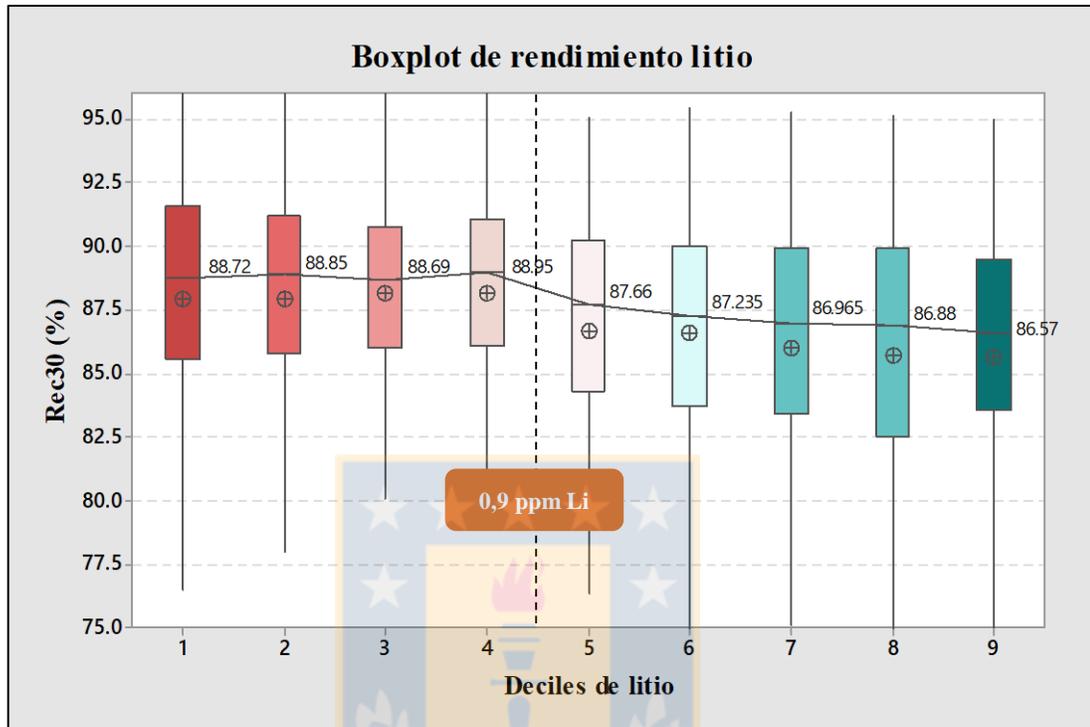


Figura 5.7 : Boxplot de rendimiento de litio considerando deciles intermedios. Notar quiebre de la recta entre los deciles 4 y 5.

Tabla 5.5: Deciles Intermedios de litio con sus respectivos rangos en ppm.

Decil	Rango Li (ppm)	Decil	Rango Li (ppm)
1	<0,6	6	[1,0 – 1,2)
2	[0,6 – 0,7)	7	[1,2 – 1,5)
3	[0,7 – 0,8)	8	[1,5 – 2,0)
4	[0,8 – 0,9)	9	≥2,0
5	[0,9 – 1,0)		

Se observa un quiebre de la recta entre los deciles 4 y 5, lo que trae como consecuencia una moderada disminución de las recuperaciones a partir del quinto decil. Luego, se define como límite de los dominios de alta y media recuperación el valor 0,9 ppm de Li (valor común entre ambos deciles). De esta forma, quedan así definidos los dominios de recuperación para el Rajo Escondida a partir del elemento químico litio (tabla 5.6)

Tabla 5.6: Dominios de recuperación a partir del elemento litio.

Dominio de Recuperación	Rango Li (ppm)
Alta Recuperación	<0,9
Media Recuperación	[0,9 – 7,5)
Baja Recuperación	≥7,5

5.3.2.4. Continuidad espacial de los dominios de recuperación

En este apartado se busca evaluar si es que los dominios de recuperación definidos presentan continuidad espacial en el rajo Escondida. De presentar continuidad espacial, se analizará si los dominios guardan relación con parámetros geológicos como litología y alteración.

Para resolver estas interrogantes, se procede a graficar en el *software Vulcan* los valores históricos ICP de litio del rajo Escondida, filtrando por los dominios de recuperación definidos recientemente (Figura 5.8). Debido a la gran cantidad de registros, y para facilitar la visualización, se decide representar solamente los datos de una sección en planta, a la altura de la cota 2.750, la cual corresponde a una sección medianamente profunda y con zonas actualmente en explotación.

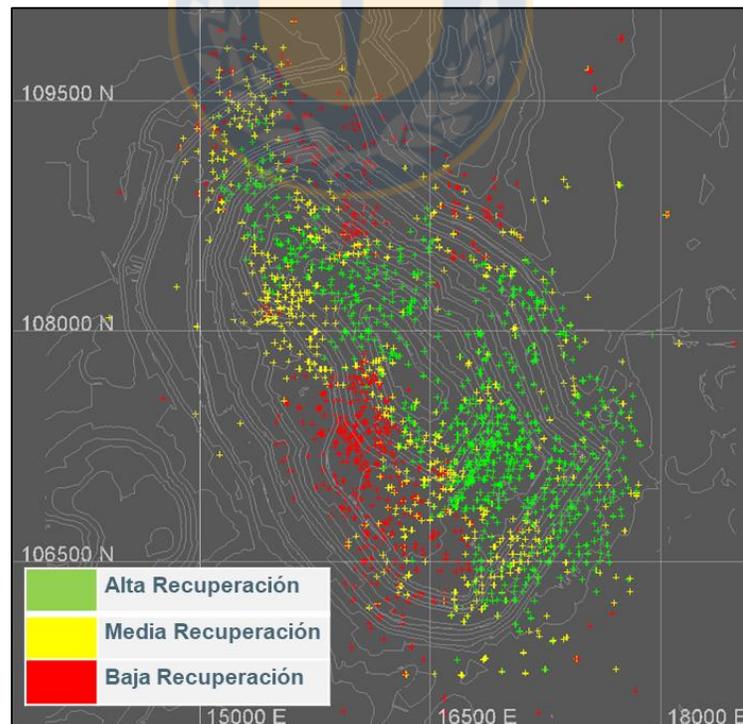


Figura 5.8 : Distribución espacial de dominios de recuperación a la altura de la cota 2.750.

Se observa que los dominios de recuperación efectivamente presentan continuidad espacial, distribuyéndose por distintas zonas del rajo. El dominio de baja recuperación (en rojo) se agrupa y distribuye en las zonas N y SW del rajo, mientras que los dominios de alta (verde) y media (amarillo) recuperación se distribuyen por la zona central del rajo, en una franja de orientación NW-SE. La interrogante que surge ahora es determinar si los dominios de recuperación se encuentran controlados por factores geológicos.

En la figura 5.9 se presenta una comparación mediante una vista en planta de la cota 2.750 de los dominios de recuperación versus el modelo geológico actualizado a Octubre de 2017. En lo referente al factor litológico, se advierte que el dominio de baja recuperación coincide con una parte importante de las andesitas, mientras que el dominio de alta recuperación tiende a coincidir con la distribución del Pórfido Feldespático y Pórfido Cuarzífero. El dominio de media recuperación, a su vez, pareciera estar relacionado a la ocurrencia del Pórfido Feldespático Tardío y zonas de contacto entre andesitas y el pórfido feldespático.

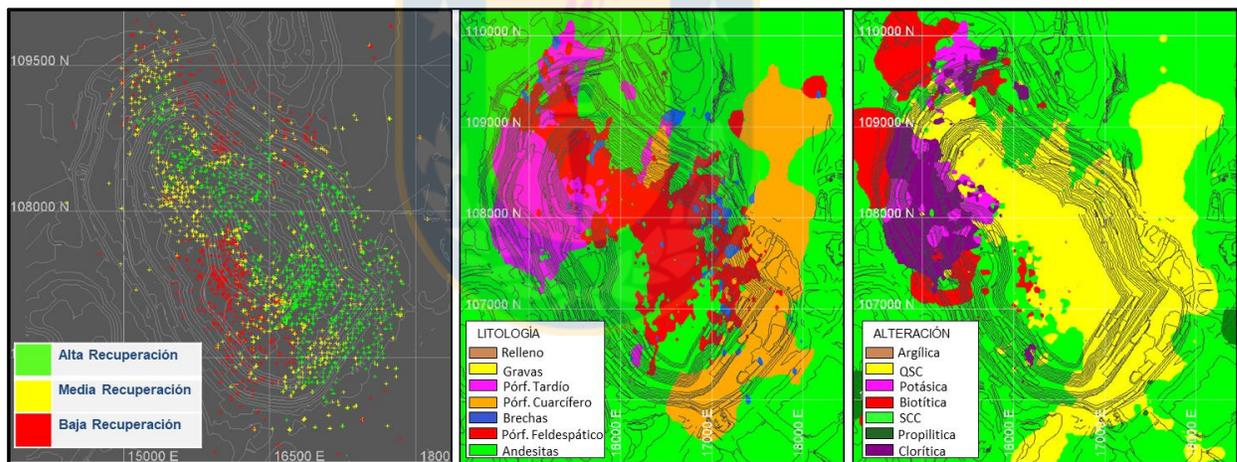


Figura 5.9 : Vistas en planta a la cota 2.750 de los dominios de recuperación (izq.) versus modelo geológico de litología (centro) y alteración (der.) del rajo Escondida.

Este análisis se condice con los resultados obtenidos en el Capítulo 4, al analizar el comportamiento de cada litología sobre la recuperación, donde las andesitas eran indicadas como la litología más perjudicial para el proceso. No obstante lo anterior, se advierte en la zona S del rajo la ocurrencia de andesitas con alteración QSC pertenecientes al dominio de alta recuperación, lo cual sugiere que no todas las andesitas ejercen un efecto perjudicial para el proceso, dependiendo de la alteración que presenten.

En cuanto al factor alteración, éste pareciera ejercer un control más evidente que la litología sobre los dominios de recuperación debido a la notoria coincidencia entre estos últimos y la distribución de las distintas alteraciones presentes en el rajo. En ese sentido, las alteraciones SCC y Biotítica muestran una clara correlación espacial con el dominio de baja recuperación, mientras que la alteración QSC coincide con la distribución del dominio de alta recuperación. El dominio de media recuperación, por su parte, se encuentra relacionado a la alteración potásica y zonas de transición entre las alteraciones SCC y QSC.

Todo lo anterior se condice con los resultados obtenidos en el Capítulo 4, al analizar el efecto de las alteraciones sobre la recuperación, donde se señalaba a las alteraciones SCC y Biotítica como las más perjudiciales para el proceso. Otro punto a considerar, es que no existen zonas discordantes como para el caso de la litología, donde una porción de las andesitas (aquellas alteradas a QSC) se relacionaban con el dominio de alta recuperación. Así, se comprueba que los dominios de recuperación guardan relación con parámetros geológicos y se procede a analizar la variable mSPI.

5.4. ANÁLISIS DEL *modified SAG POWER INDEX* (mSPI)

5.4.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

5.4.1.1. *Definición de Poblaciones*

Para facilitar la interpretación de las herramientas gráficas del ACP, se procede a definir 3 poblaciones de mSPI a partir de los 5.300 datos disponibles. Mediante el gráfico probabilístico de la variable mSPI (figura 5.10), se definen las poblaciones de alto, medio y bajo mSPI según rangos de este índice que se especifican en la tabla 5.7. La definición de poblaciones se hace de forma arbitraria pero apoyada por quiebres observados en el gráfico.

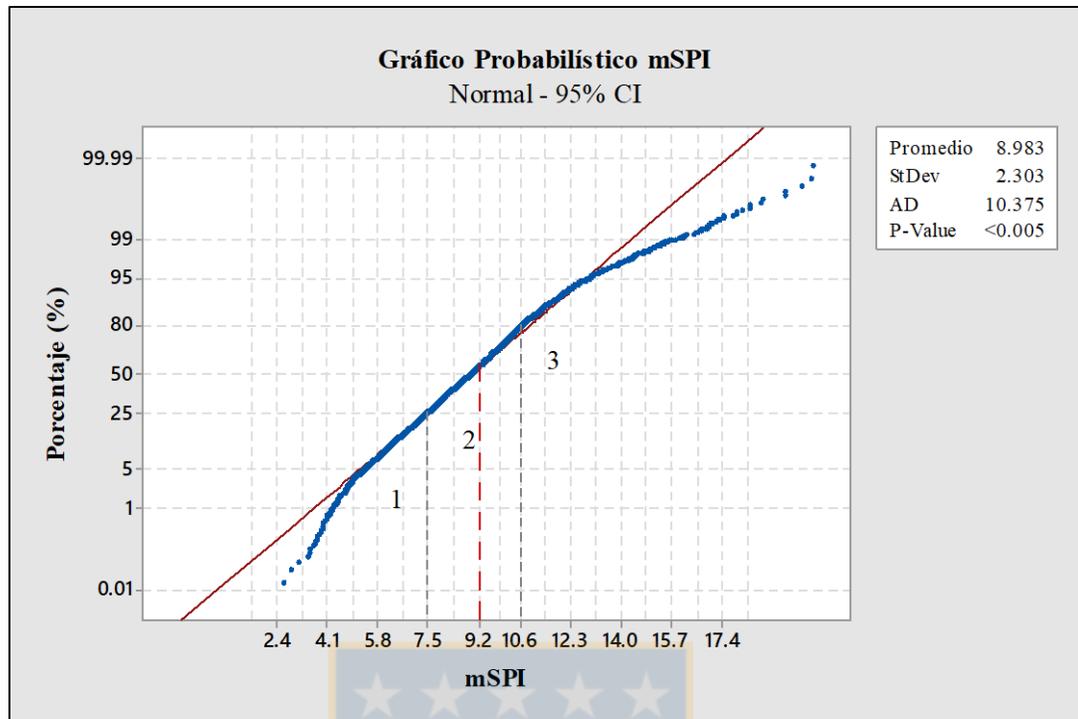


Figura 5.10 : Gráfico Probabilístico de variable mSPI. Se muestra la definición de las poblaciones de mSPI de acuerdo a rangos determinados y se incluye valor de diseño de molino SAG (9,2 mSPI). Puntos azules representan cada una de las 5.309 observaciones y en rojo la línea de distribución normal.

Tabla 5.7: Poblaciones de mSPI definidas para interpretación de ACP

Población	ID	Rango mSPI	% Datos
Bajo mSPI	1	< 7,5	25
Medio mSPI	2	[7,5 – 10,6)	55
Alto mSPI	3	≥10,6	20

Una vez definidas las poblaciones de mSPI, se procede a realizar el ACP, cuyos resultados son interpretados mediante los gráficos *Score* y *Loading*.

5.4.1.2. ACP: Score Plot

En la figura 5.11 se presenta el *Score Plot* generado por el ACP, filtrando por las poblaciones de mSPI definidas en el apartado anterior. Los colores rojo, amarillo y azul indican las poblaciones de alto, medio y bajo mSPI respectivamente.

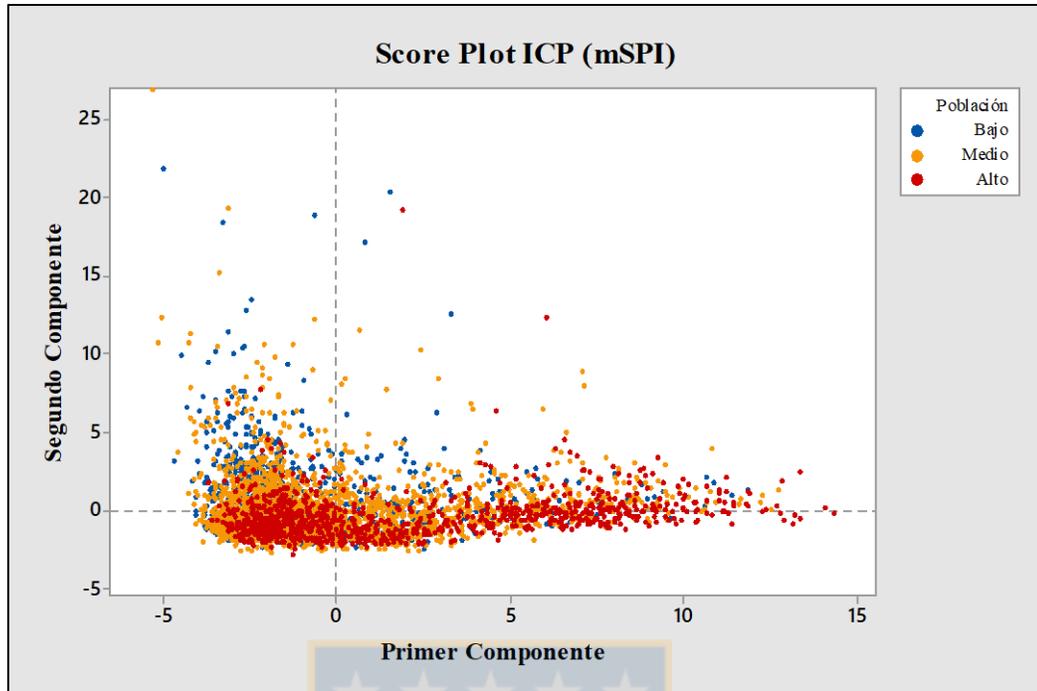


Figura 5.11 : *Score Plot* ICP filtrado por poblaciones de mSPI. Queda en evidencia un notorio traslape de las poblaciones

A diferencia del resultado obtenido para la recuperación, en el *Score Plot* de mSPI se observa un marcado traslape o solapamiento de las poblaciones no lográndose una separación efectiva de las mismas. Esto sugiere que la variable mSPI presenta una baja correlación con las variables químicas obtenidas por ICP. No obstante lo anterior, se advierte una tendencia del dominio de alto mSPI (población roja) a distribuirse hacia el lado positivo del primer componente, por lo que se decide tomar en consideración para posterior análisis a todas las variables químicas distribuidas en aquella dirección en el *Loading Plot*.

5.4.1.3. ACP: *Loading Plot*

En la figura 5.12 se presenta el *Loading Plot* generado por el ACP, en el cual se presentan las variables químicas que más influyen en ambas componentes. Cobran relevancia para el análisis las variables distribuidas en la misma dirección que el dominio de alto mSPI en el *Score Plot* (figura 5.11), es decir, el grupo de 21 variables químicas distribuidas hacia el lado positivo del primer componente (Al, Li, Mg, Ga, V, P, Be, Sc, Y, Ce, La, Na, Th, K, Cs, Ti, Rb, Mn, Hf, Sr, Ca).

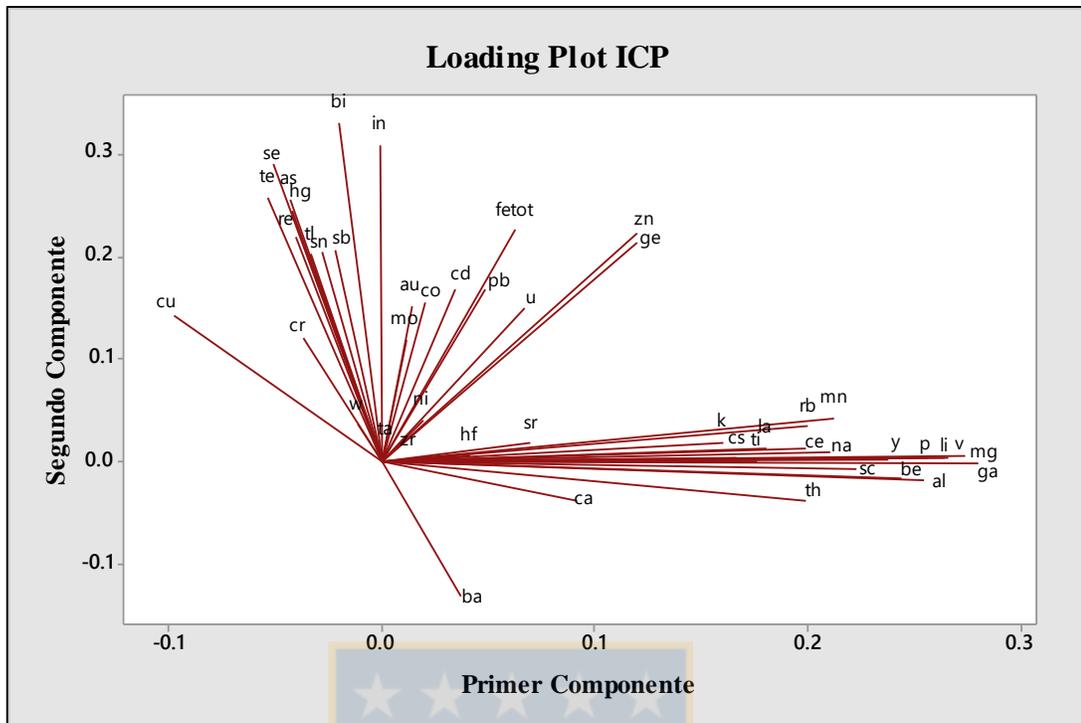


Figura 5.12 : *Loading Plot ICP.* Notar grupo de elementos químicos que influyen fuertemente en el lado positivo del primer componente.

A continuación, se procede a calcular los coeficientes de correlación de Pearson de cada una de estas variables con el mSPI, para determinar aquellas que tengan mayor relación con este índice. En el anexo B se presenta la matriz de correlación completa mientras que en la tabla 5.8 se muestra una matriz resumen con las 8 variables químicas que presentan mayor coeficiente de correlación con la variable mSPI.

Tabla 5.8: Matriz de correlación de Pearson para variable mSPI y elementos químicos.

	mSPI	Al	Ca	Ga	Li	Mg	P	Th	V
mSPI	1								
Al	0,279	1							
Ca	0,294	0,186	1						
Ga	0,328	0,903	0,287	1					
Li	0,298	0,872	0,257	0,907	1				
Mg	0,320	0,880	0,295	0,946	0,952	1			
P	0,292	0,771	0,315	0,832	0,840	0,846	1		
Th	0,292	0,424	0,260	0,581	0,495	0,538	0,564	1	
V	0,304	0,850	0,270	0,913	0,846	0,898	0,752	0,455	1

Se observa que todos los coeficientes de correlación entre el mSPI y las variables químicas presentan valores menores a 0,5, lo que implica una correlación débil y estadísticamente no significativa. Esto último confirma lo planteado en el *Score Plot*, respecto a la baja correlación entre los elementos químicos y el mSPI. No obstante, en base a la revisión de *boxplots* de rendimiento de mSPI para cada uno los elementos indicados en la tabla 5.8 (Anexo A), se opta por la utilización del calcio como variable para la determinación de dominios de mSPI, ya que su comportamiento en estos gráficos lo convierte en un claro indicador de rocas de alto mSPI.

5.4.2. Análisis de *Boxplots*

5.4.2.1. Calcio (Ca)

En la figura 5.13 se presenta el *boxplot* de rendimiento del Ca para la variable mSPI. Debido a la gran cantidad de datos existentes con valores $\leq 0,02$ % Ca, se decide agrupar todos estos en un primer grupo que abarca el 30% de los datos (decil 1). Este agrupamiento no afecta mayormente el análisis pues la importancia del gráfico radica en los deciles superiores. Se incluye en el gráfico una línea roja segmentada que indica el valor 9,2 mSPI, el cual corresponde al valor de diseño del molino SAG para la planta Laguna Seca.

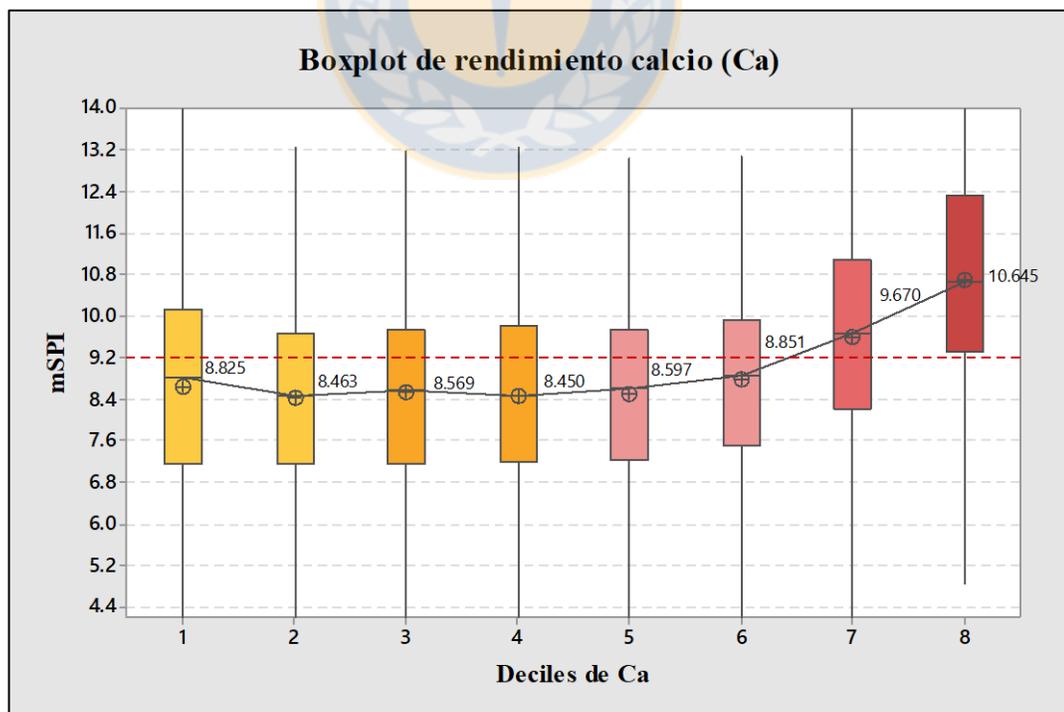


Figura 5.13 : *Boxplot* de rendimiento de calcio. Notar aumento de los valores de mSPI en los últimos dos deciles.

Se aprecia un brusco aumento de los valores de mSPI en los últimos dos deciles, siendo claro el quiebre de pendiente que presenta la recta entre los deciles 6 y 7. Por esta razón, se decide ampliar el detalle del gráfico, recalculando nuevos deciles a partir del quinto decil. Los rangos porcentuales de Ca de los nuevos deciles se detallan en la tabla 5.9 adjunta, y el *boxplot* de rendimiento resultante se presenta en la figura 5.14.

Tabla 5.9: Deciles de Calcio con sus respectivos rangos porcentuales.

Decil	Rango Ca (%)	Decil	Rango Ca (%)
1	<0,10	6	[0,23 – 0,29)
2	[0,10 – 0,12)	7	[0,29 – 0,37)
3	[0,12 – 0,15)	8	[0,37 – 0,49)
4	[0,15 – 0,18)	9	[0,49– 1,328)
5	[0,18 – 0,23)	10	≥1,328

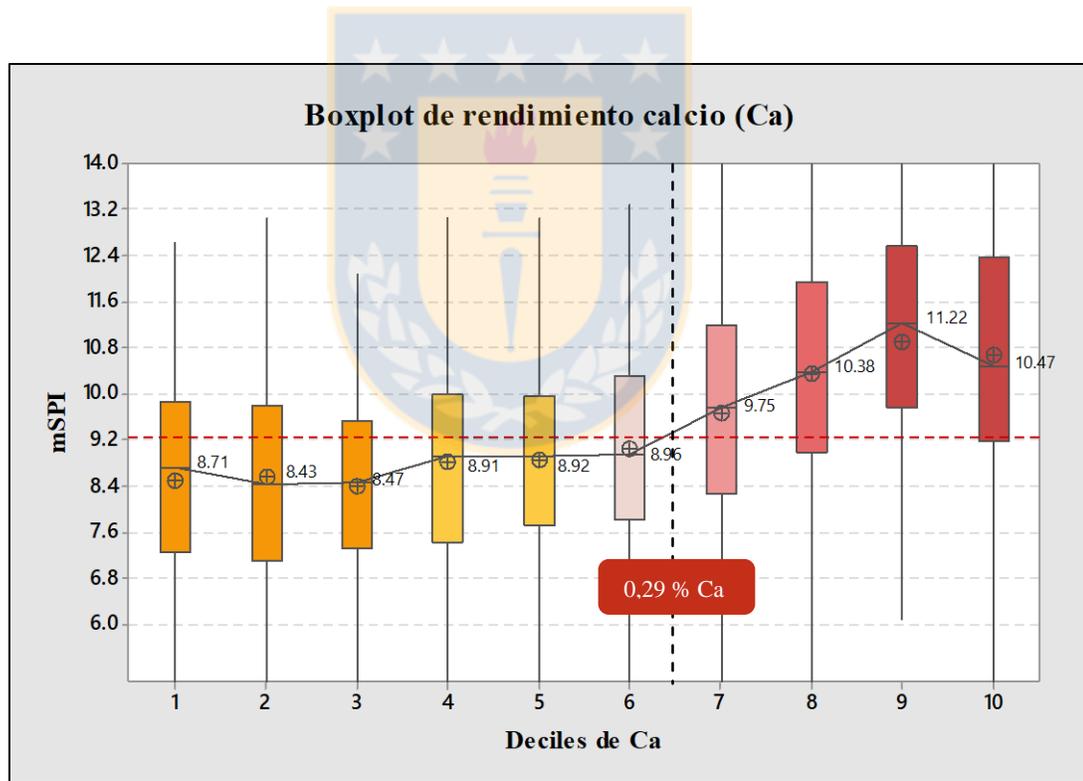


Figura 5.14 : *Boxplot* de rendimiento de calcio, ampliando últimos 4 deciles. Notar quiebre de la línea entre los deciles 6 y 7.

Se aprecia un notorio quiebre de la recta entre los deciles 6 y 7, provocando un brusco aumento de los valores de mSPI a partir del séptimo decil. Es también significativo el hecho de que

las cajas de los diagramas de los deciles 8, 9 y 10 se encuentren casi todas por sobre el valor de diseño del molino.

En virtud de lo anterior, el dominio de alto mSPI queda definido por los deciles 7, 8, 9 y 10, es decir, todos aquellos valores de Ca mayores o iguales a 0,29%. Por el contrario, no fue posible definir un dominio de medio mSPI debido a que tanto los deciles intermedios como iniciales muestran un comportamiento muy similar, sin quiebres notorios entre ellos. Así, se opta por definir solamente dos dominios: uno de alto mSPI y otro de bajo mSPI los cuales se especifican en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Dominios de mSPI a partir del elemento calcio (Ca).

Dominio de mSPI	Rango Ca (%)
Alto mSPI	$\geq 0,29$
Bajo mSPI	$< 0,29$

5.4.2.2. Continuidad espacial de los dominios de mSPI

En este apartado se procede a evaluar la continuidad espacial de los dominios de mSPI y su relación con parámetros geológicos como litología y alteración. En la Figura 5.15 se muestra una vista en planta a la cota 2.750 del rajo Escondida en la cual se grafican los datos ICP históricos de Ca, filtrando por los dominios de alto y bajo mSPI, representados por poblaciones de color rojo y verde respectivamente.

Se observa que los dominios efectivamente presentan continuidad espacial, distribuyéndose en zonas específicas del rajo. Salvo pequeñas diferencias, llama la atención la similitud entre la distribución del dominio de alto mSPI y el dominio de baja recuperación definido para la variable Li (figura 5.8), resultando de utilidad poder determinar qué fenómeno geológico es el causante de bajos rendimientos tanto en la molienda como en la flotación. Para resolver esta interrogante, en la figura 5.16 se presenta una comparación mediante una vista en planta de la cota 2.750 de los dominios de mSPI versus los modelos geológicos de litología y alteración actualizados a Octubre de 2017.

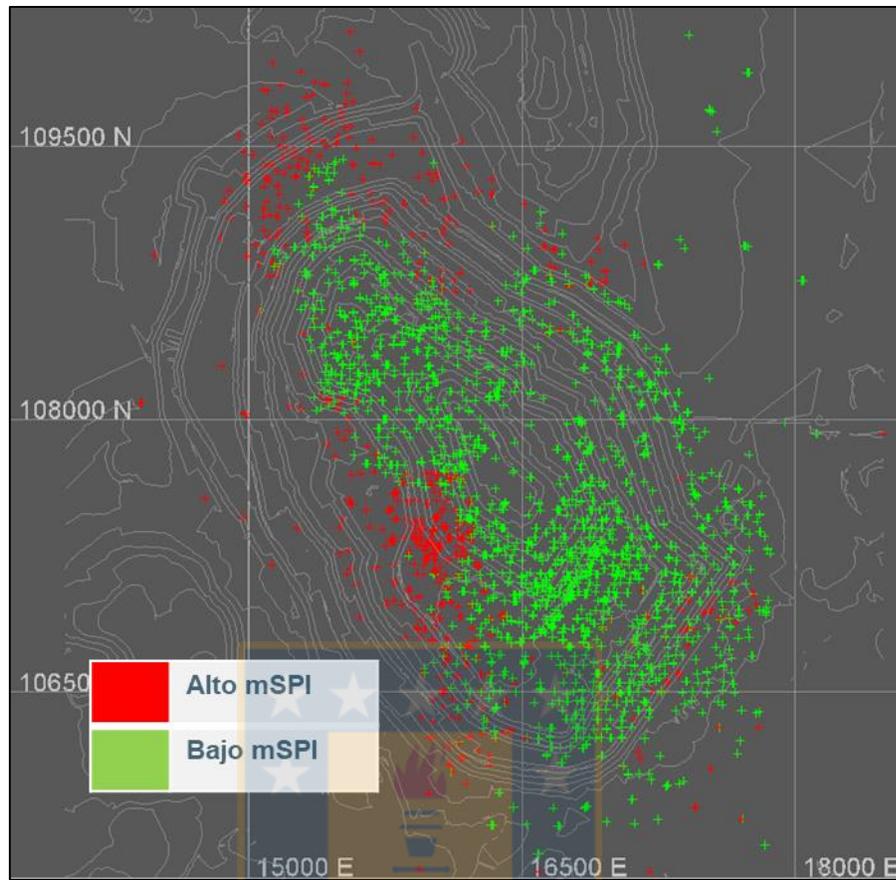


Figura 5.15 : Distribución espacial de los dominios de mSPI, a la altura de la cota 2.750.

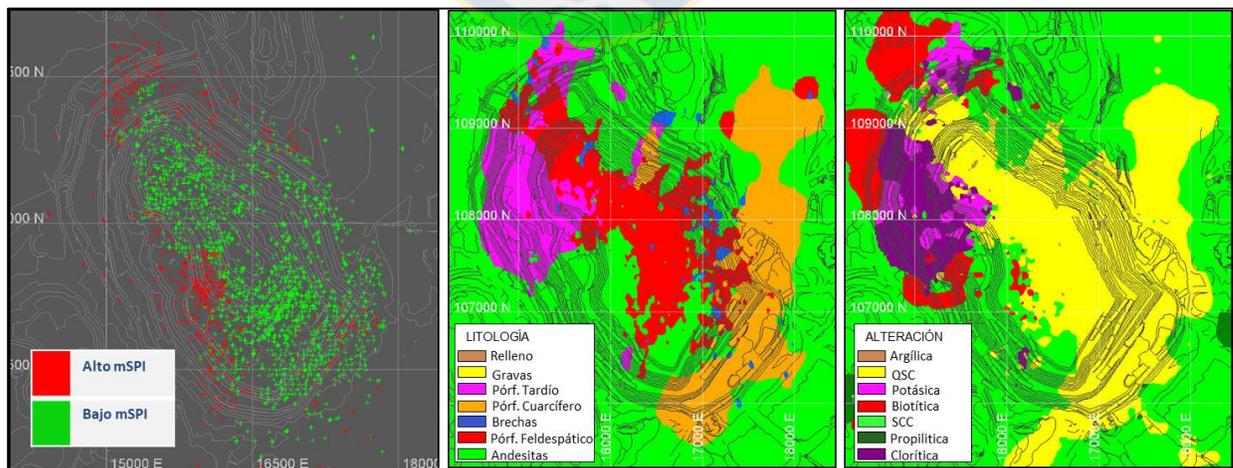


Figura 5.16 : Vistas en planta de los dominios de mSPI a la altura de la cota 2.750 (izq.) versus modelo de bloques de litología (centro) y alteración (der.) del rajo Escondida.

En lo que respecta al factor litológico, se advierte que el dominio de alto mSPI se encuentra relacionado con una parte mayoritaria de las andesitas, sin embargo, el factor alteración nuevamente pareciera ser más influyente, dado la correlación espacial entre la distribución de ambos dominios y las alteraciones reconocidas en el rajo. En efecto, se observa que el dominio de bajo mSPI se distribuye por sectores donde predomina la alteración QSC, en una franja de orientación NW-SE, mientras que el dominio de alto mSPI tiende a distribuirse en forma de un halo que envuelve al dominio de bajo mSPI, asociado a la ocurrencia alteraciones más alcalinas (SCC, Biotítica y Potásica). Esto último se condice con los resultados obtenidos en el Capítulo 4, al analizar el efecto de la alteración sobre el mSPI, donde quedaba en evidencia un claro control de este factor geológico sobre el índice de molienda.

Con lo anterior se comprueba que los dominios de mSPI tienen relación con parámetros geológicos y en el capítulo siguiente se procede al análisis de datos NIR.



6. CORRELACIÓN ENTRE DATOS NIR Y VARIABLES GEOMETALÚRGICAS

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se busca analizar el potencial de utilizar abundancias porcentuales de minerales de alteración, obtenidas semi-cuantitativamente mediante la metodología NIR, como variables independientes para la predicción del comportamiento metalúrgico en la planta concentradora, identificando aquellos minerales de alteración que exhiban la mayor correlación con los índices de recuperación y mSPI en los procesos de flotación y molienda respectivamente.

La metodología de trabajo comprende el mismo procedimiento que el capítulo anterior, es decir, la aplicación de las técnicas Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Correlación Múltiple (ACM) para la identificación de los minerales que muestren una relación estadísticamente significativa con el comportamiento metalúrgico, los cuales son luego analizados individualmente a través de diagrama de cajas para estimar su efecto global sobre los índices de recuperación y mSPI, y así poder definir en el rajo dominios de rendimiento metalúrgico.

6.2. BASES DE DATOS

La base de datos NIR utilizada en este estudio contiene la información histórica de sondeos realizados en el rajo Escondida hasta el mes de abril de 2016. Incluye 40.000 muestras analizadas por NIR, mediante la herramienta *LabSpec*, en un soporte de 15 metros. Cada registro incluye una estimación semi-cuantitativa de la abundancia porcentual de los minerales de alteración albita, alunita, biotita, clorita, sericita-muscovita, sericita gris verde y arcillas (caolín, pirofilita y esmectita), sin embargo, sólo se considerarán para el análisis los minerales biotita, clorita, sericita-muscovita y arcillas debido a que estos minerales son aquellos que presentan los modelos quimiométricos predictivos más robustos en la actualidad.

Debido que a más de la mitad de las muestras de pruebas metalúrgicas no cuentan con análisis NIR, se opta por utilizar el modelo de bloques geometalúrgico como base comparativa del análisis. El modelo geometalúrgico utiliza un método interpolador (*kriging*) para estimar las variables geometalúrgicas en el rajo a partir de los datos obtenidos de las pruebas metalúrgicas, lo que implica que los datos utilizados en este análisis están suavizados por esta interpolación. No obstante lo anterior, los resultados finales prácticamente no se ven afectados debido a que la

interpolación de las variables metalúrgicas se realiza a partir de las mismas pruebas metalúrgicas utilizadas en el capítulo anterior.

De esta forma, se compila la base de datos NIR con el modelo geometalúrgico, asignándole a cada muestra NIR la información metalúrgica correspondiente al bloque en el que se encuentra. Cada bloque del modelo incluye variables geometalúrgicas relevantes para el proceso metalúrgico tales como recuperación de Cu final, índices de molienda (mSPI y BWI), leyes de concentrado final y elementos menores en concentrado.

Así, se obtiene una base de datos final de aproximadamente 20.000 datos, donde cada registro presenta la estimación de la abundancia porcentual de los minerales de alteración mencionados, además de las variables mSPI y recuperación final para Planta Laguna Seca (r_fls). Cabe destacar que la variable r_fls se obtiene al aplicar un factor numérico a la variable Rec30, para emular las condiciones operativas de la planta y estimar las recuperaciones finales, incluyendo las etapas de flotación *cleaner* y *scavenger*.

Por último, se incluye también en la base de datos final el parámetro de alteración, extraído del modelo de bloques geológico, para verificar la representatividad por parte del método NIR de este factor.

6.3. FACTOR ALTERACIÓN

En este apartado se busca verificar estadísticamente la representatividad del factor alteración por parte de los datos NIR. Para ello se realizará un Análisis de Componentes Principales (ACP), filtrando por las 4 principales alteraciones presentes en el rajo Escondida, esto es, alteración QSC, SCC, Potásica y Biotítica.

6.3.1. ACP: Score Plot

En la figura 6.1 se presenta el *Score Plot* generado por el ACP al filtrar por las alteraciones antes mencionadas. Los colores amarillo, verde, morado y rojo representan las alteraciones QSC, SCC, Potásica y Biotítica respectivamente. Se observa que en general, las alteraciones QSC, SCC y Biotítica se encuentran representadas como poblaciones bien definidas. La alteración QSC se distribuye por el lado positivo del PC1, la SCC tanto por el lado central como negativo y, por último, la Biotítica por el extremo negativo del PC1.

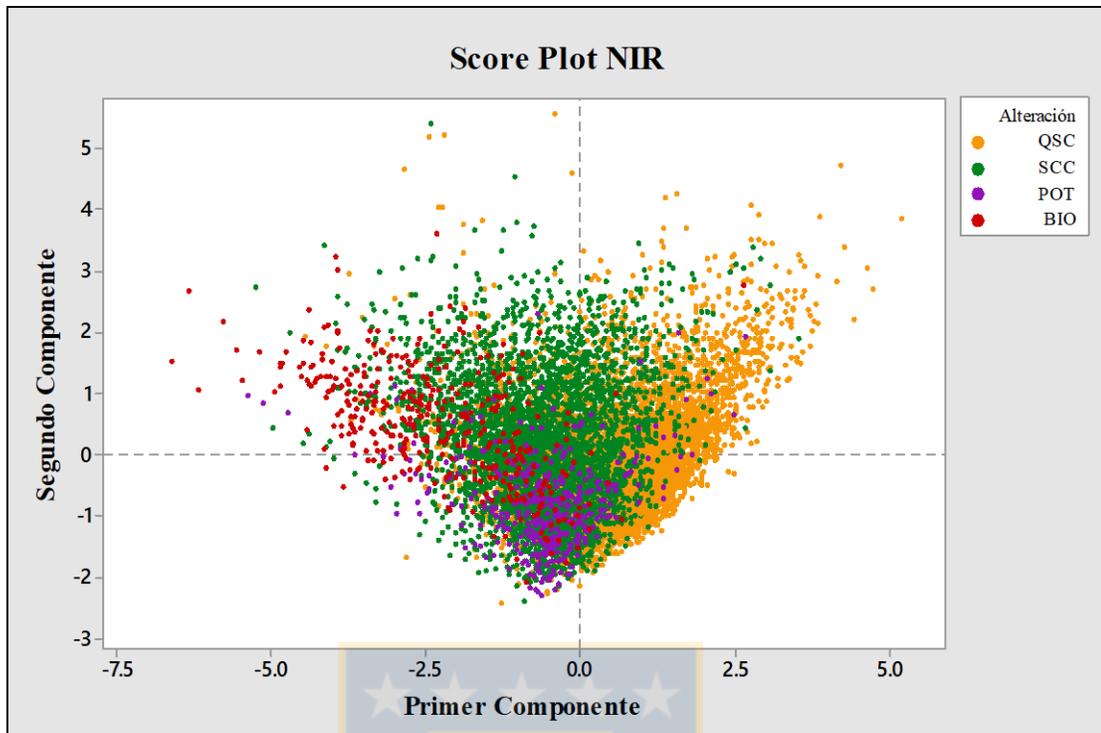


Figura 6.1: *Score Plot* NIR filtrado por alteraciones principales. Notar distribución de las alteraciones QSC, SCC y Biotítica

Por su parte, la alteración potásica no está bien representada, sino que se encuentra solapada con las otras alteraciones en la zona central del gráfico. Esto se debe a que el mineral característico de esta alteración, el feldespato potásico, emite longitudes de onda que se encuentran por sobre el espectro del infrarrojo cercano, por lo que el método NIR no es capaz de detectarlo (Hauff, 2008).

La interrogante que surge es determinar si los minerales de alteración considerados para este análisis, es decir, biotita, clorita, sericita-muscovita y arcillas se condicen con la distribución de las alteraciones observada en el *Score Plot*, lo cual se definirá analizando el *Loading Plot*.

6.3.2. ACP: Loading Plot

En la figura 6.2 se presenta el *Loading Plot* generado por el ACP, en el cual se presenta la distribución de las variables consideradas en este análisis.

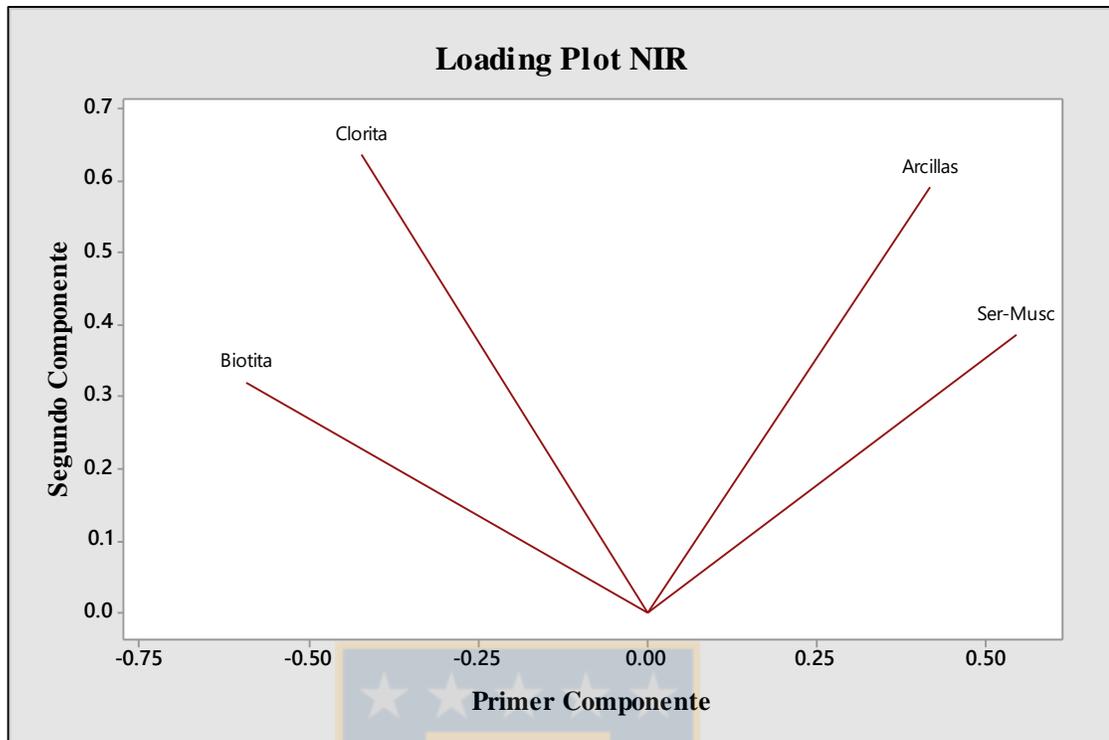


Figura 6.2 : *Loading Plot* donde se muestra la distribución de las variables NIR consideradas en el análisis.

Se aprecia que los minerales característicos de cada alteración coinciden con la distribución observada en el *Score Plot*. En ese sentido, las variables sericita-muscovita y arcillas delimitan correctamente la distribución de la alteración QSC, cuyos minerales característicos corresponden justamente a sericita, arcillas y cuarzo (este último no medible por NIR). Por su parte, las variables clorita y arcillas delimitan correctamente la distribución de la alteración SCC, cuyos minerales característicos corresponden a clorita, arcillas y menor sericita. Por último, la distribución de la variable biotita coincide con la distribución de la alteración biotítica

Con todo lo anterior se comprueba estadísticamente que los datos NIR representan correctamente el factor alteración y, por ende, se procede con los análisis de recuperación y mSPI.

6.4. ANÁLISIS DE RECUPERACIÓN

6.4.1. Análisis de Componentes Principales

6.4.1.1. ACP: Definición de poblaciones

Para facilitar la interpretación de las herramientas gráficas del ACP, se definen 3 poblaciones de recuperación a partir de los 20.976 datos disponibles. Las poblaciones quedan definidas según rangos porcentuales de recuperación, los cuales se determinan basándose en la presencia de quiebres observados en el gráfico probabilístico de la variable r_{fls} (figura 6.3). Las poblaciones definidas se especifican en la tabla 6.1.

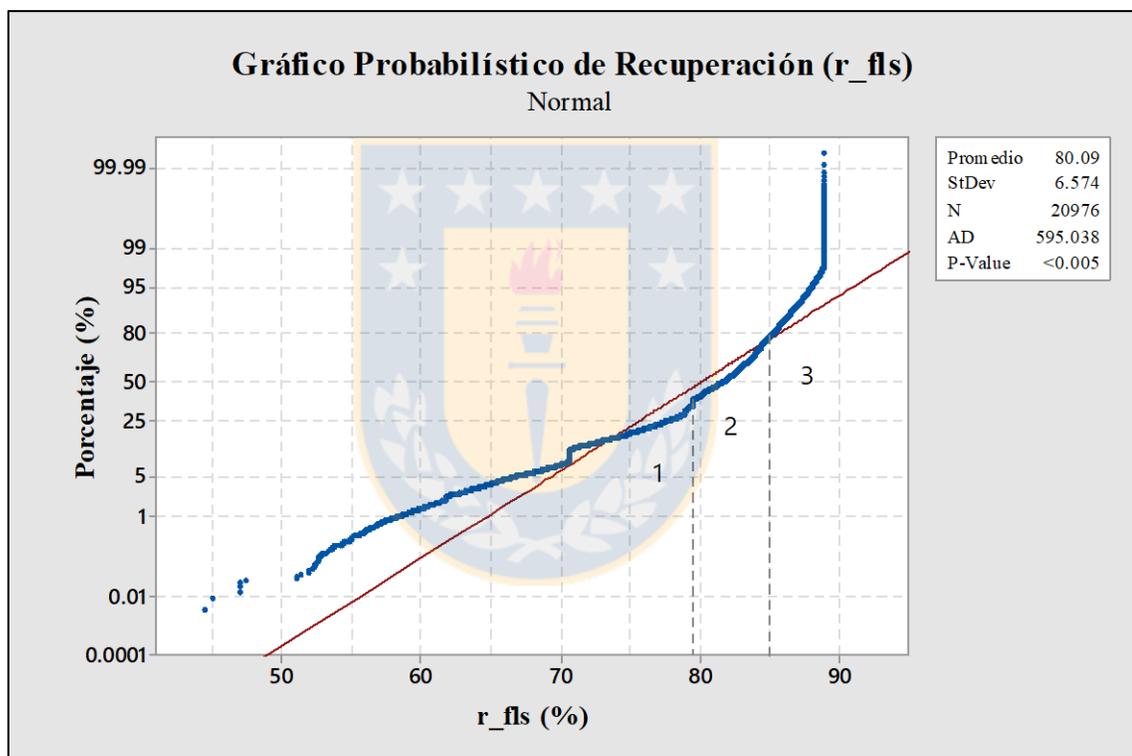


Figura 6.3 : Gráfico Probabilístico de la variable r_{fls} . Se muestra la definición de las poblaciones de recuperación de acuerdo a rangos porcentuales determinados.

Tabla 6. 1: Poblaciones de Recuperación definidos para interpretación de ACP

Población	ID	Rango Rec. (%)	% Datos
Baja Recuperación	1	< 77,5	25
Media Recuperación	2	[77,5 – 85)	55
Alta Recuperación	3	≥ 85	20

6.4.1.2. ACP: Score Plot

En la figura 6.4 se presenta el *Score Plot* generado por el ACP, filtrando por las poblaciones de recuperación definidas en el apartado anterior. Se ha decidido ocultar el dominio de media recuperación para obtener una mejor visualización del contraste de las poblaciones de baja y alta recuperación, las cuales están representados por los colores rojo y azul respectivamente.

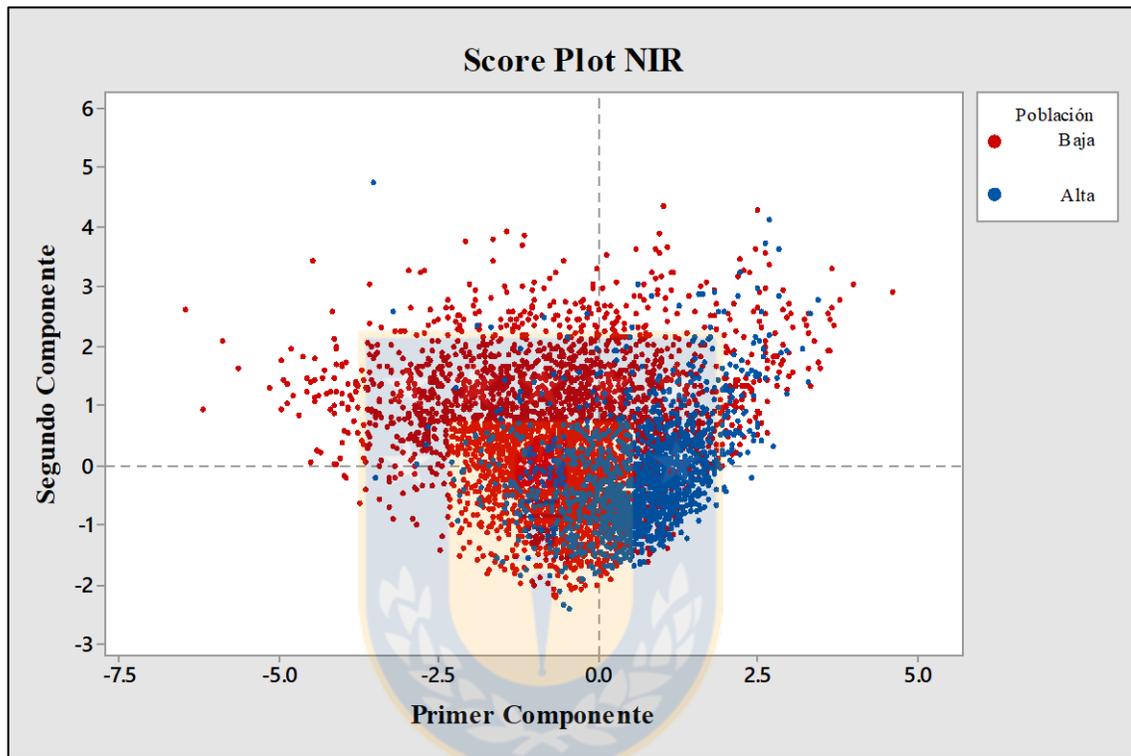


Figura 6.4 : *Score Plot* NIR filtrado por poblaciones de recuperación. Distribución de población de alta recuperación se asemeja a distribución de alteración QSC de la figura 6.1.

Se observa una tendencia de ambos dominios a distribuirse por lados contrarios del primer componente, puesto que el dominio de alta recuperación tiende a distribuirse por el lado positivo del componente, mientras que el de baja recuperación lo hace por el lado negativo. Llama también la atención la similitud entre la distribución de los dominios de recuperación y la distribución de las alteraciones de la figura 6.1, en el sentido que el dominio de alta recuperación coincide con la distribución de la población de la alteración QSC, mientras que el de baja recuperación tiende a coincidir con la distribución de las alteraciones SCC y BIO.

6.4.1.3. ACP: Loading Plot

En la figura 6.5 se presenta el *Loading Plot* generado por el ACP, en el cual queda de manifiesto cómo influyen los minerales de alteración analizados en ambas componentes principales.

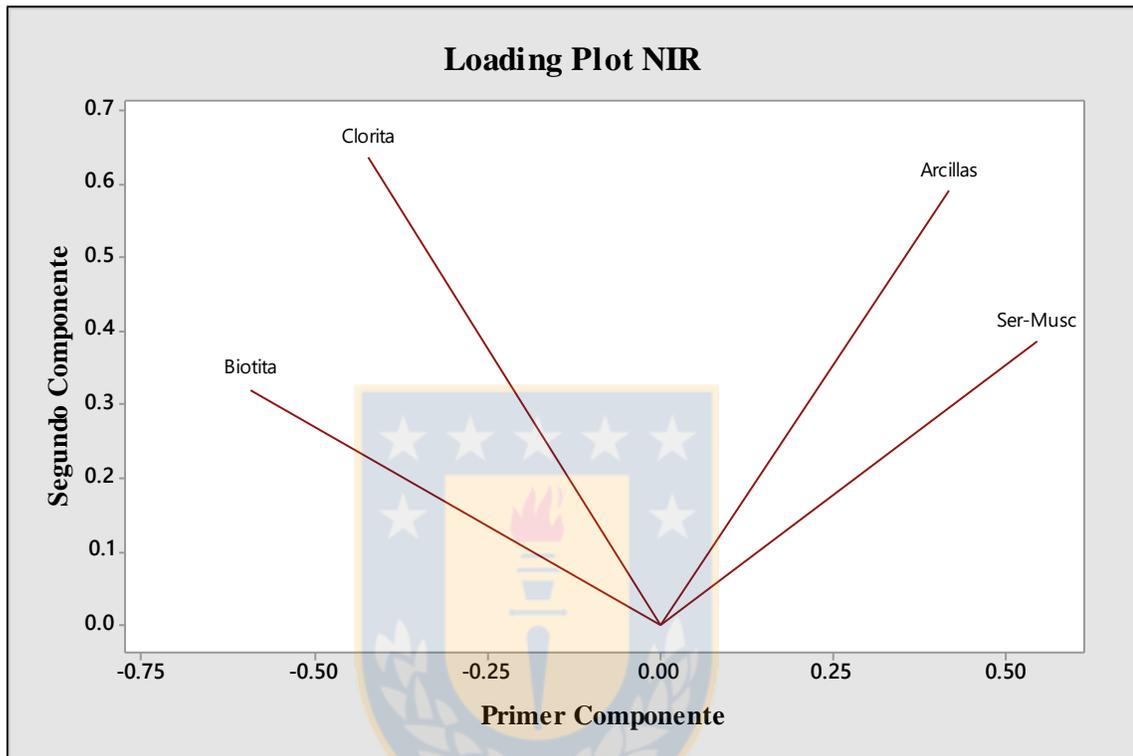


Figura 6.5 : *Loading Plot* donde se muestra la distribución de las variables NIR consideradas en el análisis.

Se observa que las variables clorita y biotita se distribuyen por el lado negativo del primer componente, mientras que las variables arcillas y sericita-muscovita lo hacen por el lado positivo de éste. Al combinar el análisis de ambos gráficos se concluye que tanto biotita como clorita se relacionan con la población de baja recuperación, mientras que las variables sericita y arcillas se relacionan con la de alta recuperación.

A continuación, se procede a calcular los coeficientes de correlación de Pearson de cada una de las variables NIR con la variable r_{fls} , para determinar aquellas que presenten mayor relación con la recuperación. Para ello, en la tabla 6.2 se presenta una matriz de correlación de Pearson incluyendo las variables NIR y r_{fls} .

Tabla 6. 2: Matriz de correlación de Pearson entre variables NIR y variable r_fl

	r_fl	Biotita	Clorita	Arcillas	Ser-Musc
r_fl	1				
Biotita	-0,172	1			
Clorita	-0,492	0,333	1		
Arcillas	0,088	-0,140	0,012	1	
Ser-Musc	0,041	-0,306	-0,060	0,336	1

Se observan coeficientes de correlación bajos, con valores absolutos menores a 0,5, sin embargo, la clorita presenta la mayor correlación negativa con la recuperación, con un coeficiente cercano a 0,5, por lo que es la variable escogida para la definición de dominios de recuperación a partir del análisis de *boxplots*.

6.4.2. Análisis de *Boxplots*

6.4.2.1. Clorita (*Chl*)

En la figura 6.6 se presenta el *boxplot* de rendimiento para la variable clorita, a partir del cual se definirán los dominios de recuperación para el método NIR.

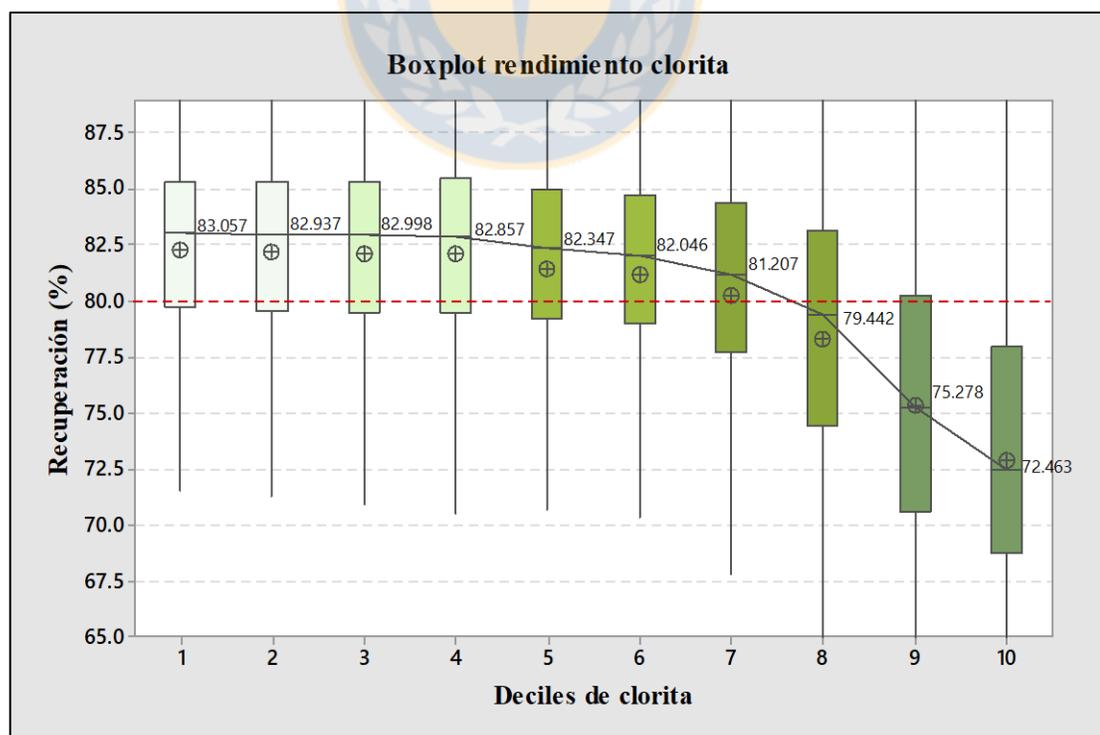


Figura 6.6 : *Boxplot* de rendimiento de clorita. Notar disminución en los últimos 4 deciles.

Se advierte una disminución no significativa de las medianas de recuperación para los 6 primeros deciles, mientras que entre los deciles 6 y 7 se observa un marcado cambio de pendiente y, por consiguiente, las medianas de recuperación comienzan a disminuir de forma más acentuada hasta el decil 8 a partir del cual se observa una disminución crítica de las recuperaciones. Considerando este comportamiento, resulta de utilidad poder definir con mayor detalle los límites que definirán los dominios de recuperación. Para ello, se ampliarán los últimos 4 deciles, recalculando nuevos deciles a partir del séptimo decil de clorita. En la figura 6.7 se presenta el *boxplot* de rendimiento resultante luego de ampliar los últimos 4 deciles y en la tabla 6.3 los rangos porcentuales de clorita de los nuevos deciles calculados.

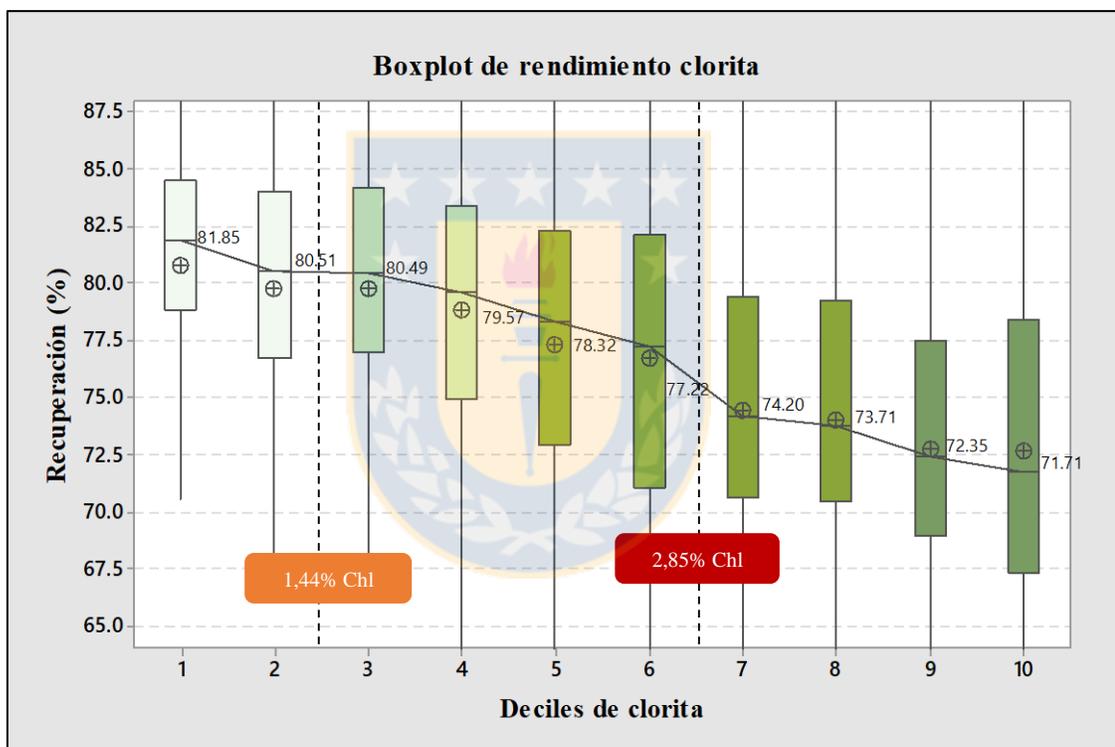


Figura 6.7 : *Boxplot* de rendimiento clorita, ampliando últimos deciles. Notar disminución crítica de las recuperaciones entre los deciles 6 y 7.

Tabla 6.3 : Deciles ampliados de Clorita y sus respectivos rangos porcentuales

Decil	Rango Chl (%)	Decil	Rango Chl (%)
1	<1,44	6	[2,46 – 2,85)
2	[1,44 – 1,62)	7	[2,85 – 3,29)
3	[1,62 – 1,84)	8	[3,29 – 3,85)
4	[1,84 – 2,12)	9	[3,85 – 4,59)
5	[2,12 – 2,46)	10	≥4,59

Tal como se observa en figura 6.7, se definen los dominios de recuperación según los quiebres de pendiente de la línea que une las medianas de recuperación de cada decil. En ese sentido, el quiebre más significativo ocurre entre los deciles 6 y 7 e implica una brusca disminución del 3% en las medianas, por lo que el dominio de baja recuperación queda definido por los deciles 7,8,9 y 10, es decir, por todos los valores de clorita mayores o iguales a 2,85%.

Una vez definido este dominio, se procede a determinar el límite entre los dominios de alta y media recuperación, y para ello se utiliza el quiebre observado entre los deciles 1 y 2, el cual representa una disminución del 1% en las medianas y un cambio marcado de comportamiento entre ambos *boxplots*. Así, se define como límite de los dominios de alta y media recuperación el valor de Clorita de 1,44%, quedando de esta forma definidos los dominios de recuperación para el rajo Escondida a partir de la variable clorita (Tabla 6.4)

Tabla 6.4: Dominios de Recuperación a partir de la variable clorita (Chl).

Dominio de Recuperación	Rango Chl (%)
Alta Recuperación	<1,44
Media Recuperación	[1,44 – 2,85)
Baja Recuperación	≥2,85

6.4.2.2. Continuidad espacial de los dominios de recuperación

En este apartado se busca evaluar si es que los dominios de recuperación definidos presentan continuidad espacial en el rajo Escondida. De presentar continuidad espacial, se analizará si los dominios guardan relación con parámetros geológicos como litología y alteración.

Para resolver esta interrogante, se procede a graficar en el *software Vulcan* los valores históricos NIR de clorita del rajo Escondida, filtrando por los dominios de recuperación definidos recientemente (figura 6.8). Para facilitar la visualización, se decide representar solamente los datos de una sección en planta, a la altura de la cota 2.750, la cual corresponde a una sección medianamente profunda y con zonas actualmente en explotación.

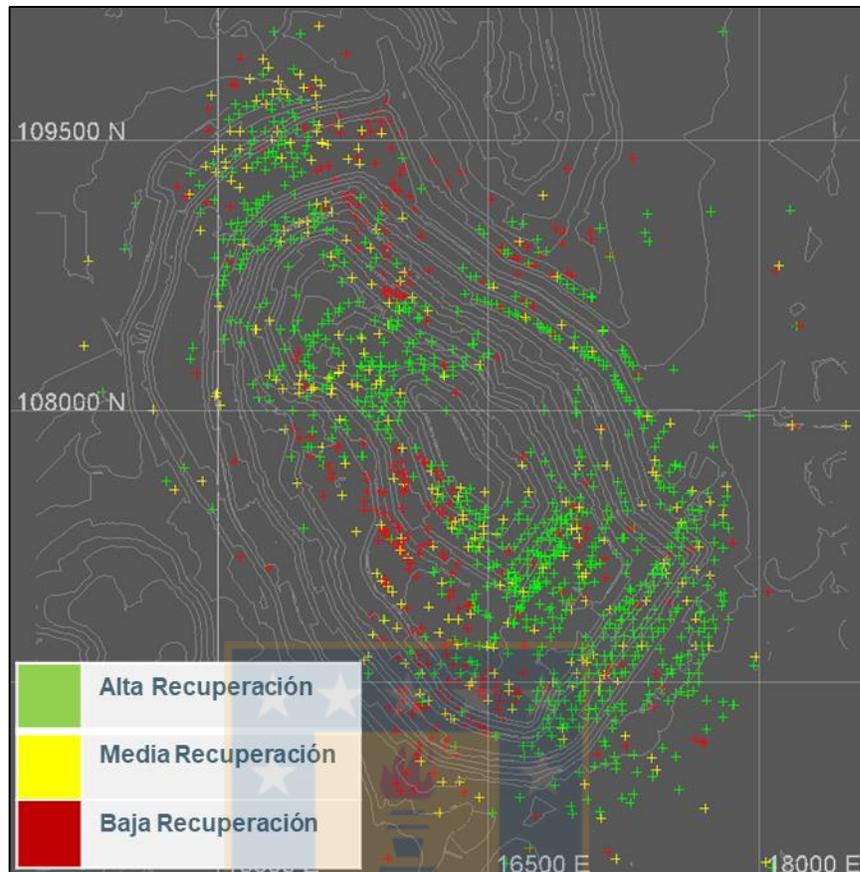


Figura 6.8 : Distribución espacial dominios de recuperación a partir de la variable clorita a la altura de la cota 2.750.

En general, se aprecia una menor densidad de datos y una menor prolijidad en la definición de los dominios en comparación con el método ICP, sin embargo se observa que el dominio de baja recuperación tiende a coincidir con la distribución del mismo dominio definido a partir del litio (ICP). Lo anterior tiene directa implicancia en el estudio, pues el dominio de baja recuperación NIR se define por su contenido de clorita, y altos contenidos de este mineral son indicadores de alteración SCC. Esto permite proponer que los dominios de baja recuperación que se han definido hasta el momento para ambos métodos pueden ser considerados como una cuantificación de la alteración SCC, cuya distribución en el rajo Escondida guarda bastante similitud con ambos dominios (figura 6.9).

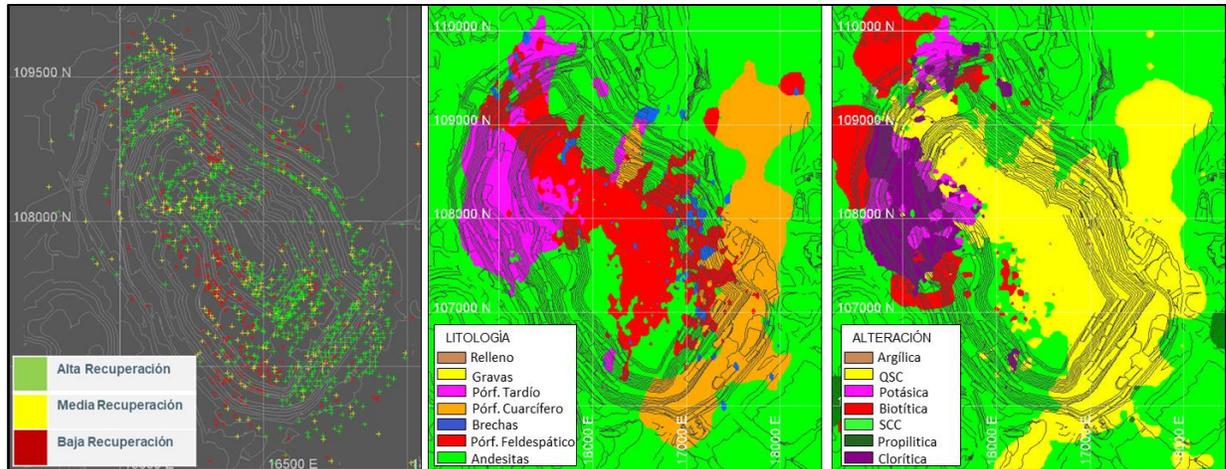


Figura 6.9 : Vistas en planta de los dominios de recuperación a partir de clorita (izq.) versus modelo geológico de litología (centro) y alteración (der.) del rajo Escondida.

Por su parte, el dominio de alta recuperación muestra una correlación espacial con la distribución de la alteración QSC, mientras que el dominio de media recuperación tiende a estar disperso por todo el depósito por lo que se excluye de mayor análisis.

El factor litológico, en cambio, pareciera ser menos determinante que el factor alteración. Si bien el dominio de baja recuperación se asocia a la ocurrencia de andesitas, la correlación espacial entre ambos no es tan marcada como en el caso de las alteraciones, en el sentido que el dominio de baja recuperación tiende netamente a representar las andesitas con alteración SCC. Con esto se comprueba que los dominios de recuperación guardan relación con parámetros geológicos y, a continuación, se procede a analizar la variable mSPI.

6.5. ANÁLISIS DEL *modified SAG POWER INDEX* (MSPI)

6.5.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

6.5.1.1. ACP: *Definición de Poblaciones*

Mediante el gráfico probabilístico de la variable mSPI, se definen 3 poblaciones de este índice para facilitar la interpretación de las herramientas gráficas del ACP (figura 6.10). La definición de poblaciones (tabla 6.5) se hace de forma arbitraria pero apoyada por quiebres observados en el gráfico.

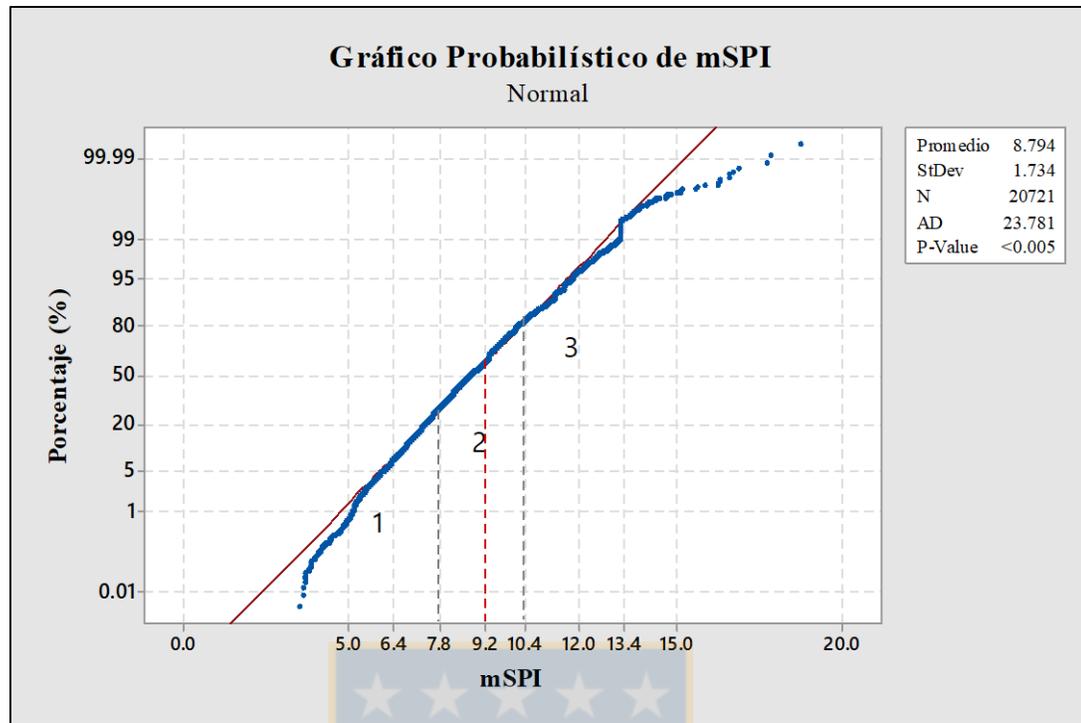


Figura 6.10 : Gráfico Probabilístico de la variable mSPI. Se muestra la definición de las poblaciones de mSPI de acuerdo a rangos determinados. Línea vertical roja indica valor de diseño molino SAG. Puntos azules representan cada una de las observaciones y en rojo se presenta la línea de distribución normal.

Tabla 6.5: Poblaciones de mSPI definidas para interpretación de ACP

Población	ID	Rango mSPI	% Datos
Bajo mSPI	1	< 7,8	25
Medio mSPI	2	[7,8 – 10,4[	55
Alto mSPI	3	≥ 10,4	20

Una vez definidas las poblaciones de mSPI, se procede a realizar el ACP, cuyos resultados son interpretados mediante los gráficos *Score* y *Loading*.

6.5.1.2. ACP: Score Plot

En la figura 6.11 se presenta el *Score Plot* generado por el ACP, filtrando por las poblaciones de mSPI definidas en el apartado anterior. Se ha decidido ocultar la población de medio

mSPI para obtener una mejor visualización del contraste de las poblaciones de alto y bajo mSPI, las cuales están representadas por los colores rojo y azul respectivamente.

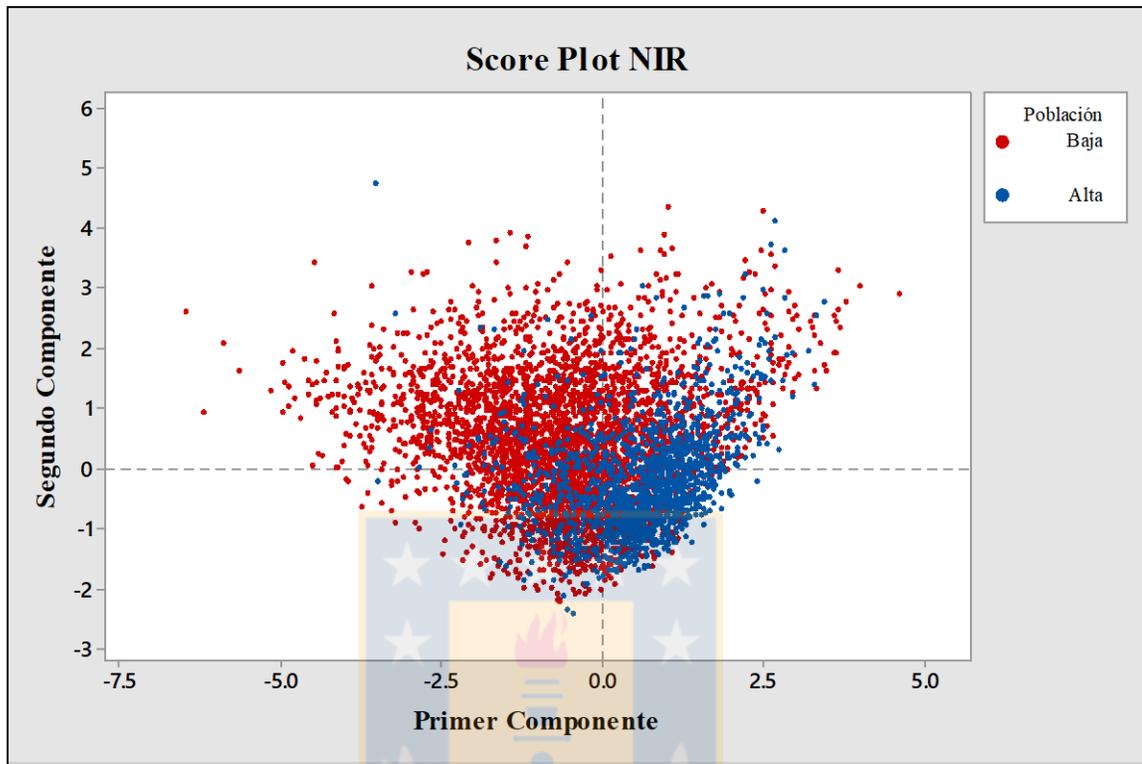


Figura 6.11 : *Score Plot* NIR, filtrado por poblaciones de mSPI. Se observa una efectiva separación por parte del primer componente.

Se observa una tendencia de ambas poblaciones a distribuirse por lados contrarios del primer componente, debido a que la población de alto mSPI se distribuye por el lado negativo del componente, mientras que la de bajo mSPI lo hace por el lado positivo de éste. Se advierte también una similitud entre la distribución de las poblaciones de mSPI y la distribución de las alteraciones de la figura 6.1, en el sentido que la población de bajo mSPI coincide con la distribución de la alteración QSC, mientras que la de alto mSPI tiende a coincidir con la distribución de las alteraciones SCC y BIO.

6.5.1.3. ACP: *Loading Plot*

En la figura 6.12 se presenta el *Loading Plot* para las variables NIR, donde se especifican las variables relacionadas a bajos y altos valores de mSPI.

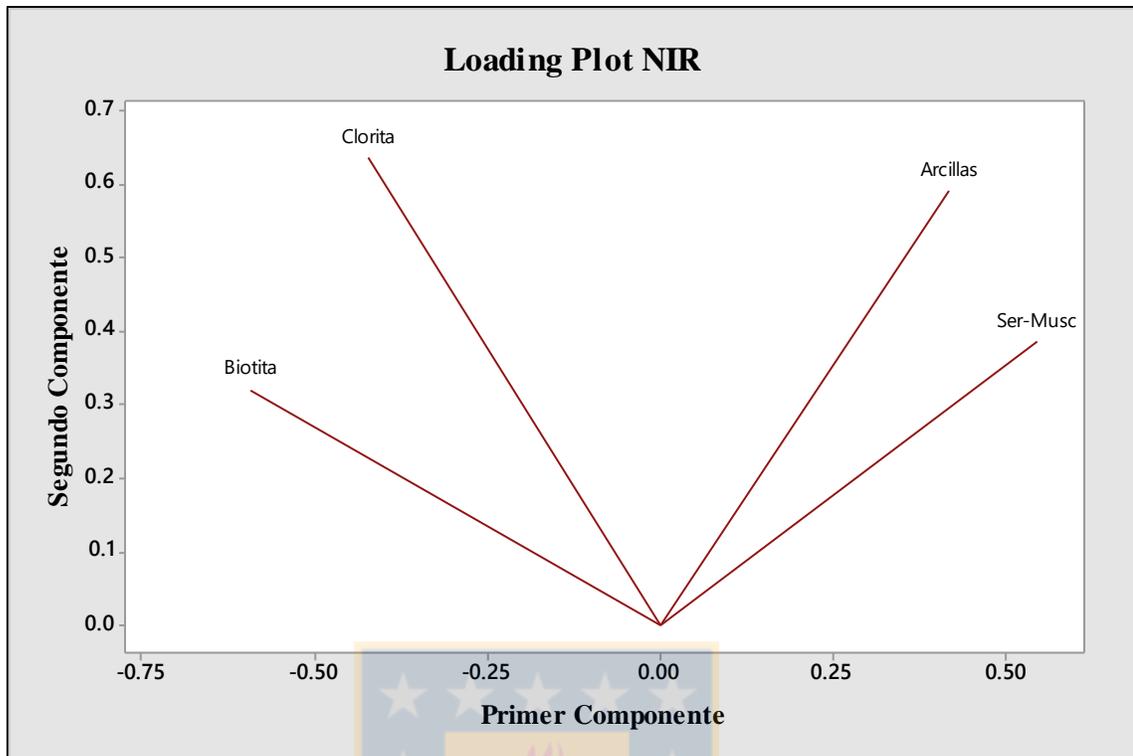


Figura 6.12 : *Loading Plot* donde se muestra la distribución de las variables NIR consideradas en el análisis.

Se observa que, al igual que para el proceso de recuperación, tanto clorita como biotita son indicadas por el análisis como minerales problemáticos para el proceso de molienda, puesto que la distribución de ambos se condice con el dominio de alto mSPI. A su vez, las variables arcillas y sericita-muscovita son indicados por el análisis como minerales asociados a bajos valores de mSPI. A continuación, se procede a calcular los coeficientes de correlación de Pearson de cada una de las variables NIR con la variable mSPI, para determinar aquellas que presenten mayor relación con el índice de molienda (Tabla 6.6)

Tabla 6.6: Matriz de correlación de Pearson incluyendo variables NIR y mSPI

	mSPI	Biotita	Clorita	Arcillas	Musc-Ser
mSPI	1				
Biotita	0,199	1			
Clorita	0,215	0,333	1		
Arcillas	-0,263	-0,140	0,012	1	
Musc-Ser	-0,332	-0,306	-0,060	0,336	1

Se observa que todos los coeficientes de correlación presentan valores menores a 0,5, lo que implica una correlación débil y estadísticamente no significativa. Sin embargo, a partir de la revisión de los *boxplots* de rendimiento para cada una de estas variables (Anexo A), se opta por la utilización de la clorita para la definición de dominios de mSPI pues denota un comportamiento que facilita su determinación.

6.5.2. Análisis de *Boxplots*

6.5.2.1. Clorita (*Chl*)

En la figura 6.13 se presenta el *boxplot* de rendimiento para la variable clorita, a partir de la cual se definirán los dominios de mSPI para el método NIR. En el gráfico se incluye una línea segmentada roja, la cual indica el valor 9.2 mSPI, correspondiente al valor de diseño del molino SAG para la planta Laguna Seca.

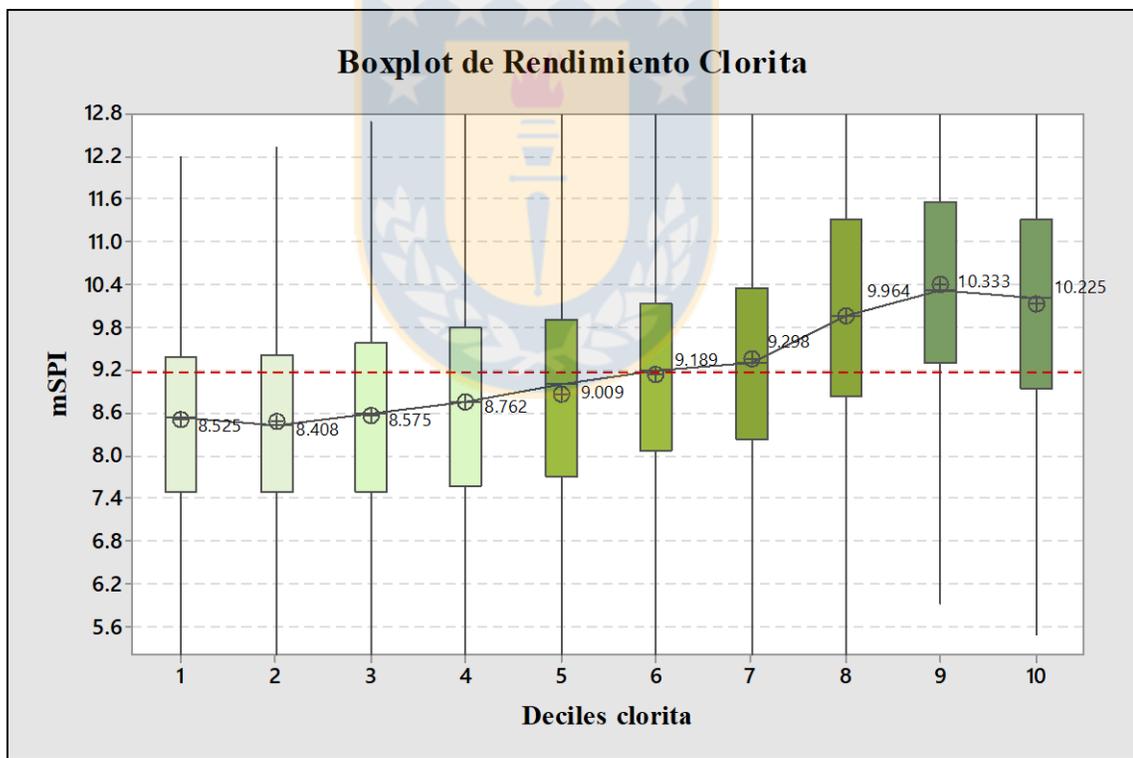


Figura 6.13 : *Boxplot* de rendimiento de clorita para variable mSPI. Se observa un notorio aumento de los valores de mSPI en los deciles superiores.

Se observa un aumento gradual y moderado de las medianas de mSPI para los 7 primeros deciles, mientras que a partir del octavo decil se advierte un brusco incremento en las medianas y

un notorio cambio en el comportamiento de los *boxplots*. En virtud de lo anterior, se hace de utilidad poder definir con mayor detalle el valor del quiebre de los valores de mSPI, lo cual se hará ampliando los últimos 5 deciles, recalculando nuevos deciles a partir del sexto decil. En la figura 6.14 se presenta el *boxplot* de rendimiento de la clorita, ampliando los últimos 5 deciles y en la tabla 6.7 se muestra los intervalos de los nuevos deciles.

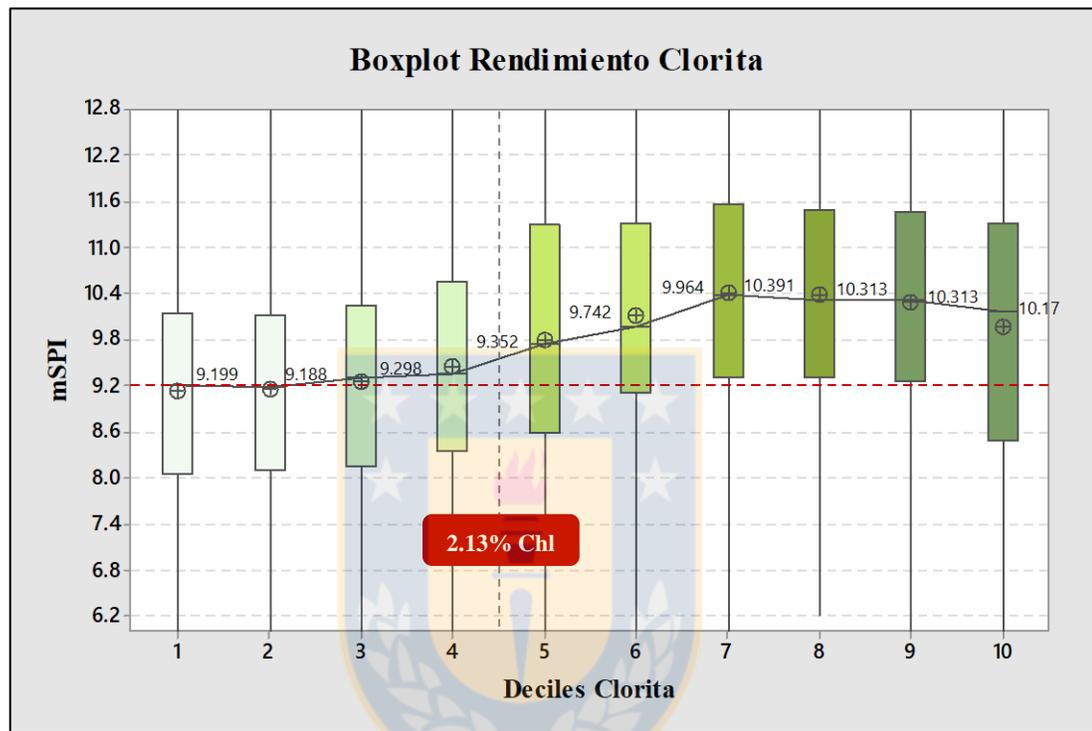


Figura 6.14 : *Boxplot* de rendimiento de clorita para variable mSPI, ampliando últimos deciles. Notar quiebre de la línea entre deciles 4 y 5

Tabla 6.7: Deciles ampliados de clorita y sus respectivos rangos porcentuales

Decil	Rango Chl (%)	Decil	Rango Chl (%)
1	>1,34	6	[2,51 – 2,96[
2	[1,34 – 1,54[	7	[2,96 – 3,41[
3	[1,54 – 1,80[	8	[3,41 – 3,98[
4	[1,80 – 2,13[	9	[3,98 – 4,73[
5	[2,13 – 2,51[	10	<4,73

Se advierte un notorio quiebre de pendiente de la línea entre los deciles 4 y 5, a partir del cual las medianas de mSPI aumentan bruscamente su valor, lo que queda en evidencia al estar la

mayoría de las cajas de los *boxplots* subsiguientes por sobre el valor de diseño del molino. En virtud de lo anterior, se define el límite entre el dominio de alto y medio mSPI como el valor común entre los deciles 4 y 5, es decir, 2,13% de clorita.

Una vez definido el límite entre ambos dominios, se procede a definir los dominios de medio y bajo mSPI. Para ello, se amplían los 4 deciles intermedios de la figura 6.13 (deciles 4, 5, 6 y 7) para obtener mayor detalle del quiebre entre ambos dominios. En la figura 6.15 se presenta el *boxplot* de rendimiento obtenido al ampliar los 4 deciles centrales, y en la tabla 6.8 se detallan los rangos porcentuales de clorita de los nuevos deciles.

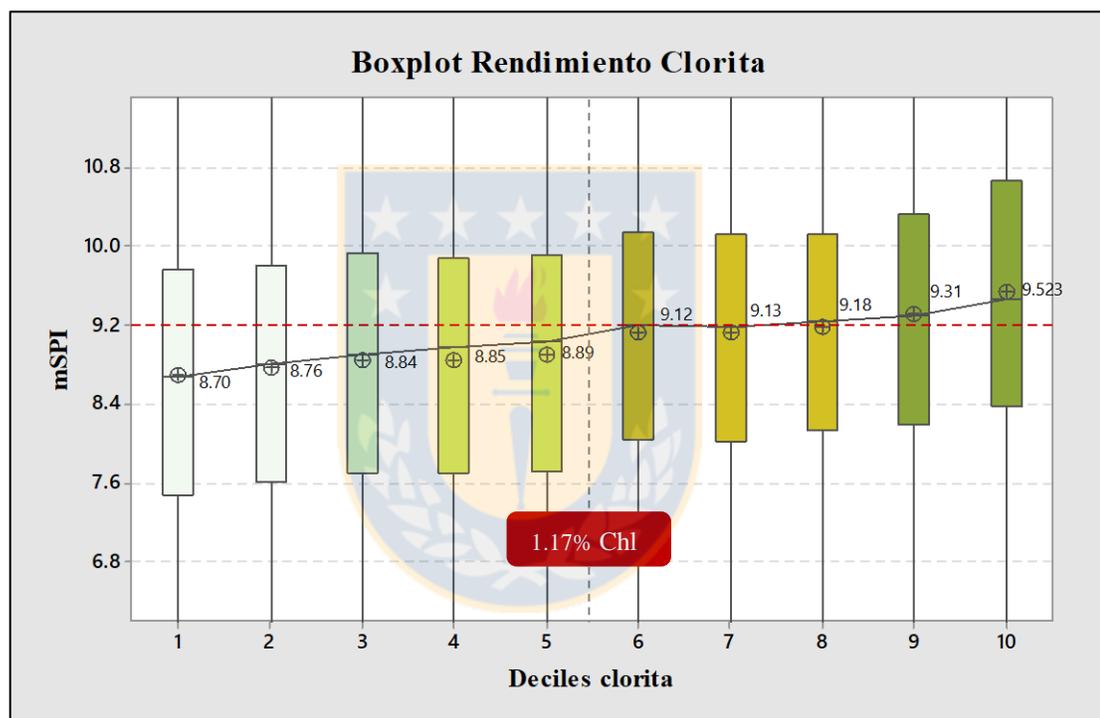


Figura 6.15 : *Boxplot* de rendimiento de clorita para variable mSPI, ampliando deciles intermedios. Notar quiebre entre deciles 5 y 6.

Tabla 6.8: Deciles Ampliados de Clorita y sus respectivos rangos porcentuales

Decil	Rango Chl (%)	Decil	Rango Chl (%)
1	>0,73	6	[1,17 – 1,31[
2	[0,73 – 0,83[	7	[1,31 – 1,47[
3	[0,83 – 0,93[	8	[1,47 – 1,65[
4	[0,93 – 1,05[	9	[1,65 – 1,87[
5	[1,05 – 1,17[	10	<1,87

Se observa un quiebre moderado de la pendiente de la curva entre los deciles 5 y 6, lo que trae consigo un leve aumento de las medianas de mSPI, con un significativo cambio de comportamiento de los deciles a partir del sexto decil. En virtud de esto, se define el límite entre los dominios de medio y bajo mSPI como el valor común entre los deciles 5 y 6, es decir, 1,17% de clorita. De esta forma, quedan así definidos los dominios de mSPI para el rajo Escondida a partir de la variable clorita (tabla 6.9)

Tabla 6.9: Dominios de mSPI a partir de la variable clorita.

Dominio de mSPI	Rango Chl (%)
Alto mSPI	$\geq 2,13$
Medio mSPI	$[1,17 - 2,13 [$
Bajo mSPI	$\leq 1,17$

6.5.2.2. Continuidad Espacial de los dominios de mSPI

Se procede a graficar en el *software Vulcan* los valores históricos NIR de clorita del rajo Escondida, filtrando por los dominios de mSPI definidos recientemente para evaluar su continuidad espacial (figura 6.16). Para facilitar la visualización, se decide representar solamente los datos de una sección en planta, a la altura de la cota 2.750, la cual corresponde a una sección medianamente profunda y con zonas actualmente en explotación. Se observa prácticamente la misma disposición que los dominios obtenidos para la recuperación (figura 6.8), por lo que se postula que la clorita corresponde a un mineral de alteración altamente perjudicial tanto para el proceso de recuperación como para la molienda, lo cual será discutido en el Capítulo 7.

A su vez, en la figura 6.17 se presenta una comparación mediante una vista en planta de la cota 2.750 de los dominios de mSPI versus el modelo geológico de litología y alteración. Se observa nuevamente una correlación espacial notoria entre los dominios de mSPI y la distribución de las alteraciones reconocidas en el rajo, pues el dominio de alto mSPI se asocia a las alteraciones SCC y biotítica, mientras que el de bajo mSPI se relaciona con la distribución de la alteración QSC.

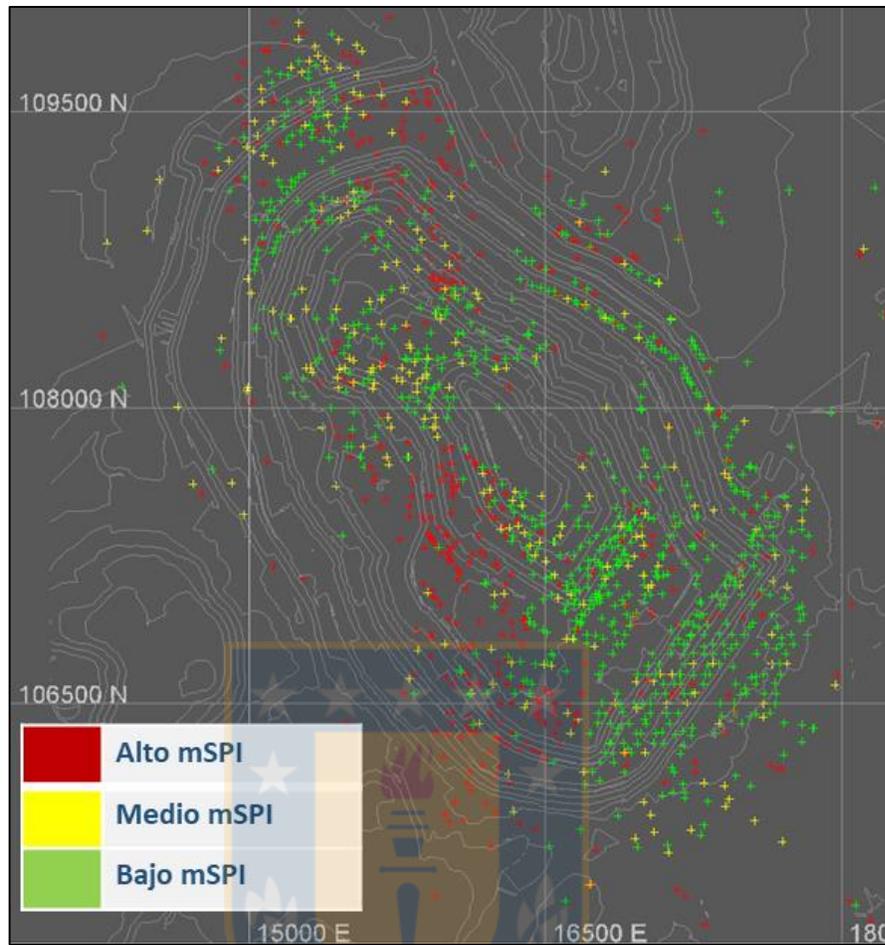


Figura 6.16 : Distribución espacial de dominios de mSPI definidos a partir de la variable Clorita a la altura de la cota 2.750.

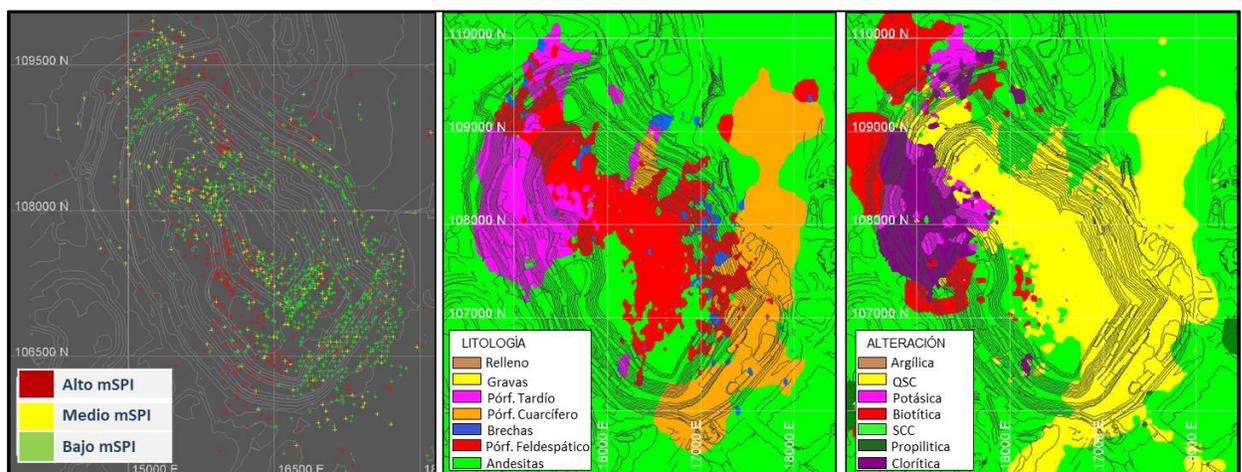


Figura 6.17: Vistas en planta de los dominios de mSPI a partir de Clorita (izq.) versus modelo geológico de litología (centro) y alteración (der.) del rajo Escondida.

6.6. OTRAS APLICACIONES: CASO DE ARCILLAS

6.6.1. Generalidades

En el ámbito metalúrgico son conocidos los efectos negativos de las arcillas sobre el proceso de concentración, entre los cuales destacan: disminución de la flotabilidad de partículas de sulfuros de Cu, aumento del consumo de reactivos, alteración de la espuma y disminución de la selectividad y ley del concentrado (Castro, 2011). Es por esto, que un alto contenido de esta especie mineralógica debería suponer un desmedro del rendimiento del proceso metalúrgico.

No obstante lo anterior, el análisis del grupo de arcillas (caolín, pirofilita y esmectita) por el método NIR no arrojó un resultado contundente respecto a su impacto negativo sobre el proceso, tal como se observa en la figura 6.18, donde se presentan los *boxplots* de rendimiento de recuperación y mSPI del grupo de las arcillas, advirtiéndose incluso un leve incremento de las recuperaciones y una disminución en los valores de mSPI a medida que aumenta el contenido porcentual de este grupo mineralógico en las muestras. Para el caso de la sericita-muscovita, se observa prácticamente el mismo comportamiento (Anexo A).

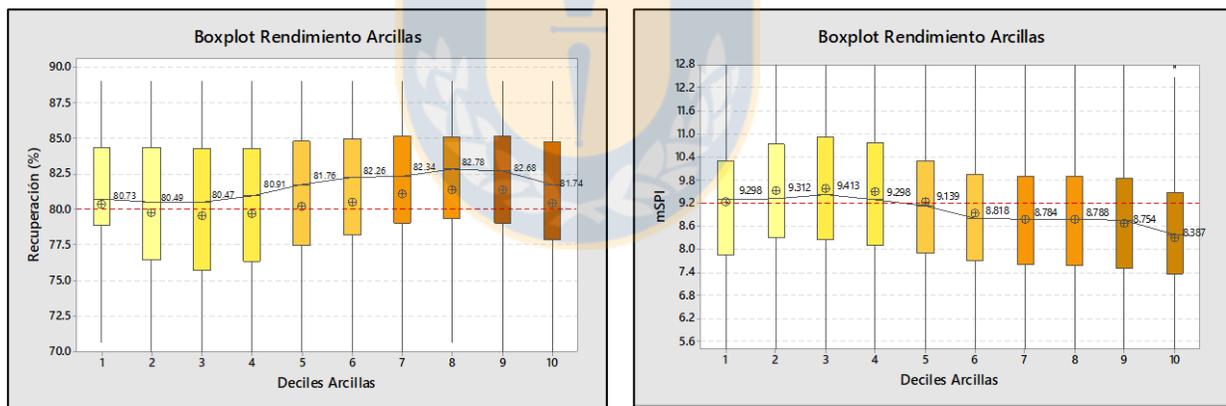


Figura 6.18 : *Boxplots* de rendimiento de recuperación (izq.) y mSPI (der.) para la variable arcillas. Notar comportamiento en deciles superiores.

Respecto a esto, diversas investigaciones se han realizado con el fin de entender el real comportamiento de esta especie mineralógica en el proceso de concentración. En lo que a la flotación se refiere, Bulatovic y otros (1999) estudiaron el efecto de distintas especies arcillosas sobre los porcentajes de recuperación final, analizando muestras provenientes de 3 yacimientos distintos (tabla 6.10).

Tabla 6.10: Yacimientos y especies arcillosas consideradas en el estudio (Bulatovic y otros, 1999)

Yacimiento	País	Arcillas Predominantes
Escondida	Chile	Caolinita / Illita
Disputada	Chile	Montmorillonita / Illita
Batu Hijau	Indonesia	Chamosita / Caolinita / Illita

A partir de las muestras escogidas, los autores realizaron una serie de pruebas metalúrgicas de flotación, agregando gradualmente en cada prueba un mayor contenido porcentual de las arcillas analizadas, para determinar el efecto de este aumento en la recuperación final de cobre. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.19.

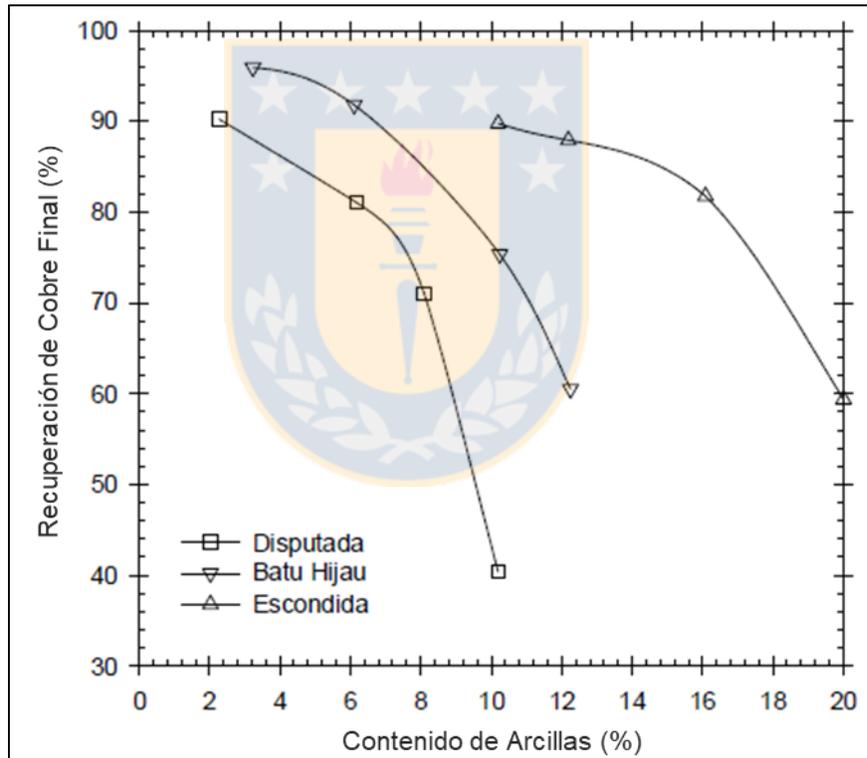


Figura 6.19 : Recuperación de Cu versus contenido porcentual de cada especie arcillosa analizada. Modificado de Bulatovic y otros (1999).

Se advierten diferencias notorias en el rendimiento de las pruebas metalúrgicas según la especie arcillosa alimentada. La arcilla montmorillonita, correspondiente al yacimiento Disputada, presenta el mayor efecto perjudicial sobre la flotación disminuyendo bruscamente los porcentajes

de recuperación final a medida que aumenta su contenido en cada prueba. Por el contrario, la especie caolinita demostró no ser tan perjudicial para el proceso, al disminuir solo moderadamente los porcentajes de recuperación a medida que aumenta su contenido porcentual en la alimentación. Respecto a esto, Farrokhpay y Ndlovu (2013) analizaron el efecto de ambos filosilicatos sobre la estabilidad de la espuma en la flotación de sulfuros de cobre, determinando que la montmorillonita presenta el efecto más negativo sobre la vida media de ésta, afectando la flotación de las partículas de mena, mientras que la caolinita es prácticamente inocua para la estabilidad de la espuma.

Ahora bien, se debe recordar que el método NIR no es capaz de diferenciar entre las especies montmorillonita y caolinita, sino que las agrupa en un solo grupo junto a la pirofilita. Sin embargo, los resultados obtenidos al analizar el efecto del grupo de arcillas sobre las variables geometalúrgicas, sugieren que en Escondida predomina la especie caolinita, cuyos efectos sobre el proceso de recuperación no son tan significativos como los de la montmorillonita.

Para finalizar, se decide analizar el comportamiento del grupo de arcillas en el proceso de recuperación de agua en los espesadores, correspondiente a la última etapa del proceso de concentración. La variable geometalúrgica de interés en este caso corresponde a la velocidad de sedimentación, la cual se describe a continuación.

6.6.2. Velocidad de sedimentación

Se define como la velocidad con la que decanta el material particulado o pulpa en los espesadores. Es una variable incluida en el modelo geometalúrgico de Escondida, se mide en centímetros por minuto (cm/min) y se obtiene en laboratorio mediante un test de probeta de 10 minutos (Menacho, 2014).

La importancia de esta variable radica en el hecho de que el proceso de flotación implica una recirculación continua del agua utilizada, por lo que la recuperación de ésta es muy relevante. Este proceso puede verse afectado cuando se alimenta gran cantidad de finos, los cuales presentan bajas velocidades de sedimentación, lo que propicia la generación de eventos de embancamientos en los desagües de los espesadores.

Zonas de bajas velocidades de sedimentación se asocian a la presencia de finos relacionados principalmente a la alteración QSC (arcillas y sericita), y en zonas de enriquecimiento supérgeno controladas por estructuras. El valor crítico de velocidad de sedimentación por debajo

del cual se propician los eventos de embancamientos corresponde a 0,3 cm/min (C. Delgado, comunicación personal, 24 de agosto de 2017).

6.6.3. Efecto del contenido de arcillas sobre la velocidad de sedimentación

A continuación se analizará el efecto de las arcillas sobre la variable velocidad de sedimentación a través de un *boxplot* de rendimiento. Para ello, se extrae la variable “Vel_Sed 145” del modelo geometalúrgico y se cruza con los datos NIR del grupo arcillas, obteniéndose una base de datos compilada final de 15.000 registros aproximadamente. La variable “Vel_Sed 145” corresponde a la velocidad de sedimentación, medida en cm/min, obtenida para muestras de granulometría bajo los 145 micrones. En la figura 6.20 se presenta el *boxplot* de rendimiento para la velocidad de sedimentación y en la tabla 6.11 se detallan los rangos de los deciles de arcillas calculados.

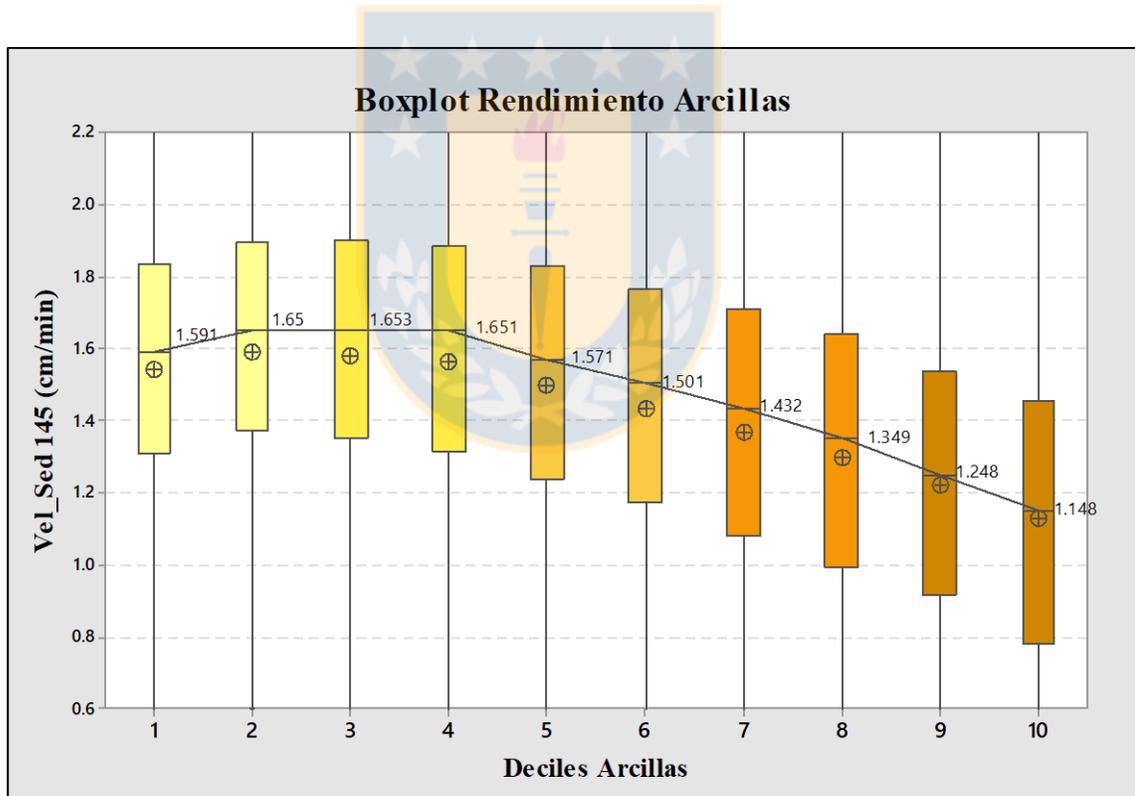


Figura 6.20 : *Boxplot* de rendimiento de arcillas para la variable velocidad de sedimentación. Notar disminución de las medianas a partir del decil 5.

Si bien es cierto que se observa una clara tendencia a la disminución de las velocidades de sedimentación cuanto mayor contenido de arcillas, las velocidades de los últimos deciles tienden

a ser elevadas y alejadas del valor crítico (0,3 cm/min). Lo anterior puede deberse a que contenidos extremadamente altos de arcillas y con bajas velocidades de sedimentación, que significan una alta probabilidad de embancamientos, se encuentran acotados espacialmente a zonas específicas del rajo controladas por dominios estructurales, por lo que en un análisis global como éste, donde se representan la totalidad de los datos de la mina, tienden a estar enmascarados.

Tabla 6.11 : Deciles de arcillas y sus respectivos rangos porcentuales

Decil	Rango Arcillas (%)	Decil	Rango Arcillas (%)
1	>2,44	6	[5,58 – 6,63)
2	[2,44 – 3,30)	7	[6,63 – 7,96)
3	[3,30 – 4,02)	8	[7,96 – 9,74)
4	[4,02 – 4,72)	9	[9,74 – 12,87)
5	[4,72 – 5,58)	10	≤12,87

En virtud de esto, se propone que para una correcta cuantificación del efecto de las arcillas sobre la velocidad de sedimentación a partir de datos NIR, se debe orientar el análisis específicamente a aquellas zonas o expansiones de la mina que se encuentren fuertemente controladas por estructuras y donde sea conocida la ocurrencia de altos contenidos de esta especie mineralógica.

Por último, de este apartado se recalca la importancia de la correcta identificación de la especie arcillosa que se alimenta a planta concentradora. En ese sentido, el término arcilla tiene un uso común en el ámbito metalúrgico para referirse principalmente a un mineral de ganga silíceo con la capacidad de generar una gran cantidad de partículas ultrafinas, pasando por alto las sustanciales diferencias existentes entre las distintas especies arcillosas y su efecto sobre el proceso metalúrgico.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación permite concluir que es posible correlacionar datos químicos y espectrales con el comportamiento metalúrgico. En particular, los datos obtenidos desde los análisis ICP y NIR han demostrado ser una potente herramienta para la cuantificación global de los efectos perjudiciales de ciertos elementos y minerales de alteración sobre el proceso metalúrgico.

Respecto de los datos ICP del rajo Escondida, se ha determinado que existe un grupo de elementos químicos que presentan una alta correlación entre ellos y se asocian a bajas recuperaciones. En este grupo, el Al y el Li mostraron ser útiles para la definición de dominios de recuperación que permiten caracterizar distintas zonas del rajo según su comportamiento metalúrgico esperado. La disposición espacial de estos dominios permite relacionar las zonas de bajas recuperaciones con parámetros geológicos tales como la litología y alteración. En ese sentido, el dominio de baja recuperación coincide con la distribución de una porción mayoritaria de las andesitas en el rajo, las cuales justamente corresponden a la litología que menor rendimiento presenta en el proceso de recuperación de cobre por flotación. Esto se condice con los resultados obtenidos por Cortés (2015), quien separa las unidades litológicas del rajo Escondida usando la misma base de datos químicos obtenidos por ICP y señalando al mismo grupo de elementos como altamente relacionados a las andesitas permitiendo distinguirlas del resto de unidades litológicas. En cuanto al factor alteración, la distribución de las alteraciones hidrotermales presentes en el rajo tiende a ajustarse de mejor forma a los dominios de recuperación que la litología, siendo marcada la correlación espacial entre el dominio de baja recuperación y las alteraciones SCC y biotítica.

En lo que respecta al proceso de molienda, se determinó que el principal control geológico sobre el índice mSPI corresponde a la alteración hidrotermal. Así, se determinó que las alteraciones SCC, potásica y biotítica se asocian a altos valores de mSPI mientras que la alteración QSC, predominante en el rajo, se asocia a bajos valores de este índice. De esta manera, el Ca mostró ser un buen indicador de rocas de alto mSPI, detectándose un brusco aumento de este índice a partir del valor 0.29% Ca. Esto se explica debido a que el Ca es un elemento alcalino térreo altamente móvil durante procesos de alteración hidrotermal (Hikov, 2013) por lo que es un buen trazador de estos procesos y, por consiguiente, también de dominios de mSPI. Al ser altamente móvil, es un elemento que se lixivia con facilidad en condiciones hidrotermales de medio-bajo pH que generan

un fuerte grado de hidrólisis en las rocas (alteración QSC), mientras que tiende a permanecer más estable en alteraciones más alcalinas (alteración SCC, potásica y biotítica), comportamiento que se condice con los resultados obtenidos en esta investigación. Cabe destacar que en Escondida el Ca también ha sido utilizado como indicador del paleo nivel freático, cuyo techo fue definido por Cortés (2015) mediante el valor 2% Ca, a partir del cual aumenta considerablemente la competencia de las rocas en profundidad debido a la aparición de vetas de yeso/anhidrita, lo que demuestra la versatilidad de este elemento como indicador de procesos geológicos.

Respecto del análisis de datos NIR, se determinó que la clorita es un mineral de alteración altamente perjudicial tanto para el proceso de molienda como de flotación. La clorita pertenece al grupo de los filosilicatos y se forma por alteración de minerales ferromagnesianos primarios como anfíboles y micas. Su baja dureza propicia la formación de partículas ligeras y pequeñas durante el proceso de molienda, lo que favorece la formación de lodo que se adhiere a las paredes del molino, disminuyendo su capacidad de conminución (Zheng y otros, 2009). Además, la clorita ha sido reconocida como un silicato de alta flotabilidad (Manser, 1980), y al tener mejor flotabilidad que los sulfuros, las partículas finas de Clorita pueden adherirse primero a las burbujas en el proceso de flotación, compitiendo de esta forma con las partículas sulfuradas lo que se traduce en una disminución de la eficiencia del proceso de recuperación.

La gran similitud entre los dominios de recuperación y mSPI, sumado al hecho de que ambos dominios representan zonas con elevados contenidos de clorita, deja en evidencia que el factor alteración (en particular la alteración SCC) es más determinante que la litología en bajos rendimientos del proceso metalúrgico.

Si bien la distribución espacial de los dominios es más prolija para el caso del método ICP en comparación con el NIR, la practicidad en los tiempos de captura y análisis hacen de éste último método una herramienta con gran potencial para ser implementada en el corto plazo para la caracterización geometalúrgica de pozos de tronadura o expansiones en explotación. En ese sentido, el análisis NIR implica cortos tiempos de preparación, captura y análisis que permiten contar con la información en el momento o en un plazo de pocos días, haciendo factible la caracterización de una malla a explotar antes de su envío a planta concentradora. Por su parte, los tiempos involucrados en un análisis ICP rondan aproximadamente las 3 semanas, implicando el

envío de muestras al extranjero, haciendo inviable contar con esta data para una rápida caracterización geometalúrgica de una malla de tronadura.

Por último, se destaca el carácter cuantitativo de los métodos y datos utilizados en esta investigación, recalcando la importancia de la innovación y desarrollo de nuevas técnicas que permitan la captura de parámetros geológicos de forma cuantitativa como apoyo a la caracterización cualitativa, acorde a una industria minera cada vez más exigente. Si bien la metodología de mapeo ha demostrado históricamente ser útil y apropiada para el proceso productivo de la mina, ésta puede no ser lo suficientemente precisa, particularmente durante períodos en los que aumentan los presupuestos de perforación, generando un incremento de metros a mapear y por ende una disminución de los tiempos de ejecución, lo que normalmente se traduce en la contratación de personal con menor experiencia que afecta finalmente la calidad del mapeo. En virtud de esto, se hace relevante contar con métodos de captura cuantitativos que, aplicados correctamente, sirvan como complemento a la metodología de mapeo y permitan aumentar la confiabilidad de los parámetros geológicos que conforman la primera parte del proceso productivo.



8. REFERENCIAS

ABDI, H. Y WILLIAMS, L. 2010. Principal component analysis. *Computational Statistics*. Vol. 2, N°4, 433-459.

ALCAYAGA, M. C. 1984. Caracteres geológicos y metalogénicos del sector NW del yacimiento La Escondida. Región de Antofagasta, Chile, Universidad Católica del Norte, 88 pp., Antofagasta.

BULATOVIC, S.M.; WYSLOUZIL, D. M. Y KANT, C. 1999. Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. Proceedings of the Copper International Conference 1999, 95-111. Phoenix.

CAMPANO P. Y GUERRA N. 1979. Contribución al estudio geoquímico de rocas volcánicas del Norte de Chile comprendidas entre las latitudes 22°00´y 26° 30´ S. Congreso Geológico Chileno N° 2. Actas, vol.4, 110-126. Arica.

CÁRDENAS, E. 2015. Caracterización geoquímica y mineralógica de alteraciones hidrotermales en pórfido cuprífero Escondida. Tesis para optar a magíster en ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, 205 pp. Santiago.

CASTRO, S. 2011. Mejoramiento de la flotación de minerales de Cobre con alto contenido de arcillas. Seminario de Flotación Cyttec. 15 pp., Antofagasta.

CHONG, G. 1973. Reconocimiento Geológico del área Catalina – Sierra de Varas y Estratigrafía del Jurásico del Profeta, Provincia de Antofagasta. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito), 284 pp., Santiago.

CHURCH, S. E., MOSIER, E. L. Y MOTOOKA, J. M., 1987. Mineralogical Basis for the Interpretation of Multi-Element (ICP-AES), Oxalic Acid, and Aqua Regia Partial Digestions of Stream Sediments for Reconnaissance Exploration Geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*: 207-233.

CORTÉS, M. 2015. Diferenciación de unidades litológicas mediante litogeoquímica: aplicaciones en la mina Escondida, Chile. Tesis de Magister, Universidad Católica del Norte: 77 pp, Antofagasta.

DELGADO, C. 2013. Evaluación de un cambio tecnológico para el procesamiento de minerales de alta dureza. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas, Universidad de Chile: 62 pp. Santiago.

FARROKHPAY, S. Y NDLOVU, B. 2013. Effect of phyllosilicate minerals on the rheology, colloidal and flotation behaviour of chalcopyrite mineral. Chemeca: Challenging Tomorrow. Australasian Conference on Chemical Engineering 2013, 1-7. Brisbane.

GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. Sociedad Geológica de Chile. Symposium sobre el Geosinclinal Andino, 1962. N°3, 138 pp. Santiago.

GEOLOGÍA DE MINAS ESCONDIDA, 2015. Antecedentes geológicos de Escondida, instructivo básico para mapeo *Infill* Escondida y Escondida Norte. Reporte Interno.

GOLDSCHMIDT, V. M. 1954. Geochemistry. Oxford University Press: 730 pp. Londres.

GUERRA, N. Y CAMPANO, P. 1997. Interpretación geoquímica de datos de reconocimiento de drenaje por análisis multielementos. Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas, Vol. 2: 1304-1306, Antofagasta.

HAUFF, P.L. 2008. An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. Spectral International Inc., 80001, 303–403 pp.

HERVÉ, M.; SILLITOE, R.; WONG, C.; FERNANDEZ, P.; CRIGNOLA, F.; IPINZA, M. Y URZÚA, F. 2012. Geologic Overview of the Escondida porphyry copper district, Northern Chile. In: Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F., (eds) Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: A tribute to Richard H. Sillitoe. Society of Economic Geologists, Boulder, Special Publication 16: 55-78.

HIKOV, A. 2013. Geochemistry of hydrothermally altered rocks from the Asarel porphyry copper deposit, Central Srednogorie. – Geologica Balc., 26 pp.

KRZYWINSKI M. Y ALTMAN N. 2014. Points of significance: visualizing samples with box plots. Nature Methods 11: 119–120.

MANSER, R.M., 1980. Handbook of silicate flotation. China Building Industry Press. 175 pp.

- MARINOVIC, N.; SMOJE, I.; MAKSAEV, V.; HERVE, M. Y MPODOZIS, C. 1995.** Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica N° 70: 150 pp. Antofagasta.
- MAUREIRA, R., 2009.** Modelamiento probabilístico de la zona mineralógica oxidada en el depósito La Escondida, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad Católica del Norte (Inédito): 66 pp. Antofagasta.
- MENACHO, E. 2014.** Distribución y abundancia de caolinita y sericita y su relación con variables geometalúrgicas de dureza en Escondida Norte. Memoria para optar al grado de Magíster en Geometalurgia, Universidad Católica del Norte: 104 pp. Antofagasta.
- MPODOZIS, C.; MARINOVIC, A.; SMOJE, I. Y CUITIÑO, L. 1993.** Estudio geológico – estructural de la Cordillera de Domeyko entre la Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, 232 pp., Santiago.
- NARANJO, J. Y PUIG, A. 1984.** Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 62-63: 140 pp. Santiago.
- NIEMEYER, H. Y URRUTIA, C. 2009.** Strike-slip along the Sierra de Varas Fault (Cordillera de Domeyko Fault-System), northern Chile. *Andean Geology*. Vol. **36** (1): 37-49. Santiago.
- OYARZÚN, R. Y LILLO, J. 2012.** Size matters: Understanding why some Andean ore deposits are so huge. *Geotemas*, 13, 2012 ISSN: 1576-5172- VII Congreso Geológico de España – Resumen Expandido. Oviedo.
- PADILLA, R.A.; TITLEY, S.R. Y PIMENTEL, F.B. 2001.** Geology of the Escondida porphyry copper deposit. Antofagasta region, northern Chile. *Economic Geology*, Vol. **96**: 307-324.
- PERELLÓ, J. 1983.** Al menos tres etapas en la evolución del “Pórfido Principal” de Escondida: nota de trabajo. Antofagasta, Chile: Minera Utah de Chile, Inc., Reporte interno, 6 pp.
- PÉREZ, E.; GASPAR, J.C. Y BROWN F., 2013.** La geometalurgia: una excelente herramienta multidisciplinaria para la vinculación universidad-industria. *Epistemus*, Vol **14**: 73-76.

PREECE, R., 2016. Geochemical Indicators for Improved Prediction of Geometallurgical Behavior in Mine Operations. Richard Preece Services LLC. Reporte Interno para Minera Escondida Ltda. 156 pp.

QUIROZ, F. 1998. Geología del pórfido cuprífero Escondida, Región de Antofagasta, Chile, Minera Escondida Ltda., Informe Interno: 50 pp. Antofagasta.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRET, R.; DUTTER, R. 2008. Statistical data analysis explained: Applied environmental statistics with R. John Wiley & Sons, Ltd: 343 pp.

RICHARDS, J.; NOBLE, S. Y PRINGLE, M. 1999. A revised Late Eocene age for porphyry Cu magmatism in the Escondida area, Northern Chile. *Economic Geology*, Vol. **94**, (8): 1231-1247.

RICHARDS, J.; BOYCE, A. Y PRINGLE, M. 2001. Geologic evolution of the Escondida Area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, Vol. **96**: 271-305.

ROLLINSON, H. 1993. Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific & Technical: 353 pp.

SEITZ, H. Y WOODLAND, A. 2000 The distribution of lithium in peridotitic and phroxenitic lithologies an indicator of magmatic and metasomatic processes. *Chemical Geology*, v. 166: 47–64.

TOWNLEY, B.; LÓPEZ, F. Y LUCA, R., 2012. Modelamiento geoquímico de los elementos traza Ag, As, Au, Mo y Re, en la mina Escondida y mina Escondida Norte. Reporte Interno para Minera Escondida.

URZÚA, F. 2009. Geology, geochronology and structural evolution of La Escondida copper district, northern Chile: Unpublished Ph.D. thesis, University of Tasmania: 486 pp. Hobart.

VÉLIZ, W. 2004. Relación Espacio Temporal del sistema Pórfido Cuprífero y Epitermal en el Yacimiento Escondida, Provincia de Antofagasta, Segunda Región, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Geología Económica Mención Exploraciones, Universidad Católica del Norte (Inédito): 128 pp. Antofagasta.

VÉLIZ, W. Y CAMACHO J. 2003. Antecedentes Geológicos del yacimiento La Escondida. Congreso Geológico Chileno N°10, Actas 2: 11-20, Concepción.

VÉLIZ, H. Y PADILLA, R.A.; 1997. Geología estructural del yacimiento Escondida: Región de Antofagasta, Chile, Minera Escondida Ltda., Informe interno, 50 pp., Antofagasta.

WACKERNAGEL, H. 2003. Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications, 3rd edition, Springer: 388 pp. Berlin.

ZHENG G.; LIU L.; LIU J.; WANG Y. Y CAO Y., 2009. Study of chlorite flotation and its influencing factors. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 830–837 pp.



