



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE LA MOLIBDENITA Y SU INFLUENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL YACIMIENTO EL TENIENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

GONZALO ALBERTO ZÚÑIGA NAVARRETE

PROFESOR GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LUDOVINA BURGOS RAMÍREZ

XAVIER EMERY

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN

El yacimiento El Teniente es uno de los yacimientos de tipo Pórfido Cuprífero más grandes del mundo. Sus reservas se estiman en las 95 Mtm de Cu y 2,5 Mtm de Mo. El Molibdeno es un subproducto de la explotación de cobre del yacimiento, del cual existe una baja información que permita realizar una planificación minera de su extracción de manera más eficiente. Recientemente en el año 2017 fue elaborado un modelo de recuperación de Mo en base a las Unidades Geometalúrgicas de Cobre del yacimiento El Teniente y los datos recuperación obtenidos de ensayos de flotación de 690 muestras del yacimiento. El modelo carece de información geológica relativa a la Molibdenita, el cual es el principal mineral de mena de Mo y que concentra aproximadamente el 98% del Molibdeno en el yacimiento. Es por este motivo que se realiza una caracterización geológica de la Molibdenita enfocada en conocer la distribución y ocurrencia de ésta en el yacimiento, basándose en el modelo de bloques de recuperación de Mo.

A partir de los datos geometalúrgicos, geoquímicos y mineralógicos de 1254 muestras, se calcularon los coeficientes de correlación entre todos los parámetros disponibles, con el propósito de encontrar las variables que se encuentran asociadas a la recuperación de Mo. Además se incorporaron diversos factores geológicos en la base de datos para identificar el control que ejercen las características geológicas de la roca sobre el comportamiento del Molibdeno en el yacimiento. Los factores geológicos evaluados son la litología, la zona geotécnica de alteración primaria y supérgena, la alteración de la roca y las características mineralógicas de la Molibdenita.

Junto con el manejo estadístico de los datos numéricos se realizó un mapeo geológico y estudio de vetillas de más de 100 tramos de sondaje, además se realizaron descripciones de cortes con vetillas que presentan Molibdenita, ensayos de flotación y análisis de mineralogía QEMSCAN. Este estudio se realizó en miras de caracterizar los estilos de mineralización y asociaciones minerales de la Molibdenita a escala macroscópica y microscópica clasificando los estilos y asociaciones de acuerdo a su litología y evento de alteración correspondiente.

Se determinó que los 4 criterios geológicos estudiados controlan el comportamiento del Molibdeno en el yacimiento y este control puede ser caracterizado mediante las correlaciones entre la Ley de Mo y el Factor K (coeficiente entre el Molibdeno no sulfurado y el Molibdeno Total en la roca), con la recuperación de Mo. La litología presenta los modelos de distribución más representativos para el comportamiento del Mo. La zona geotécnica de alteración supérgena muestra los valores más bajos de Ley y recuperación de Mo en el yacimiento. Se determina que aproximadamente el 75% del Mo del yacimiento se encuentra en vetillas tardimagmáticas y el 25% en vetillas hidrotermales tardías. La Molibdenita presenta características (tamaño de cristales, estilo de mineralización, etc.) propias del evento de alteración donde ocurre la mineralización que influyen en la recuperación de Mo, donde la Molibdenita tardimagmática presenta una mejor recuperación que la Molibdenita hidrotermal. Finalmente se detallan una serie de criterios que establecen una base para el futuro desarrollo de Unidades Geometalúrgicas de Molibdeno en el yacimiento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre, Luz Navarrete Torres, por tu apoyo, no solo en este semestre de mi memoria, sino que en toda mi vida. Estoy eternamente agradecido de como sacaste adelante a la familia y como sacrificabas tu descanso para poder ayudarme o atenderme cuando lo necesitaba. Tú eres la principal razón de que yo esté donde estoy ahora.

Le agradezco también al resto de mi familia, especialmente a mi hermana, Sofía Zúñiga, por darme la alegría y descanso cuando más lo necesitaba, por preocuparte por mí y por ser una excelente compañera y amiga. A mis tíos y amigos de mi madre, sobre todo a Leonel Navarrete y Adriano Jiménez, gracias por darme su apoyo y siempre estar pendientes de mi rendimiento y salud.

Al Coba, Juan Piece, Crecente, Oscar, Diego, Vale y Nacho, por haberme entregado su amistad en el colegio y que esa amistad perdure hasta estos días. Ustedes me daban el descanso y la alegría cuando más la necesitaba, especialmente durante este trabajo y por eso estoy muy agradecido.

Muchas gracias al Club de Toby, todo empezó jugando Tacataca y compartiendo en los ratos libres del primer año de U, y se transformó en una tremenda amistad. Nunca había conocido gente con quien compartiera tantos gustos en común, y me entretuve como nunca en estos 6 años que me acompañaron. Le agradezco a la gente de geología, sobre todo a Blanca y especialmente a Geolokos por enseñarme otro mundo, por esos carretes inolvidables y por entregarme tantas amistades y buenos ratos. A cada uno de ustedes les agradezco por los buenos ratos en los terrenos y los trabajos que hicimos.

Gracias especiales a Roca Juniors y toda su hinchada, todos esos partidos inolvidables dignos de una final de libertadores. Las concentraciones antes y después de cada partido, Los gritos de aliento de la grada cuando la estaba en la cancha. Gracias por todos esos títulos y la diversión que tuve al jugar ese bello deporte que es el fútbol.

A mi profesor guía Brian Townley, le doy las gracias su por su enseñanza en mi área preferida de la geología. Por conseguirme esta memoria y ser un mentor para cualquier consejo que necesité en este trabajo. También quiero darle gracias por su confianza y el ánimo que me dio durante este proyecto. Al igual quiero agradecer al resto de mi comisión evaluadora, Ludovina Burgos y Xavier Emery por su ayuda y disposición en este proyecto.

Le quiero agradecer al equipo de Geología de El Teniente, por darme la oportunidad de hacer este trabajo, que disfrute mucho haciendo. Por toda la ayuda que me brindaron y la buena onda que me dieron. Especial mención a Susana, Alejandra, Caro, Karen, Mary, Don Carlos, Ricardo y a los muchachos de Colón Bajo.

Y por último agradecerle a Iris Mallea, casi no hay palabras para decir todo lo que me apoyaste y me ayudaste en estos últimos 4 años. Agradecer por tu opinión y ayuda con mi trabajo, por los momentos de descanso que me entregabas, por tus regalos y palabras de aliento, por tu compañía y tu confianza, te estoy infinitamente agradecido.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de Tablas	vi
Índice de Gráficos.....	x
Índice de Figuras	xii
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes generales de la mina El Teniente	1
1.2 Ubicación y vías de acceso.....	2
1.3 Conceptos generales	3
1.4 Abreviaturas.....	6
1.4.1 Parámetros y conceptos.....	6
1.4.2 Elementos.....	6
1.4.3 Litologías	7
1.4.4 Minerales.....	8
1.5 Descripción del problema.....	9
1.6 Objetivos	11
1.6.1 Objetivo General.....	11
1.6.2 Objetivos específicos.....	11
2 Marco geológico.....	12
2.1 Geología Regional.....	13
2.1.1 Rocas Estratificadas	13
2.1.2 Rocas Intrusivas	17
2.1.3 Estructuras	17
2.1.4 Evolución Geotectónica	20
2.2 Geología del Yacimiento	22
Unidades Litológicas	24
2.2.2 Geología estructural del yacimiento.....	29
2.2.3 Alteración y Mineralización	31
2.2.4 Modelo Estructural.....	33
3 Metodología	35
4 Resultados	39
4.1 Alteración del Yacimiento y su relación con el Molibdeno.....	39

4.1.1	Clasificación de Vetillas	39
4.1.2	Modelo genético y mineralización de Molibdeno	43
4.1.3	Distribución espacial de la Molibdenita en el yacimiento	46
4.2	Base de datos	51
4.3	Análisis estadísticos	52
4.3.1	Distribución de la Ley de Molibdeno	52
4.3.2	Recuperación de Molibdeno VS Ley de Mo.....	54
4.3.3	Recuperación de Molibdeno VS Factor K.....	58
4.3.4	Correlaciones entre los parámetros.....	61
4.3.5	Correlaciones entre los parámetros Geometalúrgicos y la Alteración	65
4.4	Sectorización de las muestras	69
4.4.1	Segregación del Complejo Máfico El Teniente por ubicación en el yacimiento.....	69
4.4.2	Segregación por Límite HT_HP	75
4.4.3	Segregación por Zona Geotécnica	77
4.5	Caracterización de la Molibdenita en el Yacimiento	80
4.5.1	Molibdenita en muestras de Roca.	80
4.5.2	Caracterización de la Molibdenita en microscopia óptica	87
4.5.3	Ensayos de Flotación y Mineralogía QEMSCAN	99
5	Análisis de Resultados.....	104
5.1	Ley de Mo vs Recuperación de Mo.....	104
5.2	Factor K vs Recuperación de Mo	105
5.3	Correlaciones entre los Parámetros Geometalúrgicos	106
5.4	Correlaciones por litología y alteración	106
5.5	Sectorización de Muestras	109
5.5.1	Segregación por ubicación del Complejo Máfico El Teniente	109
5.5.2	Segregación por Límite HT_HP	110
5.5.3	Segregación por Zonas Geotécnicas.....	111
5.6	Caracterización de la Molibdenita	112
5.6.1	En muestras de roca.....	112
5.6.2	En mineralogía óptica	113
5.6.3	En mineralogía QEMSCAN	114
6	Discusión.....	115
6.1	Parámetros Geometalúrgicos que controlan la Recuperación de Mo	115

6.2	Correlaciones entre los parámetros Geometalúrgicos	117
6.3	Correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración	119
6.4	Sectorización de las muestras	123
6.4.1	Segregación por ubicación en el Complejo Máfico El Teniente	123
6.4.2	Segregación de Muestras por Límite HT/HP	124
6.4.3	Segregación por Zona Geotécnica	125
6.5	Caracterización de la Molibdenita en el yacimiento	125
6.5.1	Caracterización del MoNS	129
6.5.2	Recuperación de Mo vs caracterización de Molibdenita	131
6.6	Recopilación de resultados y definición de zonas de influencia	134
6.6.1	Criterios Base para la construcción de UGM	136
7	Conclusiones.....	138
7.1	Factores y criterios geológicos.....	139
7.1.1	Litología	139
7.1.2	Límite Primario/Secundario	139
7.1.3	Alteración y Características Mineralógicas	140
7.2	Unidades Geometalúrgicas	141
7.3	Actualidad y proyecciones futuras.....	142
7.4	Recomendaciones futuras.....	142
8	Bibliografía	144
9	Anexos	149
	Anexo A. Análisis estadísticos preliminares.....	149
	Histograma de Ley de Cu.....	151
	Anexo B. Distribución de los datos de Recuperación de Mo vs Factor K por litología	154
	Anexo C. Correlaciones entre parámetros Geológicos y Geometalúrgicos	158
	Correlaciones logarítmicas de variables geometalúrgicas y la mineralogía	158
	Anexo D. Correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración.....	159
	Correlaciones Logarítmicas.....	159
	Anexo E. Mapeo de Tramos de Sondaje	162
	Anexo F. Descripción de cortes de mineralogía	167
	Anexo G Reportes QEMSCAN 2015 y 2016.....	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Condiciones del ensayo de flotación alcalina para la muestras de El Teniente	3
Tabla 2.1: Clasificación de Estructuras Geológicas de El Teniente	30
Tabla 4.1: Catálogo de vetillas presentes en el Yacimiento El Teniente, según la clasificación del Estándar de Geología	40
Tabla 4.2: Comparación entre vetillas con presencia de molibdenita y su etapa de alteración.....	41
Tabla 4.3: Parámetros Estadísticos de la Ley de Mo	52
Tabla 4.4: Valores promedio de Ley y Recuperación Rougher de Cu y Mo para la litología respectiva.....	54
Tabla 4.5: Parámetros estadísticos de Recuperación de Mo según litología	54
Tabla 4.6: Parámetros estadísticos de Ley de Mo según litología	55
Tabla 4.7: Características de las regresiones logarítmicas de los gráficos de Ley Mo vs Rec Mo por litología	57
Tabla 4.8: Factor K vs Rec Mo, parámetros de las regresiones exponenciales según litología.....	59
Tabla 4.9: Índices de Correlación Lineal entre los Parámetros Geometalúrgicos	61
Tabla 4.10: Índices de Correlación Logarítmica entre los Parámetros Geometalúrgicos	61
Tabla 4.11: Correlación lineal de los parámetros Geometalúrgicos principales con la Mineralogía.....	62
Tabla 4.12: Correlaciones Lineales de la mineralogía con las Leyes de Mo de Concentrado y Relave.....	63
Tabla 4.13: Correlación lineal de la Geoquímica con los parámetros Geometalúrgicos Principales.....	64
Tabla 4.14: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración	65
Tabla 4.15: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración.....	66
Tabla 4.16: Porcentaje de Alteración según litología de las muestras	66
Tabla 4.17: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET	67
Tabla 4.18: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Tonalita	67
Tabla 4.19: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido dacítico	68
Tabla 4.20: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido diorítico	68
Tabla 4.21: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de BXIPDI	68
Tabla 4.22: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Brecha de Anhidrita.....	69

Tabla 4.23: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al PDA	71
Tabla 4.24: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al PDI	71
Tabla 4.25: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas a la Tonalita Sewell.....	72
Tabla 4.26: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al CBB	73
Tabla 4.27: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET al oeste del CBB	73
Tabla 4.28: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET al este del CBB	74
Tabla 4.29: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET del Rajo Sur	74
Tabla 4.30: Comparación de valores de alteración promedio del Límite HT_HP con el mapeo de alteración.....	76
Tabla 4.31: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP	76
Tabla 4.32: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de CMET	76
Tabla 4.33: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de TO.....	76
Tabla 4.34: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de PDI.....	76
Tabla 4.35: Correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos para los Dominios Hidrotermales	77
Tabla 4.36: Características de las zonas geotécnicas	78
Tabla 4.37: Parámetros geometalúrgicos promedio de las zonas geotécnicas.....	78
Tabla 4.38: Correlaciones entre parámetros geometalúrgicos según la zona geotécnica	79
Tabla 4.39: Características de los cortes estudiados	87
Tabla 4.40: Datos de muestras y resultados de ensayo de flotación	99
Tabla 5.1: Recopilación de Correlaciones lineales entre variables geometalúrgicas para las diferentes litologías	108
Tabla 5.2: Correlaciones entre la Recuperación de Mo y de alteración para las diferentes litologías	108
Tabla 5.3: Recopilación de Correlaciones lineales entre variables geometalúrgicas para las agrupaciones de CMET	109
Tabla 5.4: Recopilación de Correlaciones lineales entre la Ley de Mo y la alteración para las agrupaciones de CMET	109
Tabla 5.5: Recopilación de correlaciones lineales entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración para las agrupaciones de CMET	110
Tabla 6.1: Correlación entre el MoNS y la Rec_Mo_Ro con la alteración de Brechas Hidrotermales	122
Tabla 6.2: Clasificación de vetillas estudiadas según el estándar de geología	126

Tabla 6.3: Comparación entre estilos de mineralización macroscópicos y microscópicos	126
Tabla 6.4: Valores promedio del Factor K por litología.....	130
Tabla 6.5: Asociaciones de la Recuperación de Mo en los Intrusivos Félsicos.....	136
Tabla 9.1: Parámetros estadísticos de la Ley de Mo sin datos aberrantes	149
Tabla 9.2: Parámetros estadísticos para la Ley de Cu.....	150
Tabla 9.3: Parámetros estadísticos de la Recuperación de Mo por Sector Productivo	152
Tabla 9.4: Parámetros estadísticos de la Ley de Mo por Sector Productivo	152
Tabla 9.5: Correlaciones Logarítmicas entre la Mineralogía y los parámetros Geometalúrgicos principales	158
Tabla 9.6: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET	159
Tabla 9.7: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Tonalita.....	159
Tabla 9.8: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido dacítico.....	160
Tabla 9.9: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido diorítico.....	160
Tabla 9.10: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de BXIPDI.....	160
Tabla 9.11: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Brecha de Anhidrita	161
Tabla 9.12: Mapeo de sondajes muestras 1 a 13.....	162
Tabla 9.13: Mapeo de sondajes muestras 14 a 27.....	163
Tabla 9.14: Mapeo de sondajes muestras 28 a 41.....	164
Tabla 9.15: Mapeo de sondajes muestras 42 a 55.....	165
Tabla 9.16: Mapeo de Sondajes Muestras 56 a 69	166
Tabla 9.17: Descripción corte PA0641 @51	167
Tabla 9.18: Descripción de corte PA0641 @60	167
Tabla 9.19: Descripción de corte PA0649@3 (1)	167
Tabla 9.20: Descripción de corte PA0649@3 (2)	168
Tabla 9.21: Descripción de corte PA0668@9 (1)	168
Tabla 9.22: Descripción de corte PA0668@9 (2)	168
Tabla 9.23: Descripción de corte PA0668@9 (3)	169
Tabla 9.24: Descripción de corte PA0672@9	169
Tabla 9.25: Descripción de corte PA0678@21	169
Tabla 9.26: Descripción de corte PA0694@60 (1)	170
Tabla 9.27: Descripción de corte PA0694@60 (2)	170
Tabla 9.28: Descripción de corte PA0699@9	170
Tabla 9.29: Descripción de corte DDH2654@119.05.....	171
Tabla 9.30: Descripción de corte PA0722@2.06.....	171
Tabla 9.31: Descripción de corte PA0710@24.4	171
Tabla 9.32: Descripción de corte DDH1801@430.....	172
Tabla 9.33: Descripción de corte DDH1801@440.....	172
Tabla 9.34: Descripción de corte DDH1801@454.....	172

Tabla 9.35: Descripción de corte DDH2544@19.08.....	173
Tabla 9.36: Descripción de corte DDH2791@23.4.....	173

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1: Recuperación y Ley media de Molibdenita Mensual del año 2015	10
Gráfico 1.2: Recuperación y Ley media de Molibdenita Mensual del año 2016	10
Gráfico 4.1: Densidad de probabilidad con distribución Log-Normal para las Leyes de Mo	52
Gráfico 4.2: Histograma de Ley de Mo	53
Gráfico 4.3: Dispersión de las Leyes de Cu y Mo de las muestras del yacimiento.....	53
Gráfico 4.4: Diagrama Box Plot para la Recuperación de Mo según Litología	55
Gráfico 4.5: Diagrama Box Plot para la Ley de Mo según Litología	55
Gráfico 4.6: Dispersión Ley de Mo vs Recuperación Rougher de Mo con ajuste logarítmico	56
Gráfico 4.7: Regresiones logarítmicas de Ley de Mo vs Recuperación de Mo para cada litología	57
Gráfico 4.8: Distribución de Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial	58
Gráfico 4.9: Ajuste exponencial de la Recuperación de Mo vs Factor K por litología.....	60
Gráfico 4.10: Gráfico de Barras del tipo de Alteración según la litología correspondiente	66
Gráfico 4.11: Asociación mineral de Molibdenita relativa vs Recuperación y Ley de Mo	100
Gráfico 4.12: Grado de Liberación de Molibdenita relativo vs Recuperación y Ley de Mo	100
Gráfico 4.13: Tamaño de Molibdenita relativo vs Recuperación y Ley de Mo	101
Gráfico 4.14: Tamaño de Molibdenita libre relativo vs Recuperación y Ley de Mo	101
Gráfico 4.15: Recuperación de Mo vs % Filosilicatos en la muestra	102
Gráfico 4.16: Recuperación de Mo vs % Biotita en la muestra.....	103
Gráfico 4.17: Recuperación de Mo vs % Muscovita/Sericita en la muestra	103
Gráfico 6.1: %Vetillas con contenido de Molibdenita según su alteración vs Recuperación de Mo	132
Gráfico 9.1: Densidad de probabilidad con distribución Normal para las Leyes de Mo	149
Gráfico 9.2: Ajuste Normal de distribución de las Leyes de Mo, sin datos aberrantes .	150
Gráfico 9.3: Densidad de probabilidad con distribución Log-Normal para las Leyes de Cu	151
Gráfico 9.4: Histograma de Ley de Cu	151
Gráfico 9.5: Diagrama Box Plot para la Recuperación de Mo por Sector Productivo ...	152
Gráfico 9.6: Diagrama Box Plot para la Ley de Mo por Sector Productivo	153
Gráfico 9.7: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del CMET	154
Gráfico 9.8: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del PDA	154
Gráfico 9.9: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del PDI	155
Gráfico 9.10: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las muestras de Tonalita.....	155

Gráfico 9.11: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del BXIPDA	156
Gráfico 9.12: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del BXANH	156
Gráfico 9.13: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las Brechas ígneas	157
Gráfico 9.14: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las Brechas de Turmalina, Cuarzo, Sulfuros y Sericita	157
Gráfico 9.15: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación COLON 2015	175
Gráfico 9.16: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SAG 2015	175
Gráfico 9.17: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SEWELL 2015	176
Gráfico 9.18: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación COLON 2016	176
Gráfico 9.19: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SAG 2016	177
Gráfico 9.20: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación Sewell 201	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente de CODELCO. Región del Libertador Bernardo O'Higgins. En detalle el acceso desde la Ciudad de Rancagua a la Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva y de las distintas localidades.	2
Figura 2.1: Principal subdivisión de la Cordillera de los Andes extraído de Aubouin (1973). CC: Cordillera de la Costa; CD: Depresión Central; MC: Cordillera Principal; FC: Cordillera Frontal. 1: Cordillera de la Costa; 2: Cordillera de los Andes Central; 3: Altiplano/Puna/Plateau; 4: Cordillera de los Andes Oriental.....	12
Figura 2.2: Mapa Geológico Regional (Modificado de Charrier et al., 1996). Cordillera de la Costa: (1) Formaciones Veta Negra y Lo Prado. Depósitos de cuenca intra-arco volcánico (dominio volcánico) y marino sedimentarios (Jurásico Superior a Cretácico Inferior) (2) Depósitos volcánicos continentales (Cretácico inferior a superior) (3) Granitoides (Intrusivos, Cretácico). Cordillera Principal: (4) Formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas, Nacientes del Teno (indiferenciadas, marino y continental, Jurásico). (5) Formación Colimapu (Jurásico Superior a Cretácico inferior, marino). (6) Formación Coya-Machalí (Paleógeno). (7) Formación Farellones (Neógeno). (8) Granitoides (Paleógeno-Neógeno). (9) Depósitos Volcánicos (Plioceno-Pleistoceno). (10) Depósitos Cuaternarios.	13
Figura 2.3: Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrencia sinistral de rumbo N50°W que coincide con la zona de falla Río Blanco-Codegua (tomado de Rivera y Falcón, 1998).	18
Figura 2.4: Geología del distrito El Teniente. Se observa el lineamiento NW de los relictos de los centros eruptivos a lo largo de la Falla Codegua (Rivera and Falcón (1998), reporte inédito para CODELCO).....	19
Figura 2.5: Marco Geotectónico Stern y Skewes (1995, 1997): (A) Perfiles transversales de la evolución magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34°S entre el Mioceno al presente. (B) Ubicación del segmento Zona volcánica Central (ZVC), zona de flat-slab y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Triángulos indican el frente volcánico actualmente activo; los círculos negros representan los pórfidos más antiguos de la Zona Volcánica Central.	20
Figura 2.6: Correlación entre los eventos tectónicos y depósitos cenozoicos en ambas vertientes de la Cordillera Principal en Chile y Argentina centrales. (Charrier et. al. 2009).	21
Figura 2.7: Geología simplificada mostrada a través del mapa litológico del Niv El Teniente 6 (cota 2165 msnm.) del yacimiento El Teniente (modificada de la base de datos de la mina).....	23
Figura 2.8: Mapa geológico con las principales Unidades Litológicas del proyecto Nuevo Nivel Mina, cota 1.880 m (confeccionado por la Superintendencia de Geología, mina El Teniente).	24
Figura 2.9: Zona de Falla El Teniente (ZFT). (Modificado de Garrido, 1995).	30
Figura 2.10: Modelo Estructural y Genético del Yacimiento El Teniente (Modificado de Cannel et. al., 2005)	34
Figura 3.1: Resumen de metodología	38

Figura 4.1: Correlación de la clasificación de las vetillas presentes en El Teniente (Estándares de geología de El Teniente (2003); Cannel et al. (2004) y Vry et al. (2010).)	39
Figura 4.2: Vetillas V3 de Cuarzo y Biotita con presencia de Molibdenita	41
Figura 4.3: Vetillas V4 con relleno de Anhidrita con presencia de Molibdenita diseminada	41
Figura 4.4: Vetillas V5 de Cuarzo con presencia de Molibdenita diseminada	42
Figura 4.5: Vetillas V7 de Molibdenita masiva y sin halo	42
Figura 4.6: Vetillas V10-V11-V12 con sulfuros masivos y halo cuarzo-sericítico-clorítico bien definido	42
Figura 4.7: Vetillas V15 de turmalina con molibdenita diseminada, V14 de carbonatos y yeso con molibdenita diseminada	42
Figura 4.8: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota profunda (1960 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.	46
Figura 4.9: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota intermedia (2150 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.	47
Figura 4.10: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota somera (2210 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.	47
Figura 4.11: Distribución de las concentraciones de MoNS en El Teniente, Cortesía de Codelco, división El Teniente. Informe N°1-003-2017, Garrido, 2017.	48
Figura 4.12: Ubicación de los principales sectores mineros en El Teniente y sus estructuras asociadas con presencia de Molibdenita. Cortesía de Codelco, división El Teniente. Informe N°1-003-2017, Garrido, 2017.	49
Figura 4.13: Distribución de las muestras de CMET en el Yacimiento El Teniente	70
Figura 4.14: Agrupaciones de las muestras de CMET de acuerdo a su distribución en el yacimiento y la cercanía con las otras litologías	70
Figura 4.15: Límite HT_HP en el yacimiento	75
Figura 4.16: Clasificación de las muestras según las zonas geotécnicas	77
Figura 4.17: Rosetas de Molibdenita	81
Figura 4.18: Molibdenita diseminada/ en pequeños cúmulos	82
Figura 4.19: Molibdenita en cúmulos	82
Figura 4.20: Molibdenita en cúmulos lentiformes en vetillas	83
Figura 4.21: Molibdenita en sutura	83
Figura 4.22: Molibdenita en relleno reutilizando una vetilla previa	84
Figura 4.23: Molibdenita en los bordes de una vetilla reutilizada	84
Figura 4.24: Molibdenita diseminada fina en vetillas	85
Figura 4.25: Molibdenita en patina en vetillas y fracturas	85
Figura 4.26: Molibdenita en el Halo de un vetilla	86
Figura 4.27: Molibdenita en matriz de brecha hidrotermal	86
Figura 4.28: Cristales de Molibdenita aislados en vetillas Tardimagmáticas	88
Figura 4.29: Cúmulos grandes de cristales de Molibdenita en vetillas TM	88
Figura 4.30: Cristales de Molibdenita dispuestos en forma radia	89

Figura 4.31: Cúmulos de cristales de Molibdenita sin orientación preferente	89
Figura 4.32: Sutura de Molibdenita de cristales de gran tamaño	90
Figura 4.33: Sutura de cristales finos de Molibdenita.....	90
Figura 4.34: Cúmulos de cristales de Molibdenita lentiformes	91
Figura 4.35: Cristales finos de Molibdenita en bordes de vetilla.....	91
Figura 4.36: Cristales de Molibdenita diseminados en el corte	92
Figura 4.37: Cristales Anhedrales de Molibdenita	92
Figura 4.38: Relleno intergranular de Molibdenita.....	93
Figura 4.39: Halo de cristales finos de Molibdenita	93
Figura 4.40: cristales muy finos de Molibdenita diseminados en vetillas.....	94
Figura 4.41: Cristales de Molibdenita diseminados en matriz de brecha	94
Figura 4.42: Asociación Molibdenita-Cuarzo en vetillas TM.....	95
Figura 4.43: Asociación Molibdenita-Sericita en vetillas TM.....	95
Figura 4.44: Asociación Molibdenita-Bornita en vetillas TM	96
Figura 4.45: Asociación Molibdenita-Calcopirita en vetillas TM.....	96
Figura 4.46: Asociación Molibdenita-Cuarzo en vetillas HP	97
Figura 4.47: Asociación Molibdenita-Calcopirita en vetillas HP.....	97
Figura 4.48: Asociación Molibdenita-Anhidrita/Yeso en vetillas HT.....	98
Figura 4.49: Asociación Molibdenita-Sericita en vetillas HT.....	98

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES DE LA MINA EL TENIENTE

El Yacimiento El Teniente, operado por la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO-CHILE), corresponde a un depósito de cobre y molibdeno, que debido a su extensión se encuentra clasificado como un yacimiento “súper gigante”. Con más de 3000 km de galerías subterráneas un área aproximada de 6 km² y una extensión vertical actual superior a 1 km es considerada como la mina subterránea más grande del mundo. Este yacimiento se encuentra ubicado en la Cordillera de los Andes Centrales, en la Región del Libertador Bernardo O’Higgins, 54 km al este de la ciudad de Rancagua entre los 2200 y 3200 msnm. Junto con el pórfido Rio Blanco-Los Bronces, forman parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno el cual se encuentra ubicado en el sector norte de la Zona Volcánica Sur Andina (ZVS). Además el depósito se encuentra emplazado 260 km al oeste de la Fosa Oceánica donde ocurre la subducción de la Placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Las estimaciones de sus recursos alcanzan los 95 millones de toneladas métricas (Mtm), mientras que sus reservas superan los 75 Mtm con leyes superiores al 0,82% Cu y 0,015% Mo (Letelier, 2017). La producción anual es de 475 mil toneladas de cobre fino las cuales se disponen principalmente en forma de lingotes refinados a fuego (RAF) y cátodos de cobre. Como resultado del procedimiento, del mineral también se obtiene 6.683 toneladas métricas de molibdeno (datos de CODELCO año 2016. Se suman además del proyecto Nuevo Nivel Mina 2020 millones de toneladas métricas de reservas con una ley media de cobre de 0,86% y de molibdeno de 0,022%, esperándose una producción de 430 mil toneladas de cobre fino a partir del 2018. La geología del yacimiento se compone principalmente por rocas volcánicas del Mioceno correspondientes a la Formación Farellones, las cual se encuentra localmente intruída por plutones e intrusivos ígneos de composición ácida a intermedia, además de brechas hidrotermales (Kay *et al.*, 1991). Las rocas presentan distintos grados de alteración y mineralización encontrándose como minerales de mena principales la Calcopirita, Bornita y Molibdenita.

La extracción de mineral del Yacimiento comenzó en el año 1905 y hasta el año 2000 el método de explotación utilizado para la extracción de mineral fue el método Hundimiento Gravitacional de Bloques (*Block Caving*). Posterior a ese año la metodología de explotación utilizada corresponde al Hundimiento y Derrumbe de Paneles (*Panel Caving*) (Rojas *et al.*, 2001), donde se utiliza el peso que ejerce el cerro para facilitar el quiebre y posterior hundimiento del techo, generando así una estructura de colapso en la superficie, la cual es denominada “Cavidad Teniente”. La modificación en el método de explotación fue producto de los avances en la explotación de la roca primaria, la cual se encuentra a mayor profundidad y posee una mayor dureza. Los sectores de producción de la mina se encuentran emplazados alrededor de la Pipa Brecha Braden, incluyendo los actuales niveles productivos, así como el Nuevo Nivel Mina (NNM), que se encuentra en etapa de implementación.

1.2 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La mina El Teniente se sitúa en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, provincia del Cachapoal, municipio de Machalí, aproximadamente a 50 km al noreste de la capital de la región, la ciudad de Rancagua. Sus coordenadas geográficas son latitud 34°14" S y longitud 70°21" W. El yacimiento se ubica a una altura de 3200 msnm. y alcanza una profundidad hasta los 2200 msnm. En la Figura 1.1 se observa el mapa de la ubicación del yacimiento en la región, y los tramos de acceso a la mina.

Para acceder a la mina se debe entrar desde la ciudad de Rancagua a través de la Avenida Monseñor Escrivá de Balaguer, hasta llegar a una carretera asfaltada con una longitud de 60 km llamada "Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva" (ex carretera El Cobre, H-25), la que une la ciudad de Rancagua con la localidad de Colón Alto en el kilómetro 58. La carretera está dividida en 5 tramos. El primer tramo es de uso público hasta el control de acceso al yacimiento (Barrera Maitenes). Los tramos siguientes son caminos privados y su circulación está restringida.

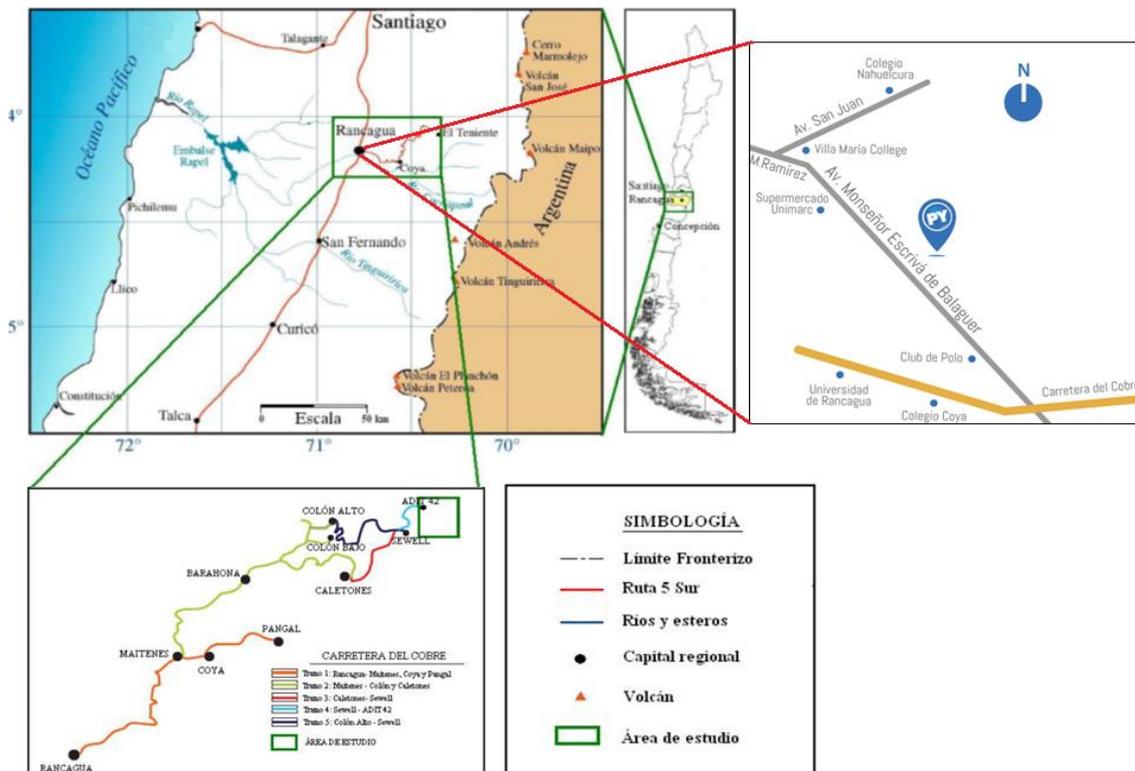


Figura 1.1: Mapa de ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente de CODELCO. Región del Libertador Bernardo O'Higgins. En detalle el acceso desde la Ciudad de Rancagua a la Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva y de las distintas localidades.

El ingreso a las instalaciones de producción se realiza mediante vehículos desde la localidad de Colón Alto. El acceso hacia el interior de la mina se realiza por medio de un túnel de 8 km de largo, utilizando un ferrocarril eléctrico que comunica con el niv El Teniente 8 (1983 msnm.). El ingreso a los distintos niveles de la mina se lleva a cabo a través de piques principales (Pique B, Pique C y Pique 2) y rampas, las que permiten el tránsito de vehículos motorizados a los diferentes frentes de desarrollo.

1.3 CONCEPTOS GENERALES

Coefficiente de Correlación de Pearson: Es una medida de relación lineal entre 2 variables aleatorias cuantitativas, independiente de la escala de las variables. El valor que puede tomar el coeficiente es entre 0 y 1, mientras más cercano a 1 sea el coeficiente, las variables se encontraran más relacionadas.

Distribución Log Normal: Es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo presenta una distribución normal.

Distribución Normal: Es una distribución de probabilidad que presenta como características ser simétrica con respecto a su media, su moda y mediana son equivalentes a su media y el gráfico de su función densidad presenta la forma de una campana de gauss, por tanto su función de probabilidad corresponde a una función Gaussiana.

Ensayo de Flotación Rougher: Corresponde a un ensayo de flotación primaria el cual se realiza en un laboratorio inmediatamente después de la primera molienda proveniente de la alimentación. Los ensayos de flotación rougher presentan la conveniencia que mantienen fijos sus parámetros para todos los ensayos realizados. Para las muestras de este proyecto, los ensayos de flotación se realizaron en el laboratorio SGS, y las condiciones del ensayo se presentan a continuación:

Tabla 1.1: Condiciones del ensayo de flotación alcalina para la muestras de El Teniente

Proceso	Descripción
Alimentación	1 kg muestra mineral base seca
Grado de molienda	20% +100# Tyler, aprox. (150 micrones)
Volumen pulpa flotación	2.600 cc
Sólido de flotación	31%
pH flotación	9.5
Frecuencia de paleteo	Manual cada 10 segundos
Tiempo total de acondicionamiento	30 minutos
Tiempo de flotación	12 minutos
Máquina de flotación	WEMCO
Agitación mecánica	1440 rpm
Reactivo colector	D-101/NP-107 (1/1), (34 g/t molienda)
	SIPX (6 g/t acondicionamiento)
	Diesel oil, (15 g/t, molienda)
Reactivo espumante	F-810/ DF-1012 Mezcla 90/10 % en peso (8 g/t acondicionamiento)
Reactivo modificador de pH	Cal pulverizada -100# Ty, acondicionada a la molienda, para obtener pH 9.5
Agua de lavado bolas/enrase	Agua potable
Agua de reposición	Agua potable acondicionada con cal a pH 9.5 y con una concentración de espumante similar a la que tiene el agua con 10 g/t de espumante (4.5 mg/l)

Factor HP: Coeficiente adimensional que indica la razón de alteración Hidrotermal Principal en la roca en relación al total de alteración hidrotermal presente.

$$F(HP) = \frac{\%HP}{(\%HP + \%HT)}$$

Ecuación 1: Factor HP

Factor HT: Coeficiente adimensional que indica la razón de alteración Hidrotermal Tardía en la roca en relación al total de alteración hidrotermal presente.

$$F(HT) = \frac{\%HT}{(\%HP + \%HT)}$$

Ecuación 2: Factor HT

Factor K (de Molibdeno): Es resultado de normalizar el porcentaje de Molibdeno no sulfurado de la roca, es decir corresponde a la fracción de Molibdeno no sulfurado presente (%MoNS) en relación con el Molibdeno total de la muestra de roca, como se puede apreciar en la Ecuación 3.

$$Factor\ K\ [\%] = \frac{\%MoNS}{\%Mot} \times 100$$

Ecuación 3: Factor K

Flotación: Es una etapa fisicoquímica del procesamiento del mineral, consiste en 3 fases (sólido-líquido-gaseoso) y tiene por objetivo separar las especies minerales de mena mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire que se generan por medio de adición de químicos reactivos. A la etapa primaria del proceso flotación se le conoce como flotación rougher, donde el material obtenido en el relave no vuelve a tratarse mediante una segunda etapa de flotación.

Grado de Liberación: Es el porcentaje de superficie expuesta que presenta un mineral que se encuentra dentro de una partícula en asociación con otros minerales. Si el grado de liberación es superior al 90% se considera que el mineral se encuentra libre.

Ley de un mineral: Corresponde al porcentaje o concentración del mineral de mena presente en la roca.

Minerales sulfurados: Corresponden a los minerales de mena, que contienen en su estructura molecular al Azufre en un estado de oxidación de -2. Una Característica particular de estos minerales es que en el proceso de flotación, éstos tienden a subir por las celdas columnares para ubicarse en el concentrado, la excepción a esta característica es la Pirita (FeS_2) la cual decanta en el proceso de flotación y no se considera un mineral de mena.

Minerales no sulfurados: Corresponden a los minerales los cuales presentan en su estructura molecular elementos de interés económico (como el Cobre y el Molibdeno). Sin embargo éstos no se encuentran asociados a átomos de Azufre con estado de oxidación -2, en cambio se encuentran en forma de óxidos, sulfatos, en cristales muy finos, etc. Estos minerales tienden a decantar por las celdas columnares en la flotación y por ende tienden a aumentar su proporción en el relave.

Mineralogía QEMSCAN: Es un proveedor automático de información de análisis cuantitativo de minerales. Donde el dispositivo realiza una evaluación cuantitativa de los minerales mediante el escaneo de microscopía electrónica. La información entregada se dispone en un reporte con datos de mineralogía, asociaciones minerales, tamaño de cristales, ilustraciones, etc.

Molienda: Etapa del procesamiento mineral donde el material extraído o la muestra de roca es fracturada mediante un molino de bolas o de barras de manera de obtener un material más reducido. El tamaño de malla utilizado para las muestras del proyecto en el laboratorio SGS es #100, que corresponde a 150 µm.

Recuperación Rougher: Se refiere al porcentaje del mineral de mena obtenido luego de un ensayo de Flotación Rougher en relación al porcentaje total del mineral de mena que se encuentra en la roca.

Unidades geometalúrgicas: Corresponden a unidades o cuerpos volumétricos dentro del yacimiento El Teniente que comparten un mismo rango de valores respecto a sus parámetros geometalúrgicos, incorporando otros criterios geológicos dentro de su construcción.

1.4 ABREVIATURAS

1.4.1 Parámetros y conceptos

%Cu_Cab: Ley de Cobre presente en la roca o porcentaje de Cobre en la muestra de alimentación o cabeza.

F(HP): Factor HP o Factor Hidrotermal Principal.

F(HT): Factor HT o Factor Hidrotermal Tardío.

%HP: Porcentaje de la roca afectada por alteración Hidrotermal Principal.

%HT: Porcentaje de alteración Hidrotermal Tardía presente en la Roca.

%PreTM: porcentaje de la roca solo afectada por alteración Pre-Tardimagmática.

%TM: Porcentaje de alteración Tardimagmática presente en la Roca.

%Mo_Cab: Ley de Molibdeno presente en la roca o porcentaje de Molibdeno en la muestra de alimentación o cabeza.

%MoNS_Cab: Porcentaje de Molibdeno no sulfurado presente en la muestra de alimentación de la roca.

%Mo_Conc: Porcentaje de Molibdeno presente en la muestra de concentrado, luego que la muestra cabeza pasa por el ensayo de flotación rougher.

%MoNS_Conc: Porcentaje de Molibdeno no sulfurado presente en la muestra de concentrado, luego que la muestra cabeza pasa por el ensayo de flotación rougher.

%Mo_Rel: Porcentaje de Molibdeno presente en la muestra de concentrado, luego que la muestra cabeza pasa por el ensayo de flotación rougher.

%MoNS_Rel: Porcentaje de Molibdeno no sulfurado presente en la muestra de relave, luego que la muestra cabeza pasa por el ensayo de flotación rougher.

%Rec_Cu_Ro: Recuperación Rougher de Cobre.

%Rec_Mo_Ro / Rec_Mo: Recuperación Rougher de Molibdeno.

UGM: Unidades Geometalúrgicas

µm: Micrómetros o Micrones, equivalentes a 10^{-6} Milímetros.

1.4.2 Elementos

As: Arsénico

Al: Aluminio

C: Carbono

Ca: Calcio

Co: Cobalto

Cr: Cromo
Cu: Cobre
Fe: Hierro
K: Potasio
Mg: Magnesio
Mn: Manganeseo
Mo: Molibdeno
Na: Sodio
Ni: Níquel
P: Fósforo
Pb: Plomo
Re: Renio
S: Azufre
Si: Sílice
Ti: Titanio

1.4.3 Litologías

BX Ígneas: Brechas ígneas.

BXICMET: Brecha Ígnea del Complejo Máfico El Teniente.

BXITO: Brecha Ígnea de Tonalita.

BXIPDA: Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico.

BXIPDI: Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico.

BX HT: Brechas hidrotermales

BXANH: Brecha de Anhidrita.

BXQZ: Brecha de Cuarzo.

BXCL: Brecha de Clorita.

BXSU: Brecha de Matriz de Sulfuros.

BXTU: Brecha de Matriz de Turmalina.

BB: Brecha Braden.

CBB: Complejo de Brechas Braden

CMET: Complejo Máfico El Teniente.

PDA: Pórfido Dacítico.

PDI: Pórfidos Dioríticos.

TO: Tonalita.

1.4.4 **Minerales**

Act: Actinolita

Aspy: Arsenopirita

Anh: Anhidrita

Bo: Bornita

Cal/Cc: Calcosina

Carb: Carbonatos

Chl: Clorita

Cov: Covelina

Cpy: Calcopirita

Epi: Epidota

Moly: Molibdenita

Mt: Magnetita

Plg: Plagioclasa

Py: Pirita

Qz: Cuarzo

Ser: Sericita

Ten: Tennantita

Tur: Turmalina

Ys: Yeso

1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Molibdeno es un importante subproducto en el Yacimiento El Teniente, este elemento metálico es utilizado esencialmente como materia prima para aleaciones de acero, aportando diversas propiedades como resistencia a la temperatura, resistencia a la corrosión, mayor durabilidad y fortaleza.

Chile es el segundo país con los mayores recursos de Molibdeno en el mundo, siendo el primero Estados Unidos. No obstante, el yacimiento El Teniente presenta las mayores reservas de Molibdeno con un total de 2,5 Mt, más que cualquier otro yacimiento en el mundo. La ley media de Molibdeno en El Teniente es aproximadamente de 0,02%, pero existen sectores del yacimiento donde la ley alcanza valores de 0,1% y en zonas puntuales puede llegar hasta el 2,3%.

La problemática surge al analizar los valores de recuperación de Molibdenita en el yacimiento, en donde se hace un énfasis en los valores de Recuperación Global mensual de los años 2015 y 2016. Según los datos entregados por el laboratorio SGS, se evidencia una leve disminución de la recuperación de Molibdeno en cada año, además de una gran fluctuación de ésta en cada mes. Estos resultados de recuperación de Mo presentan dificultades para cumplir con las metas mensuales planteadas por Codelco y el problema se acentúa cuando se analizan en detalle los diferentes sectores del yacimiento, debido a que se encuentran sectores (como el sector Pacífico Superior) que presentan una alta Ley de Molibdeno cuyos valores de recuperación de Molibdeno son bastante bajos, rondando el 60%. Por lo que se busca desarrollar un Modelo de recuperación de Mo detallado que permita que el proceso de recuperación de Mo se desarrolle con mayor eficiencia, producto de tener una planificación basada en torno al Modelo y no solo a los parámetros geometalúrgicos que se manejan.

A partir del Modelo de recuperación de Mo elaborado el 2017 se observa que existen diversos sectores en el yacimiento que presentan grandes variaciones en la recuperación las cuales no pueden explicarse directamente producto de los valores de parámetros geometalúrgicos como la Ley de Mo o el Factor K. Por lo que se buscan en función de robustecer el Modelo, realizar una caracterización geológica que señale los parámetros geológicos que pueden influir en la recuperación del Molibdeno. La caracterización geológica debe desarrollarse en torno a la UGM (Unidades Geometalúrgicas) de Cobre, debido a que los frentes de explotación y el diseño de producción del yacimiento se determinan en base a éstas.

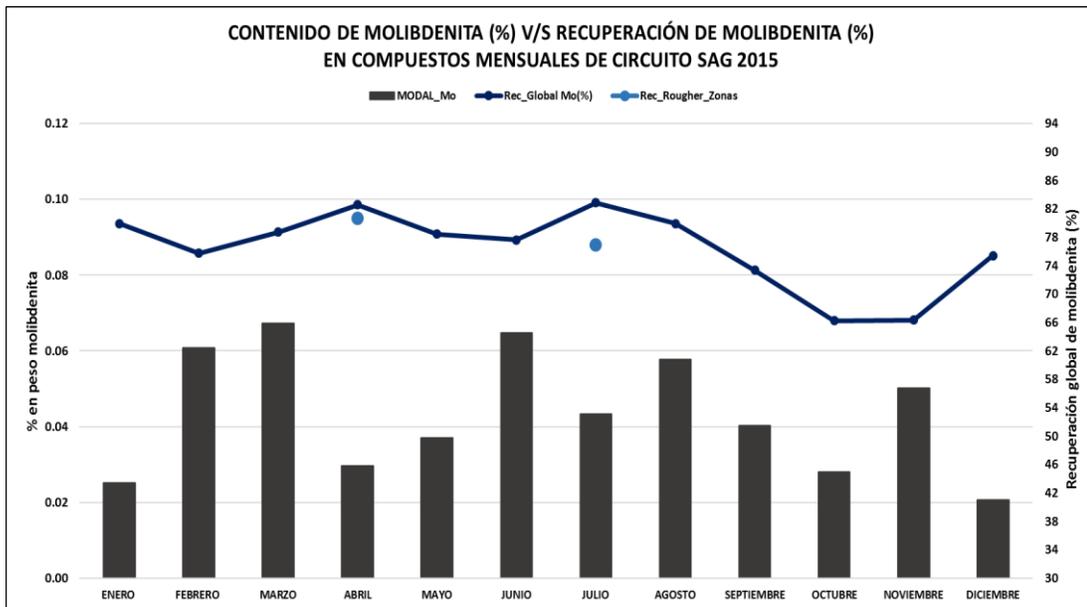


Gráfico 1.1: Recuperación y Ley media de Molibdenita Mensual del año 2015

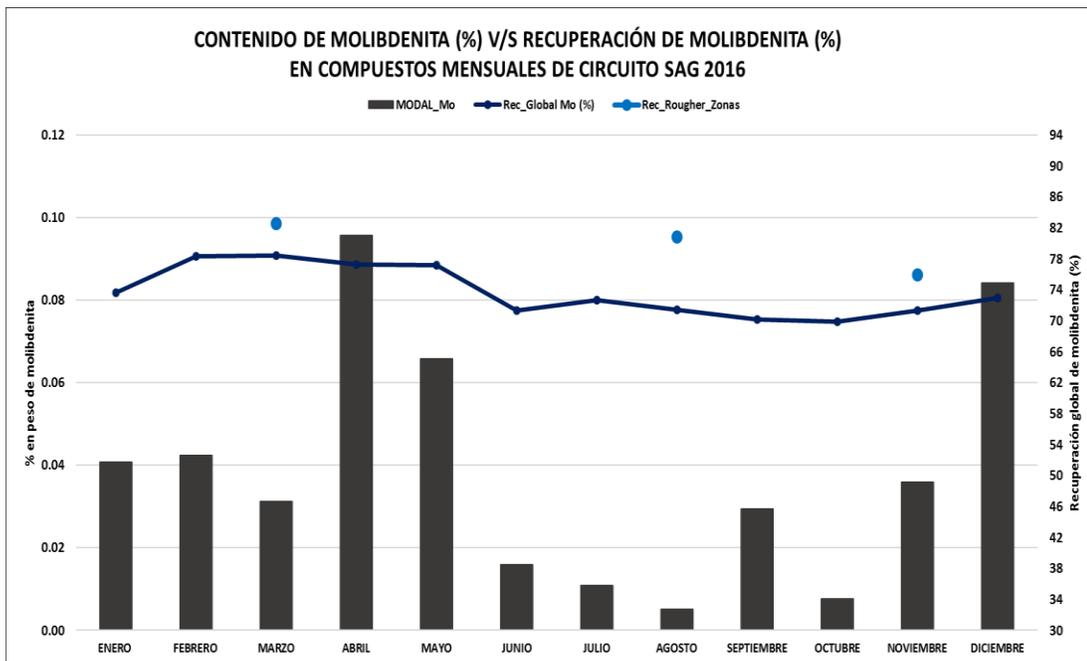


Gráfico 1.2: Recuperación y Ley media de Molibdenita Mensual del año 2016

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Caracterizar la ocurrencia y distribución de la Molibdenita en base al modelo de recuperación de Molibdeno desarrollado el 2017 en torno a las Unidades Geometalúrgicas de Recuperación Rougher de Cobre.

1.6.2 Objetivos específicos

- Encontrar factores geoquímicos, geometalúrgicos y mineralógicos que presentan una correlación con la recuperación rougher de Molibdeno.
- Determinar los factores geológicos que controlan el comportamiento del Molibdeno y a los parámetros geoquímicos y geometalúrgicos que se encuentran relacionados con la recuperación rougher de Molibdeno.
- Caracterizar la Molibdenita en el yacimiento El Teniente en base a su estilo de mineralización y las fases minerales en asociación, en torno a los eventos de alteración del yacimiento El Teniente y la litología de la roca hospedante.
- Determinar criterios base para la elaboración de Unidades Geometalúrgicas de Molibdeno.

2 MARCO GEOLÓGICO

El mega yacimiento de cobre-molibdeno El Teniente se encuentra ubicado en la Cordillera Principal de los Andes Centrales como se observa en la Figura 2.1 (Charrier *et al.*, 1996) y forma parte de la Franja Metalogénica Cuprífera del Mioceno Superior-Plioceno (Skewes *et al.*, 2002). A escala regional, las rocas que afloran en el distrito del yacimiento corresponden a potentes secuencias de rocas volcánicas estratificadas, intercaladas con secuencias de menor potencia sedimentarias marinas y continentales. Los depósitos son pertenecientes a unidades del mesozoico y cenozoico, abarcando edades que van desde el Triásico al Cuaternario en el Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960). Estas rocas fueron intruídas por cuerpos plutónicos, de composición ácida a intermedia, y cuerpos hipabisales, de edad Cenozoica, como batolitos, stocks, brechas hidrotermales y en menor cantidad por diques y apófisis. En la Figura 2.1 se presenta el mapa geológico regional realizado por Charrier *et al.* (1996).

Existen varios estudios previos los cuales dan cuenta de la geología regional donde se encuentra localizada la mina El Teniente, entre estos estudios destacan Klöhn (1960), Aguirre (1960), Davidson & Vicente (1973), Charrier (1973, 1981, 1983), Thiele (1980), Charrier *et al.* (1994, 1996), Rivera & Falcón (2000), entre otros.

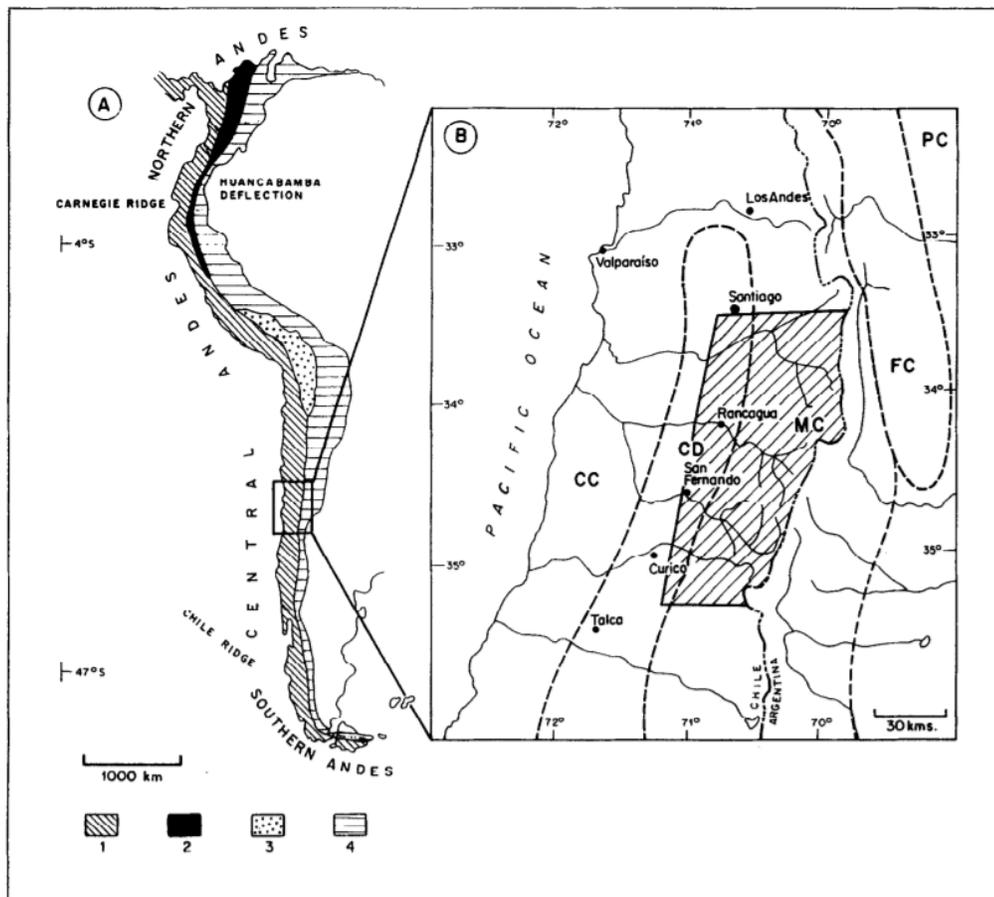


Figura 2.1: Principal subdivisión de la Cordillera de los Andes extraído de Aubouin (1973). CC: Cordillera de la Costa; CD: Depresión Central; MC: Cordillera Principal; FC: Cordillera Frontal. 1: Cordillera de la Costa; 2: Cordillera de los Andes Central; 3: Altiplano/Puna/Plateau; 4: Cordillera de los Andes Oriental.

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

2.1.1 Rocas Estratificadas

Las secuencias estratificadas (volcánicas y sedimentarias) que afloran a escala regional en la zona donde se encuentra ubicado el yacimiento El Teniente fueron definidas originalmente por Klöhn (1960), Charrier (1973 y 1981), González (2000) entre otros. Corresponden a formaciones de roca cuya edad de deposición va desde el Bajociano hasta el Mioceno, además de depósitos semi consolidados y no consolidados del Pleistoceno.

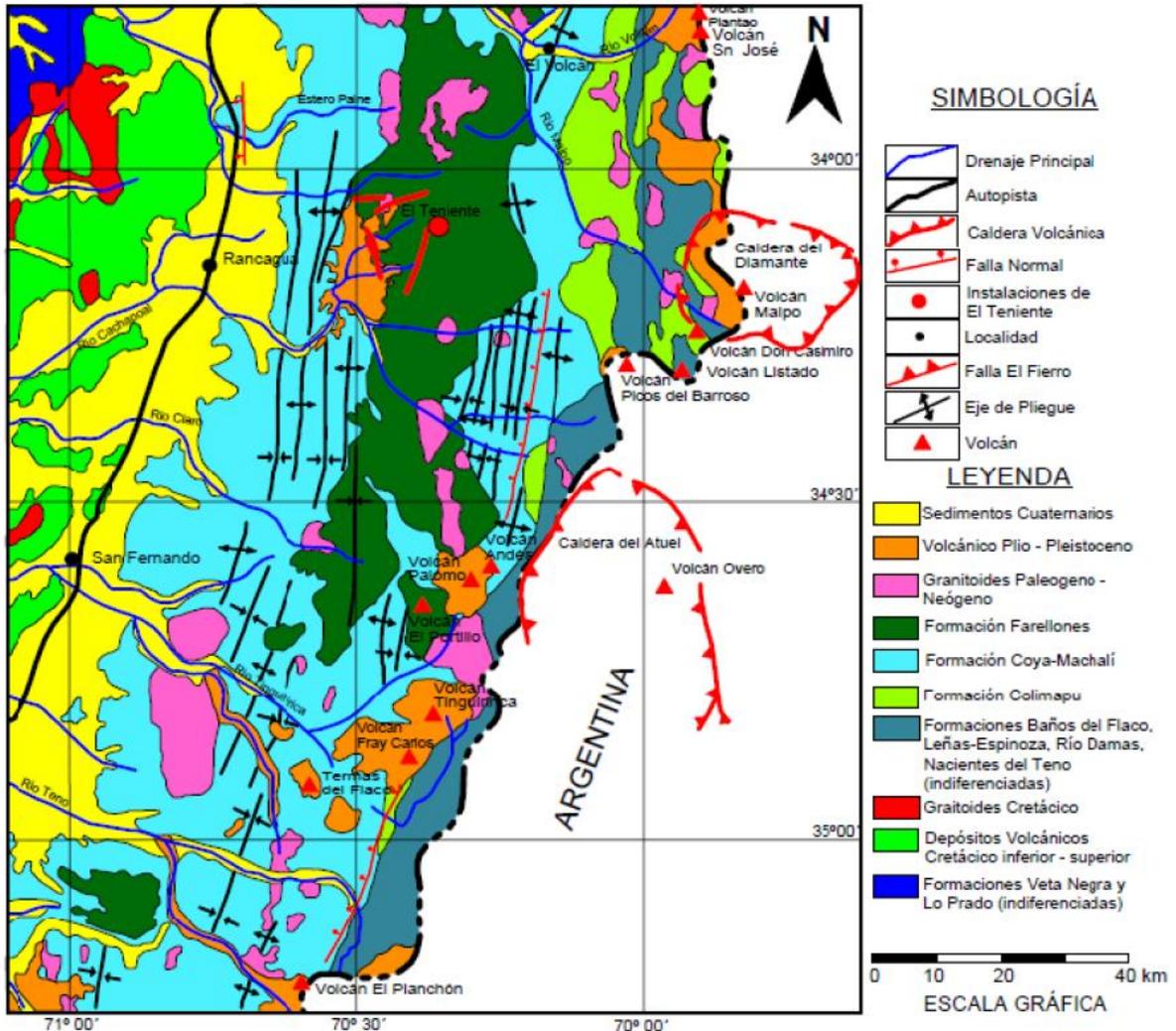


Figura 2.2: Mapa Geológico Regional (Modificado de Charrier et al., 1996). Cordillera de la Costa: (1) Formaciones Veta Negra y Lo Prado. Depósitos de cuenca intra-arco volcánico (dominio volcánico) y marino sedimentarios (Jurásico Superior a Cretácico Inferior) (2) Depósitos volcánicos continentales (Cretácico inferior a superior) (3) Granitoides (Intrusivos, Cretácico). Cordillera Principal: (4) Formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas, Nacientes del Teno (indiferenciadas, marino y continental, Jurásico). (5) Formación Colimapu (Jurásico Superior a Cretácico inferior, marino). (6) Formación Coya-Machalí (Paleógeno). (7) Formación Farellones (Neógeno). (8) Granitoides (Paleógeno-Neógeno). (9) Depósitos Volcánicos (Plioceno-Pleistoceno). (10) Depósitos Cuaternarios.

2.1.1.1 Formación Nacientes de Teno (Bajociano-Kimmeridgiano Inferior):

Corresponden a rocas sedimentarias de textura clástica ubicadas en la zona este de la región. Esta formación se encuentra definida por Klöhn (1960). Se distribuye de manera discontinua en la porción oriental de la región (Charrier, 1973) y subyace con un contacto concordante en su techo a la Formación Río Damas (Ver Figura 2.2). Según el estudio de Davidson y Vicente en 1973 se definen 2 miembros los cuales constituyen a esta formación: el miembro superior Santa Elena Evaporítico (yeso y anhidrita), con una potencia de 500 a 600 m que disminuye paulatinamente hacia el este; y el Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo, que corresponde al Miembro Rinconada y Estratos Inferiores del Valle Villagra y Quebrada La Zorra definido por Klöhn (1960), que presenta una potencia de 100 a 200 m, su edad es asignada en base a su contenido fosilífero (Charrier, 1973).

2.1.1.2 Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):

Esta formación fue reconocida por primera vez por Klöhn (1960), está constituida por rocas sedimentarias clásticas de origen continental con potentes intercalaciones depósitos de origen volcánico (efusivos y piroclásticos) y en menor medida estratos de rocas sedimentarias de origen químico. Esta secuencia representa el término del ciclo regresivo originado por el sollevamiento tectónico del borde occidental sudamericano. La génesis de estos depósitos corresponde a un ambiente mayoritariamente terrestre, subaéreo y lagunar, la cual ocurrió entre el Kimmeridgiano Superior y Titoniano Inferior y se disponen con forma de una franja N-S en el margen oriental de la región (ver Figura 2.2). Su mayor desarrollo se encuentra en la zona del Río Damas y su espesor promedio es de 3.000 m, Sobreyace de manera concordante a la Formación Nacientes del Teno y subyace concordante y gradualmente a la Formación Baños del Flaco. Se desconoce la relación estratigráfica existente con la Formación Leñas-Espinoza (Charrier, 1981).

2.1.1.3 Formación Leñas-Espinoza (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):

Determinada por Klöhn (1960) y posteriormente redefinida por Charrier (1981). Corresponde a una secuencia sedimentaria la que puede ser separada en dos miembros, un miembro inferior de tipo detrítico y uno superior de tipo calcáreo fosilífero, la potencia promedio de ambos miembros en conjunto es de 1200 m. Su contacto inferior es desconocido, pero hacía el techo subyace a la Formación Coya-Machalí de manera discordante y a la Formación Baños de Flaco con un contacto gradual, también presenta un contacto discordante por medio de una falla con la Formación Río Damas.

2.1.1.4 Formación Baños del Flaco (Titoniano-Neocomiano):

Definida por Klöhn (1960), corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas de carácter marino (principalmente margas y calizas) con intercalaciones de rocas de origen detrítico y volcánico (conglomerados, brechas, areniscas, tobas y lavas), esta secuencia presenta una potencia variable entre los 1.100 y 2.300 m aproximadamente la cual va disminuyendo su espesor hacia el este. En un estudio posterior Charrier (1981) asigna a esta formación los estratos del miembro superior de la Formación Leñas-Espinoza. Se puede reconocer en el sector oriente de la región que la formación presenta una distribución alargada con orientación N-S (ver Figura 2.2).

La Formación Baños del Flaco sobreyace en un contacto concordante y gradual a las Formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza y subyace concordantemente la Formación Colimapu. Se aprecia en algunos sectores que su límite superior se encuentra erosionado y es sobreyacido de manera discordante por la Formación Coya-Machalí. A una escala regional se vislumbra que esta formación se encuentra intensamente deformada.

2.1.1.5 Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):

Ésta fue definida en un principio por Klöhn (1960). Corresponde a una secuencia de estratos de roca volcano-sedimentarias dentro de los cuales se encuentran areniscas tobíferas rojizas, lutitas tobíferas y tufitas rojas, estos estratos presentan intercalaciones con conglomerados, brechas, lavas andesíticas, calizas y capas de yeso, lo que señala que el ambiente de deposición fue principalmente continental. La formación presenta dos miembros, un miembro inferior de componentes sedimentarios (areniscas finas y calizas) y un miembro superior de rocas volcánicas (tobas, lapilli e ignimbritas), estos miembros tienen un espesor medio de 1500 y 1600 m respectivamente (Charrier, 1981). La potencia mínima de la formación es de 3000 m.

El origen de esta formación estaría relacionado con el segundo ciclo continental asociado al alzamiento que ocurrió durante el Barremiano-Albiano (Charrier, 1973). Su contacto inferior con la Formación Baños del Flaco es concordante, mientras que su contacto superior presenta una discordancia erosiva con la Formación Coya-Machalí.

2.1.1.6 Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior):

Esta formación fue delimitada por Klöhn en el año 1960 y corresponde a una serie de intercalaciones de rocas volcánicas entre las cuales se encuentran coladas, brechas volcánicas, tobas y riolitas, con rocas sedimentarias que van desde brechas y conglomerados hasta areniscas y limonitas. Se destaca el hecho que toda la secuencia de rocas es de un ambiente continental de arco toleítico (Kay et. al. 1999). Mediante dataciones de K-Ar se determinaron edades de los estratos entre los 20,5-23,1 Ma (Charrier & Munizaga, 1979). La Formación Farellones (Charrier et al., 1994) se divide en dos franjas paralelas a la Formación Coya-Machalí. La franja occidental contiene rocas de tipo volcánicas con texturas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas y posee una potencia estimada de 1900m, mientras que la franja oriental contiene rocas piroclásticas con intercalaciones de sedimentitas y presenta un espesor de unos 1300 m.

Su contacto inferior es discordante con la Formación Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, ésta se debería a la orogénesis a la que se vio expuesta. En cambio presenta una discordancia angular en su techo con la Formación Farellones. Charrier et.al. (2002) plantean que la formación se relaciona a una extensión cortical.

2.1.1.7 Formación Farellones (Mioceno Superior):

Definida por Klöhn (1960), presenta rocas de origen volcánico. Se delimita como una secuencia que aflora en una franja elongada continua de orientación N-S (ver Figura 2.2). En su parte inferior contiene estratos que corresponden a grandes depósitos de flujos piroclásticos e intercalaciones de sedimentos lacustres, mientras que en la parte superior se observa la presencia de lavas intermedias a básicas y domos riolíticos (Thiele *et al.*, 1991). Las rocas volcánicas que la conforman agrupan lavas andesíticas-riolíticas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas (Charrier & Munizaga, 1979); éstas se habrían depositado en un ambiente continental con actividad volcánica cuyos depósitos presentan una composición predominantemente intermedia. El centro eruptivo se ubicó probablemente a lo largo de la zona actual de afloramientos de esta formación.

Thiele postuló que estas secuencias se habrían acumulado en un graben volcánico-tectónico, formado a partir de una serie de colapsos de calderas, basándose en la presencia de fallas normales que delimitan esta formación, el gran volumen de magma ácido extruido y un gradiente paleotermal alto (de tipo campo geotérmico). Se realizaron dataciones radiométricas K/Ar las cuales indican edades de 4,13-14,3 Ma (Charrier, 1983), asignándola así al Mioceno Medio-Superior. La Formación se dispone con pliegues suaves, con inclinaciones de no mayores a 25° hasta subhorizontales (Charrier, 1983), y sobreyace en discordancia angular sobre estratos de la Formación Coya-Machalí (Klöhn 1960; Charrier, 1973, Thiele *et al.*, 1991). Esta formación resulta ser la roca madre donde se aloja el yacimiento El Teniente.

2.1.1.8 Formación Colón-Coya (Plioceno-Pleistoceno)

Identificada primerizamente por Enrione (1972) y posteriormente definida como una formación por Gómez (2001). Esta formación se caracteriza por componerse por un conjunto de lahares de granulometría heterogénea, insertos en una matriz arcillo-cinerítica, con intercalaciones locales de piroclastos, ceniza, lavas andesíticas de poca potencia y gravas fluviales. La potencia de este depósito varía entre algunos centímetros y 150 m. En el área, sus afloramientos se disponen discordantemente sobre las formaciones Farellones y Coya-Machalí, llegando a abarcar un área de 160 m² y rellenando la topografía del valle en tiempos anteriores. El techo de la Formación Colón Coya corresponde a la actual superficie de erosión. Dataciones radiométricas de K-Ar fueron obtenidas por Charrier & Munizaga (1979), éstas coinciden con los resultados que obtuvo Cuadra (1986), los cuales sitúan esta formación en el Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma). La formación se encuentra ubicada hacia el S-W del yacimiento El Teniente (Ver Figura 2.2, Figura 2.1).

2.1.1.9 Depósitos no consolidados (Pleistoceno):

Secuencias de sedimentos cuyo periodo de deposición es asignado al Cuaternario. Se les asocia principalmente a las redes de drenajes del área, los cuales corresponden a depósitos fluviales, lacustres y glaciofluviales y en menor escala a eventos aluviales. Estos depósitos se encuentran rellenando los principales sistemas de drenaje, tales como los valles de los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco (Ver Figura 2.2).

2.1.2 Rocas Intrusivas

Cuerpos magmáticos emplazados en el sector de la Cordillera de los Andes, en los alrededores de donde se encuentra el yacimiento El Teniente, presentan una variada composición, textura, edad y extensión. Se reconocen por lo bajo cinco franjas de cuerpos agrupados en complejos ígneos intrusivos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), cuyas edades varían entre los 34,3 y 5,59 Ma (Falcón & Rivera, 1998). Las unidades intrusivas comprenden cuerpos plutónicos e hipabisales, los que corresponden principalmente a granodioritas, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos. Estas unidades de roca intrusiva se emplazan cortando las rocas de las Formaciones Coya-Machalí y Farellones (Skewes, 2002).

Se reconocen también en la región cuerpos intrusivos de dimensiones relativamente menores y aislados de las unidades intrusivas principales, éstos corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones, los que constan de rocas de textura fanocristalina, subordinadamente, afanítica y brechas, entre las que se han reconocido granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas. (Charrier, 1981).

En base a las relaciones de contacto con las rocas encajantes y la alineación observada en estos cuerpos, se les asigna una edad post-Formación Farellones, es decir, posterior al Mioceno (Godoy, 1993). Kurtz *et al.* (1997) agruparon estos cuerpos en 3 unidades de acuerdo a sus edades determinadas mediante datación Ar/Ar:

- Plutones antiguos, cuyas edades fluctúan entre $21,6 \pm 4,9$ y $16,2 \pm 1,2$ Ma.
- Complejo Plutónico Teniente, subdividido en un grupo de 12 Ma ($12,4 \pm 2,5$ y $11,3 \pm 0,3$ Ma) y un segundo grupo de 8 Ma ($8,8 \pm 0,1$ y $7,7 \pm 0,1$ Ma)
- Complejo Plutónico Joven, con edades que oscilan entre los $6,6 \pm 0,1$ y los $5,5 \pm 0,2$ Ma.

2.1.3 Estructuras

Los rasgos geológicos y geomorfológicos apreciados en Chile Central, entre los 33°S y 39°S, se encuentran en gran parte controlados por estructuras regionales NW-SE a NNW-SSE, las cuales se formaron durante eventos tectono-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy, 1993). Estas estructuras delimitan los segmentos tectónicos dispuestos de manera oblicua a la cadena andina actual, además estas estructuras habrían sufrido numerosas reactivaciones durante el Mesozoico-Cenozoico (Rivera & Cembrano, 2000). Los movimientos principalmente laterales de estos eventos tectono-magmáticos explicarían la distribución en franjas observada de los centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región (Falcón & Rivera, 1998).

En el área alrededor del yacimiento El Teniente, los patrones estructurales habrían sido el resultado de movimientos laterales a lo largo de una zona de cizalla sinistral con rumbo N50°W, lo que generó fracturas sintéticas sinestrales (tipo R), de orientación N60°W y antitéticas dextrales (tipo R"), de orientación N50°E (Falcón & Rivera, 1998) según el modelo estructural de Riedel indicado en la Figura 2.3.

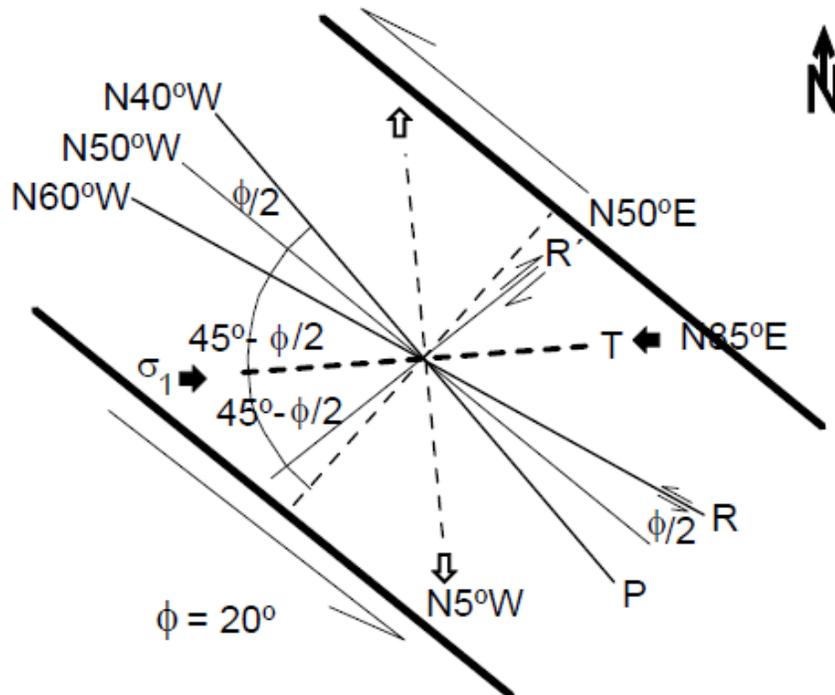


Figura 2.3: Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrancia sinistral de rumbo N50°W que coincide con la zona de falla Río Blanco-Codegua (tomado de Rivera y Falcón, 1998).

Los rasgos estructurales principales a nivel regional se pueden clasificar dentro de 3 grupos:

i. Pliegues: En los trabajos de Klöhn (1960) y Charrier *et al.* (1994) se reconocen pliegues anticlinales y sinclinales. Éstos presentan un suave buzamiento hacia el sur, cuyos ejes axiales de la charnela predominantemente norte-sur muestran inflexiones en su rumbo desde N30° W a N30° E. La continuidad longitudinal de los pliegues solamente se presenta entre los segmentos acotados por sistema de fallas N30° W (Rivera & Falcón, 2000).

ii. Fallas: Los sistemas de falla consisten en siete zonas de falla con orientación principal N 30° W, los que se reconocen tanto en la Cordillera de la Costa como en la Cordillera de los Andes. En el sector donde se encuentra el yacimiento El Teniente, destacan las zonas de falla de Piuquencillo al norte, El Azufre al centro y Juanita al sur (Rivera & Cembrano, 2000), los que truncan los ejes axiales de los pliegues de la Formación Farellones. Rivera y Falcón (2000) describen la cuenca de El Teniente como una depresión volcano tectónica, con su límite al norte dado por la falla Piuquencillo y al sur por el lineamiento Tinguiririca – Navidad. La cuenca entonces presenta dimensiones de 100 km de ancho, 150 km largo y una orientación NW-SE. A su vez se identifica la Falla Codegua, una estructura local aparente con orientación NW la cual se asocia con los centros volcánicos remanentes y las intrusiones andesíticas de la cuenca (Rivera y Falcón, 1998), ésta se habría formado durante el Mioceno debido a la reactivación de estructuras Mesozoicas de orientación NW-NNW. El yacimiento El Teniente estaría situado muy cercano a la intersección de la Falla Codegua con la Falla Agua Amarga que forma parte de la Zona de Falla El Teniente (Cannel *et al.* 2005).

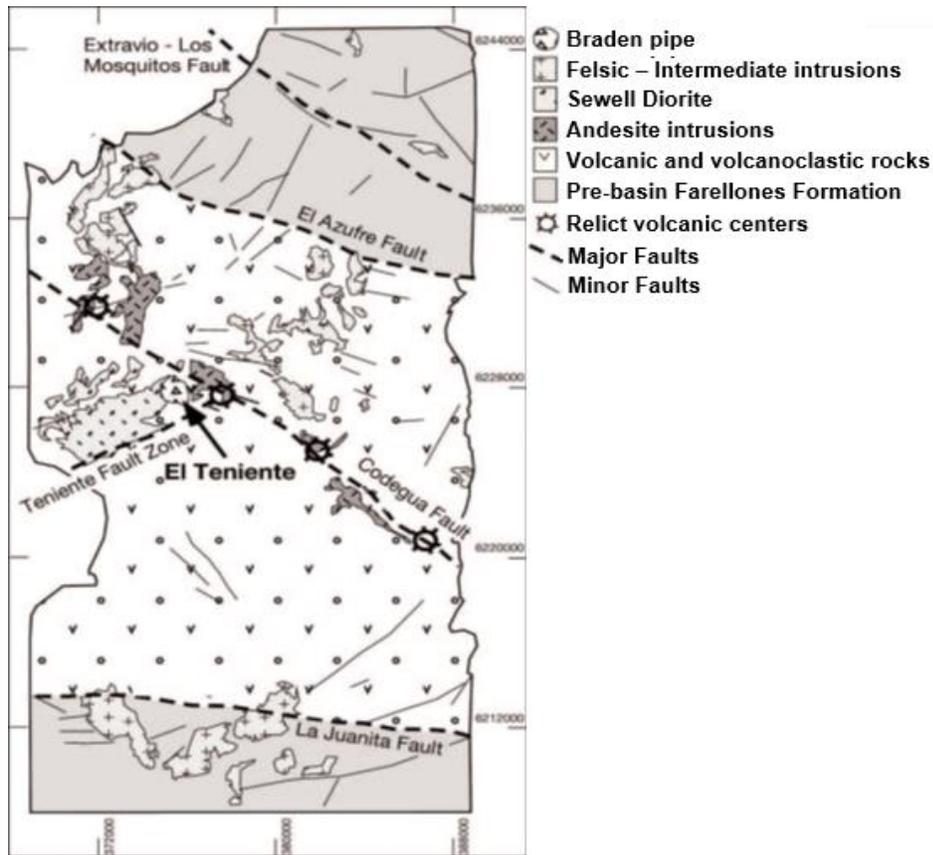


Figura 2.4: Geología del distrito El Teniente. Se observa el lineamiento NW de los relictos de los centros eruptivos a lo largo de la Falla Codegua (Rivera and Falcón (1998), reporte inédito para CODELCO).

iii. Discordancias: Se reconocen tres fases compresivas en la región, las que se manifiestan a través de tres discordancias orogénicas de plegamiento y de erosión (Klöhn, 1960).

- a) Fase parte inferior del Cretácico Superior, la cual pondría en discordancia los estratos de la Formación Farellones con las secuencias volcánicas terciarias y cuaternarias.
- b) Fase responsable de la deposición de la Formación Coya-Machalí en discordancia en su base con el techo la Formación Colimapu. La edad de esta fase no es clara, algunos autores la asignan al Oligoceno Inferior y otros al Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 1996).
- c) Fase del Mioceno-Plioceno, ésta genera un suave plegamiento de la Formación Farellones, lo que provocó que la Formación Colon-Coya se depositara en una discordancia angular sobre la Formación Farellones.

En adición a los rasgos estructurales principales, también pueden mencionarse las características regionales descritas por Charrier (1981), éste identifica la presencia de fallas inversas en la franja este de la Formación Coya-Machalí, estas fallas se verían favorecidas por la presencia de intercalaciones de roca incompetente, por la presencia de fallas normales con manteos subverticales asociadas a la tectónica de bloques Plioceno-Cuaternaria resultante del alzamiento andino, y una falla transcurrente sinistral que se presenta a lo largo del Río Cachapoal, la cual desplaza a los ejes de pliegues de la Formación Coya-Machalí.

2.1.4 Evolución Geotectónica

La génesis a escala regional del sector donde se encuentra el yacimiento de El Teniente se encuentra relacionada a la evolución tectónica del margen continental occidental sudamericano. Durante el Eoceno medio al Oligoceno tardío, previo a la deposición de la Formación Farellones, entre los 33°S a los 36°S a la altura de la Cordillera de los Andes se presentó un régimen extensional el cual habría formado la Cuenca de Abanico, posterior al régimen extensional la cuenca habría sufrido un régimen de inversión tectónica el cual comenzó durante el Mioceno (Charrier et. al. 2009). Durante el Mioceno temprano a medio se produce por tanto, la inversión de la cuenca, lo que provoca la deposición de la Formación Farellones. Otros fenómenos que ocurrieron en este régimen compresivo fueron el engrosamiento cortical y a la progresiva disminución del ángulo de subducción de la Placa de Nazca, lo que produce solevantamiento. El rápido ascenso de los sistemas intrusivos emplazados en profundidad, genera la exsolución de fluidos magmáticos enriquecidos en cobre, los que originan la mineralización de la franja metalogénica cuprífera del Mioceno inferior-Plioceno (Skewes y Stern 1995, Skewes et. al. 2002). La disminución de la edad de los depósitos hacia el sur se explica debido al vínculo genético de la actividad magmática con la migración al sur del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern y Skewes, 1997). En la Figura 2.5 se muestra la evolución magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34°S entre el Mioceno al Presente, y la ubicación de los segmentos Zona Volcánica Central (ZVC), zona de flat-slab y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS).

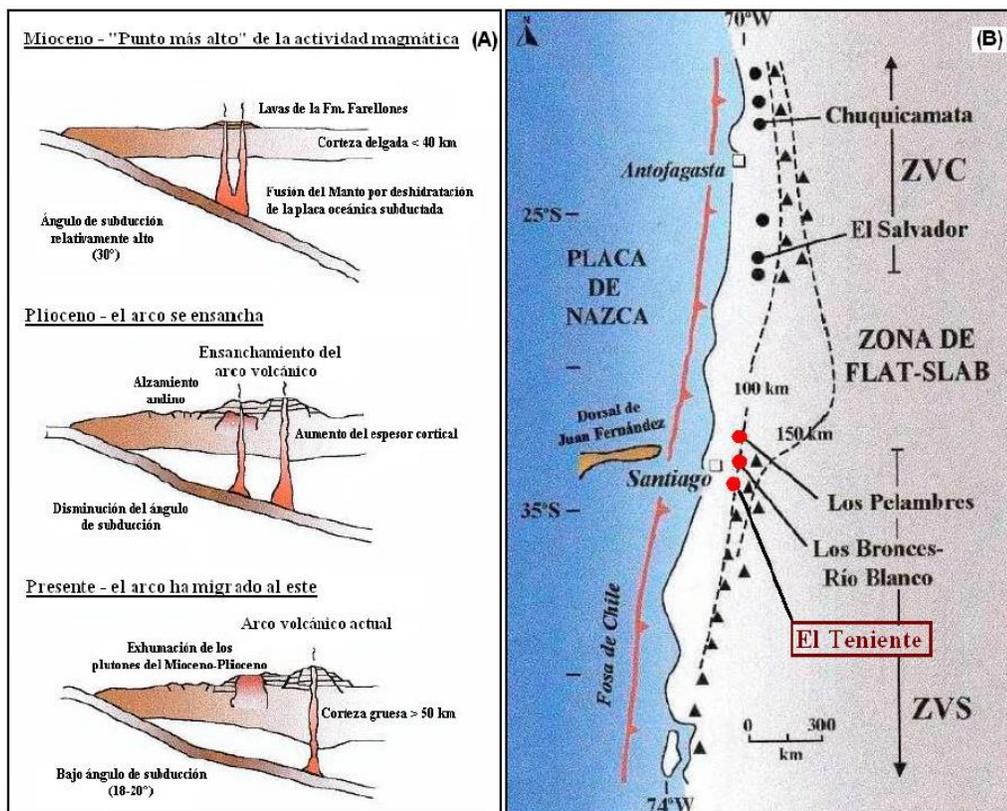


Figura 2.5: Marco Geotectónico Stern y Skewes (1995, 1997): (A) Perfiles transversales de la evolución magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34°S entre el Mioceno al presente. (B) Ubicación del segmento Zona volcánica Central (ZVC), zona de flat-slab y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Triángulos indican el frente volcánico actualmente activo; los círculos negros representan los pórfidos más antiguos de la Zona Volcánica Central.

Producto de la subducción activa en la dorsal de Juan Fernández durante el Mioceno Medio, se desarrolla una disminución del ángulo de subducción bajo el segmento cortical al norte de los 33°S (Pilger, 1981), esto provoca una segmentación del arco andino en Chile Central. Este evento trajo como consecuencias el ensanchamiento del arco magmático, la migración del frente volcánico hacia el este durante el Mioceno Tardío y finalmente, el término de la actividad magmática durante el Plioceno (Kay y Kurtz, 1995). Es por esto que el flat-slab se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica moderna (Kurtz y otros, 1997). Este proceso además se asocia a un alzamiento, deformación y aumento del espesor de la corteza bajo la cadena volcánica al norte de los 33°S (Kay y otros, 1991). Por otro lado, al sur de los 33°S contemporáneamente al desarrollo del flat slab, el ángulo de subducción también disminuye, pero en menor magnitud, esto provoca la migración del arco volcánico hacia el este donde se encuentra ubicado actualmente en los Andes a los 33°-36°S (Charrier et al 2009). También se produce deformación y engrosamiento de la corteza, y el alzamiento de la cadena andina (Skewes y Stern, 1995).

En la Figura 2.6 se observa la correlación entre los principales eventos tectónicos y los depósitos cenozoicos de la Cordillera Principal de los Andes Centrales. Los eventos marcados con la letra "E" corresponden a los detectados por Giambiagi *et al.* (2003) para el Neógeno en la vertiente Argentina. Se observa que: La inversión tectónica (W1) se refleja en los depósitos de la cuenca de antepaís en Argentina con un ligero retardo (E1), la migración hacia el este de la deformación (W2) tuvo lugar poco antes del inicio de la faja plegada y corrida (E2), la expansión o disrupción tectónica (W3) se produjo a continuación del alzamiento de la Cordillera Frontal (E3) y fue contemporánea con el fallamiento fuera de secuencia (E4). En la actualidad hay actividad tectónica en ambas vertientes del orógeno.

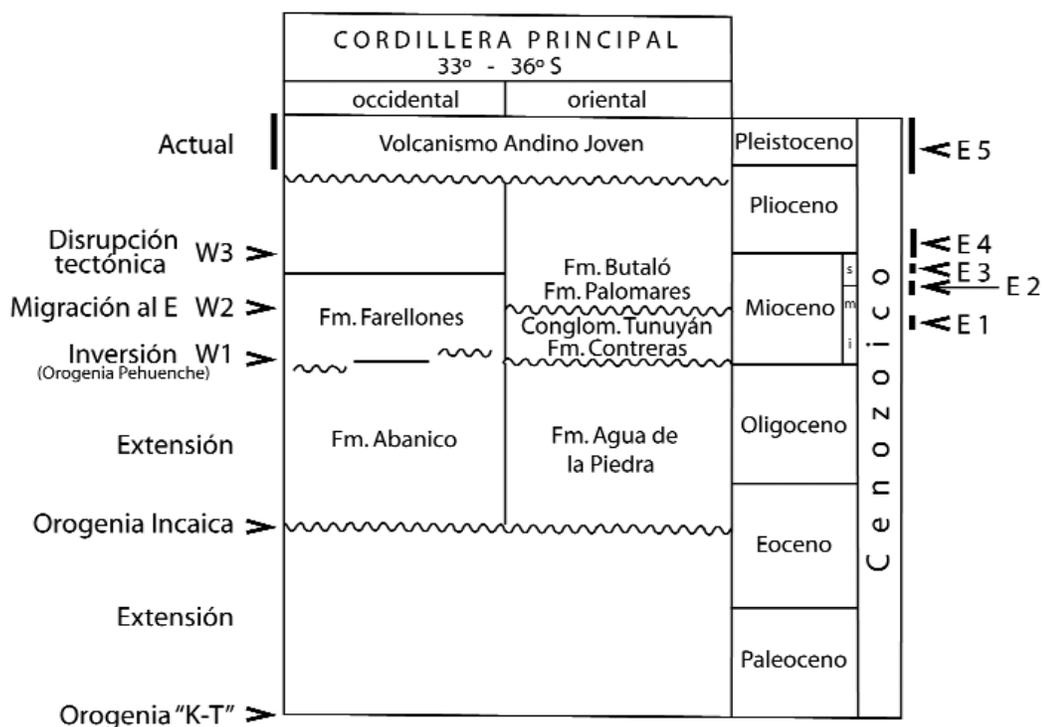


Figura 2.6: Correlación entre los eventos tectónicos y depósitos cenozoicos en ambas vertientes de la Cordillera Principal en Chile y Argentina centrales. (Charrier et. al. 2009).

2.2 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

El yacimiento de mineralización hipógena de cobre El Teniente pertenece al grupo de depósitos de cobre formados a fines del Mioceno conocida como la franja metalogénica de cobre del Mioceno, la cual abarca a los depósitos tipo pórfido cuprífero más grandes del mundo. El yacimiento se encuentra emplazado en rocas volcánicas y subvolcánicas de composición básica a intermedia correspondientes a la Formación Farellones de edad miocena media a superior, esta formación se encuentra intruída por diversos pórfidos y brechas hidrotermales las cuales presentan la mineralización más importante del yacimiento. (Camus, 1975; Cuadra, 1986). Ver Figura 2.2.

Las rocas intrusivas que se encuentran en el sector se emplazan principalmente en el miembro inferior de la Formación Farellones, éstos corresponden a cuerpos irregulares de composición ácida, primordialmente dioritas, que afloran en los alrededores de la localidad de Sewell. En la parte central del yacimiento se encuentra la megaestructura denominada Brecha Braden, ésta tiene forma de cono invertido, escasa mineralización (Cuadra, 1986) y es el lugar donde se ubican las instalaciones principales de la mina. También se reconoce un dique de composición dacítica, el cual únicamente aflora en las laderas de la Quebrada Teniente. También se observan filones latíticos de composición principal los que se encuentran dispuestos concéntricamente al oeste de la Chimenea Braden, cuerpos intrusivos y de brechas menores y un dique de lampróvido que aflora al sur de la megaestructura. En la Figura 2.7 se muestra la geología simplificada del yacimiento.

En general el yacimiento El Teniente es el resultado de sucesivos eventos de deformación, de la intrusión de cuerpos félsicos y de la ocurrencia de distintos eventos de alteración y mineralización superpuestos ocurridos en un lapso de al menos 5,3 Ma desde el Mioceno temprano, donde los recursos se generaron en un periodo de 1,2 Ma (Maksaev *et al.*, 2002; Maksaev, 2004; Canell *et al.*, 2004). Otra hipótesis es la propuesta por Skewes *et al.* (2002), la que sugiere que El Teniente se trataría de un depósito de megabrecha generado por la exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento. La formación de las vetas tardías, en asociación con el emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusiones de pórfidos félsicos, habrían generado una alteración fílica que en algunos casos deposita sulfuros primarios de Cu y en otros casos elimina o redistribuye la mineralización preexistente (Skewes *et al.*, 2002).

La mineralización de cobre y molibdeno ocurre mayoritariamente en vetillas las cuales se presentan como un enrejado del tipo stockwork (70%), formando un cuerpo mineralizado de forma elíptica en planta, de dimensiones 1,6 km x 2 km aproximadamente. El 30% de la mineralización restante se encuentra en el cemento de diversa brechas magmáticas-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina. En menor proporción también pueden encontrarse minerales de mena de cobre y molibdeno diseminados en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos. Los minerales de mena más importantes en la zona, corresponden a calcopirita y bornita los cuales se encuentran asociados con pirita. En la zona de enriquecimiento secundario, el mineral característico es la calcosina y en forma subordinada covelina, cobre nativo y cuprita (Cuadra, 1986). También es posible encontrar mineralización de molibdenita principalmente en vetillas en los pórfidos félsicos y brechas hidrotermales. Ver Figura 2.7.

Los sistemas estructurales principales de la mina tienen orientación predominante NS, NE y NNW, ésta última presenta una continuidad distrital. Estos sistemas están evidenciados por la traza de los contactos entre unidades de rocas diferentes, por fallas y zonas de cizalle, y por la distribución y geometría de las vetas y vetillas.

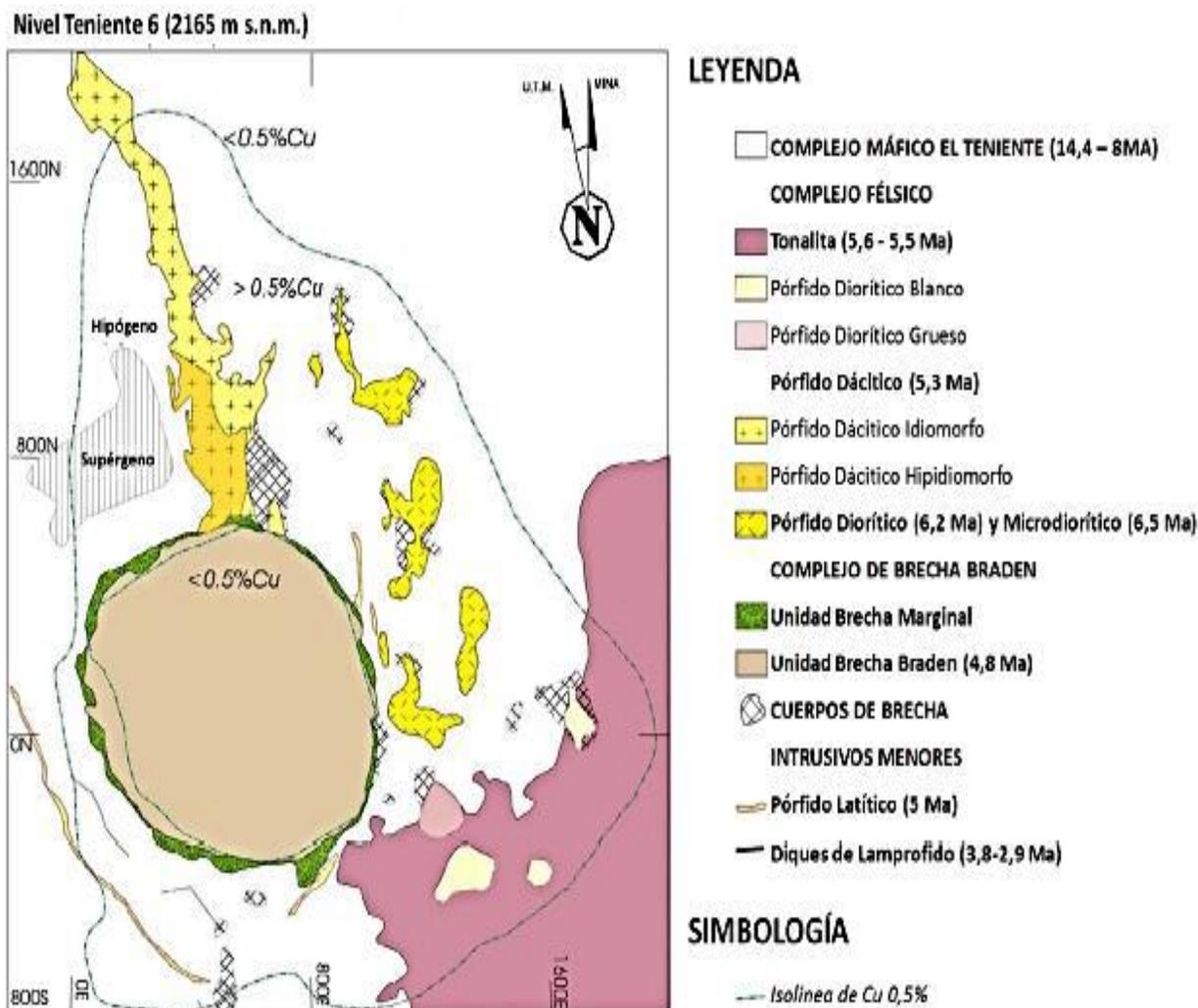


Figura 2.7: Geología simplificada mostrada a través del mapa litológico del Nivel El Teniente 6 (cota 2165 msnm.) del yacimiento El Teniente (modificada de la base de datos de la mina).

Unidades Litológicas

En el yacimiento El Teniente se reconocen diversas litologías las que pueden ser clasificadas en Unidades litológicas según su génesis y composición. En la Figura 2.8 se pueden observar la distribución de las unidades litológicas principales de El Teniente.

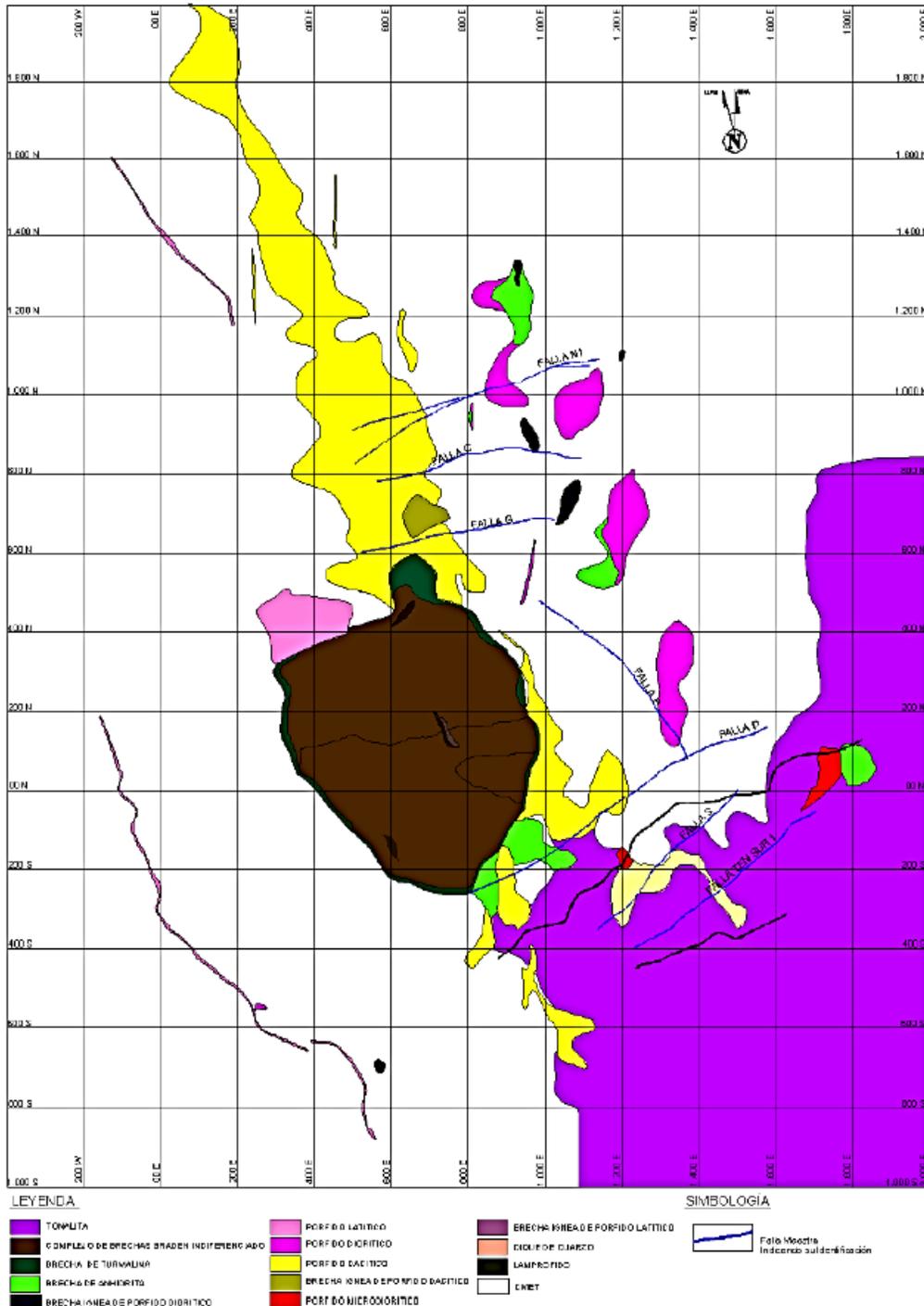


Figura 2.8: Mapa geológico con las principales Unidades Litológicas del proyecto Nuevo Nivel Mina, cota 1.880 m (confeccionado por la Superintendencia de Geología, mina El Teniente).

2.2.1.1 Complejo Máfico El Teniente (CMET)

El CMET corresponde a un conjunto de rocas melanocráticas del Mioceno Superior las que forman parte de un lacolito de gran escala, el cual intruye a la Formación Farellones (Munizaga *et al.*, 2002; Charrier *et al.*, 2002; Skewes, 2000). Estas rocas constituyen la roca caja en la cual se hospeda más del 80% de la mineralización de cobre presente en el depósito (Camus, 1975; Arévalo & Floody, 1995 y Arévalo *et al.*, 1998) (ver Figura 2.8).

Esta unidad es un complejo subvolcánico de composición básica a intermedia color pardo oscuro a negro, que tiene una extensión vertical de más de 2 km de alto, 2,4 km de ancho y 1,2 km de largo (Burgos, 2002). La textura de las rocas del CMET varía de afanítica a porfídica. La mineralogía original de éstas ha sido obliterada debido a la fuerte alteración y brechización que estas rocas presentan en conjunto con la mineralización que ha ocurrido durante estos procesos, es por esto que las características de las rocas primarias quedan enmascaradas por el intenso “*stockwork*” y por la alteración hidrotermal la que es principalmente potásica, siendo la biotita secundaria el mineral predominante en esta fase, que además entrega a las rocas el color oscuro característico de esta unidad (Villalobos, 1975). Cannel *et al.* (2005) describen al CMET como un complejo de sills apilados de composición principal Anortita y Hornblenda, con una textura que varía de fanerítica a afanítica, que instruyeron flujos de lava andesítica de la Formación Farellones.

Estudios indicaron que esta unidad, cuyas rocas eran registradas erróneamente como andesitas, correspondían a rocas máficas intrusivas, las cuales incluyen a gabros, diabasas, pórfidos basálticos y pórfidos basálticos andesíticos (Skewes, 1997; Skewes & Arévalo, 1997 y 2000; Skewes, 1999 y Skewes *et al.*, 2002). Estas rocas estarían conformando sólo una parte del Complejo Máfico El Teniente, el cual correspondería a un complejo intrusivo subvolcánico con rocas que varían de dioritas a gabros (Skewes 1997; Skewes, 2000 y Skewes & Arévalo, 2000). Burgos (2002) indica en su estudio que parte del complejo corresponde a una diabasa de textura porfídica que presenta variaciones en el tamaño de los fenocristales de plagioclasa. Las rocas con fenocristales de grano fino se encontrarían en los márgenes del intrusivo y mientras que las de grano grueso se ubican al centro de éste. Como minerales máficos primarios se encuentran relictos de piroxenos y se halla una fuerte alteración biotítica secundaria.

2.2.1.2 Complejo Félsico

Está compuesto por una variedad de filones, diques y pórfidos de composición ácida los cuales pueden agruparse en función del tipo de roca y su textura correspondiente.

Pórfidos Dioríticos

Anteriormente denominados como Diorita Central. Corresponden a una serie de diques y stocks, de gran extensión vertical y orientación con rumbo N30°W. Dentro del yacimiento se encuentran distribuidos en la parte norte y central del mismo. Se generan brechas hidrotermales con distintas variedades cementos y clastos de pórfidos dioríticos en el contacto de los pórfidos con el Complejo Máfico El Teniente.

Poseen fenocristales de plagioclasas, biotitas y en menor cantidad cuarzo, que conforman aproximadamente un 60% del total de la roca. Los pórfidos dioríticos se encuentran moderadamente alterados por una sucesión de alteraciones potásica, argílica y fílica (Guzmán, 1991). Según un estudio realizado por Makshev en el 2004, se determinó mediante dataciones de U/Pb en circones la edad de cristalización, la que sucedió entre $6,11 \pm 0,13$ Ma y los $6,28 \pm 0,16$ Ma.

Tonalita

Corresponde a un gran cuerpo intrusivo, localizado en la parte sureste del yacimiento, y se presenta como un pórfido de tipo stock de 200m de ancho ubicado al SE de la pipa Braden. Intruye al Complejo Máfico El Teniente.

El cuerpo muestra un color gris oscuro y posee variaciones texturales, en las zonas marginales tiene una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa primaria, biotita y relictos de anfíboles, mientras que hacia el centro del cuerpo la textura es fanerítica. El límite entre ambas texturas es transicional y se puede evidenciar por variaciones en el tamaño de los cristales y porcentaje de masa fundamental (Faunes, 1981). La Tonalita se encuentra afectada por una intensa alteración fílica, caracterizada por la asociación cuarzo-sericita-clorita (Cuadra, 1986). Su composición química es de carácter calcoalcalino, con un contenido de sílice que varía entre 63,6% y 64,2%.

Dataciones radiométricas mediante el método K/Ar le asignó al stock una edad de $7,1 \pm 1,0$ Ma (Cuadra, 1986), es decir, se le asignó una edad Mioceno Superior, mientras que por el método $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ fue datado en $5,47 \pm 0,2$ Ma a $5,63 \pm 0,12$ Ma, que corresponde al Plioceno Inferior (Makshev *et al.*, 2001).

Pórfido dacítico (ex Pórfido Teniente)

Antiguamente llamado Pórfido Teniente o Dacita Porfídica, fue reconocido originalmente por Ossandón (1974), posteriormente caracterizado por Cuadra (1986), quienes señalan que corresponde a un cuerpo intrusivo con disposición alargada orientado N-S a NNW con un manteo subvertical. El pórfido presenta una forma tabular irregular subvertical y está situado en el sector norte del yacimiento. Este pórfido intruye a las rocas máficas y se pueden observar contactos nítidos, pero de diseño irregular o bien transicional. El cuerpo se dispone con 1.500 m de largo y una potencia variable entre 50 m, hacia los niveles más superficiales, y 300 m hacia los niveles más profundos. El límite sur del cuerpo intrusivo se encuentra cortado por la Chimenea de Brechas Braden, en cuyo contacto se desarrolla una brechización con fragmentos del pórfido y matriz de turmalina.

El Pórfido Dacítico es de color gris claro a blanco y su mineralogía primaria se compone de fenocristales de oligoclasa, biotita y escaso cuarzo (Cuadra, 1986), siendo una roca rica en feldespato alcalino y pobre en sílice. Ossandón (1974) distinguió dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa, la cual ocurre cerca de la zona de contacto, y la porfídica hipidiomorfa que se da en la parte central del intrusivo.

Este intrusivo ha sido identificado como el responsable del principal evento mineralizador del yacimiento El Teniente (Ojeda *et al.*, 1980), aunque estudios recientes concluyen que el Pórfido Dacítico jugó un rol importante en la redistribución del cobre en torno a sus márgenes, más no en el origen principal de la mineralización (Skewes, 2000).

Edades U-Pb en circón indican que la cristalización del intrusivo ocurrió hace 5,3 Ma (Maksaev *et al.*, 2002 y Munizaga *et al.*, 2002). Las dataciones mediante K-Ar en biotitas indican una edad de alteración y mineralización entre los 4,6 a 4,7 Ma (Cuadra, 1986).

Pórfido Microdiorítico

Antiguamente conocido como “Pórfido A”, corresponde a un intrusivo de composición diorítica de grano fino, con abundante presencia de xenolitos de composición intermedia y textura porfídica, y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994), que se ubica en el sector central-este del yacimiento, presentando contactos por intrusión con la Tonalita y el Complejo Máfico El Teniente (Figura 2.8). Este cuerpo genera un volumen importante de brechas ígneas e hidrotermales en sus márgenes, los que muestran altas leyes de cobre. Edades U/Pb en circón, señalan que la cristalización de este cuerpo ocurrió hace $6,46 \pm 0,11$ Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

2.2.1.3 Cuerpos de Brechas

Arredondo (1994) reconoció en el sector central este del yacimiento, varios cuerpos de brechas de distinta composición. Las brechas se encuentran clasificadas de acuerdo al mineral dominante contenido en la matriz (Skewes, *et al.*, 2002), entre las cuales destacan las Brechas de anhidrita, Brechas de turmalina, Brechas de biotita y Brechas Ígneas. Los clastos son polimícticos de rocas intrusivas de composición félsica, máfica o de ambas, con matriz de biotita, turmalina, cuarzo, feldespato, clorita, anhidrita, yeso, apatito, calcopirita, bornita, pirita, rutilo y magnetita. La matriz se encuentra cortada por vetillas rellenas de anhidrita, cuarzo, biotita, feldespato y sulfuros.

Los Cuerpos de Brecha pueden clasificarse en 2 grandes grupos, las Brechas Ígneas y las Brechas Hidrotermales. Las Brechas Ígneas se formaron producto de la brechización generada por la el emplazamiento de los diferentes cuerpos intrusivos del yacimiento, destacan la Brecha ígnea de CMET, Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico, Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico y la Brecha Ígnea de Tonalita. Las brechas hidrotermales tuvieron su génesis a raíz de la circulación de fluidos hidrotermales durante eventos de subsidencia de la cámara magmática y resurgimiento del magma. Destacan la Brecha de Anhidrita, Brecha de Cuarzo, Brecha de Sericita, Brecha de Clorita, Brecha de Turmalina y Brecha de Sulfuros.

2.2.1.4 Complejo Brecha Braden

Corresponde a una pipa volcánica, cuya génesis está ligada a la expulsión de fluidos que fragmentaron la roca caja, la cual principalmente corresponde al Complejo Máfico El Teniente. Tiene forma de cono invertido y en planta se manifiesta de manera circular con un diámetro 1200 m y una profundidad de 3150 m, su flanco oeste es subvertical mientras que el resto del cuerpo presenta límites de contacto con un manto entre 60° y 70° (Floody, 2000). Se encuentra en la parte central del yacimiento, y por relaciones de contacto, se estima que su edad corresponde a 4,7 a 4,5 Ma (Cuadra, 1986). La parte central de este complejo está conformada por un conjunto de brechas que, en general, se componen de fragmentos subredondeados polimícticos en una matriz de polvo de roca, con cemento de sericita, turmalina, calcita y/o sulfuros (principalmente piritita). En su interior existe una diversidad de unidades definidas por variaciones en el tamaño, selección y abundancia relativa de los cristales, y por el contenido de turmalina en el cemento, estas unidades son clasificadas como Brecha Braden-Sericita, Brecha Braden-Sericita Fina, Brecha Braden-Sericita Bolones, Brecha Braden Clorita, Brecha Braden Turmalina, Brecha Braden Turmalina Bloques. Existen, además, otras unidades de brecha sus bordes (Skewes *et al.*, 2002).

Dentro del complejo de brechas se pueden definir 2 grandes unidades geológicas, la Unidad Brecha Braden y Unidad Brecha Marginal. La Unidad Brecha Marginal rodea a la Unidad Brecha Braden en casi toda su periferia con un contacto gradacional, que se reconoce por la variación en el porcentaje de turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). Esta unidad se emplazó previamente a la Unidad Brecha Braden, generando fracturas concéntricas producto de la presión de fluidos volátiles y magma resurgente, que superó a la presión litoestática del sistema resultando en una fragmentación explosiva, estas fracturas concéntricas facilitarían el posterior ascenso de la Unidad Brecha Braden (Cannel *et al.*, 2005).

Por su disposición en el yacimiento y su calidad geotécnica la mayoría de la infraestructura de la mina se encuentra situada en esta unidad.

2.2.1.5 Intrusivos Menores

Corresponden a unidades de ocurrencia restringida y de menor importancia, volumétricamente menos importantes y de carácter aparentemente estéril. Estos cuerpos intrusivos corresponden a los últimos eventos de actividad magmática reconocidos en el yacimiento.

2.2.1.6 Pórfido Latítico

Definido por Howell & Molloy (1960) como latita porfídica, corresponde a diques con una potencia que puede variar desde los 2 a los 15 m, éstos se distribuyen de manera concéntrica alrededor de la Brecha Braden (Figura 2.8). Se reconoce como cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. La roca posee una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa en una proporción mucho mayor que en el Pórfido Dacítico. Contiene además fenocristales de biotita, anfíboles alteradas, “ojos de cuarzo” en una masa fundamental de cuarzo y feldespato (Skewes *et al.*, 2002). Edades Pb-U en circón realizadas por indican 4,82±0,09 Ma.

2.2.1.7 Diques de Cuarzo y Anhidrita

Intrusivos formados por cuarzo y en menor proporción anhidrita y sulfuros diseminados. Son abundantes en el sector norte y oeste del yacimiento. Presentan una potencia que varía de los 10 cm a 3 m, con un manteo generalmente subvertical. En general, no desarrollan halo de alteración en la roca de caja y sus contactos son nítidos.

2.2.1.8 Dique de andesita

Intruye a la Diorita Sewell en el sector sur de ésta. La roca es de color gris negro y presenta textura porfídica. El cuerpo tiene una forma tabular de 0,52 a 1,0 m de espesor, con rumbo N60°E y un largo de 500 m.

2.2.1.9 Diques de Lamprófidio

Se encuentra localizado al sur de la Brecha Braden. Corresponden a cuerpos tabulares, de potencia variable de 1 a 2 m, de color gris a verdoso. Su textura es porfídica, con fenocristales de hornblenda en una masa fundamental de augita y labradorita. Cortan al CMET, a la Tonalita y a la Brecha Braden. Dataciones de K-Ar indican una edad de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986 y Godoy, 1993).

2.2.2 Geología estructural del yacimiento

El Teniente se localiza en una compleja zona de cizalle de características distritales y con un rumbo promedio aproximado de N65° E denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT). Ésta se caracteriza por presentar tres dominios estructurales particulares: un dominio N60°E, otro dominio N50°W y finalmente un dominio N20°E dispuesto en forma de echelón con respecto a los dos anteriores. Los dominios estructurales corresponden a zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, constituidos en su mayoría por fallas de rumbo con manteos subverticales. En la mina se manifiestan por una mayor frecuencia de fallas paralelas, con un espesor variable entre 20 a 400 m (Garrido (1995).

La ZFT tiene dimensiones de 14 km de largo y 3 km de ancho, sus límites están dados al norte por la quebrada Teniente y al sur por la falla Agua Amarga (ver Figura 2.9). Dentro de la zona de falla, el arreglo estructural es totalmente diferente al reconocido en el entorno, independiente de la litología del sector, definiendo un eje de acortamiento de dirección N48°±11W (Garrido, 1995). Estos sistemas estructurales habrían estado activos antes, durante y después de la formación del yacimiento y serían controlados por el emplazamiento de la Pipa Braden (Garrido, 1992). La ZFT controla el emplazamiento del Complejo Tonalítico Sewell (8,9-7,0 Ma; Kay & Kurts, 1995) y las zonas de alteración del yacimiento. Garrido (1995) nota que el esfuerzo principal regional es de tendencia E-W, siendo rotado a la dirección NW dentro de la ZFT (ver figura 2.9).

Una de las estructuras más notables del yacimiento corresponde a la zona de pipa de Brechas Braden, la que se emplaza en rocas de la Formación Farellones (Camus, 1975) y corta varios cuerpos intrusivos emplazados previamente. Con el emplazamiento de los cuerpos intrusivos y de la Chimenea Braden se originó un fracturamiento, el cual afectó a estos cuerpos y a las rocas encajadoras preexistentes. Este fracturamiento es del tipo “stockwork” o enrejado de vetas y vetillas, las que alojan gran parte de la mineralización, alcanzando frecuencias máximas de 40 vetillas por metro lineal en las cercanías de los contactos con los intrusivos (Zúñiga, 1982).

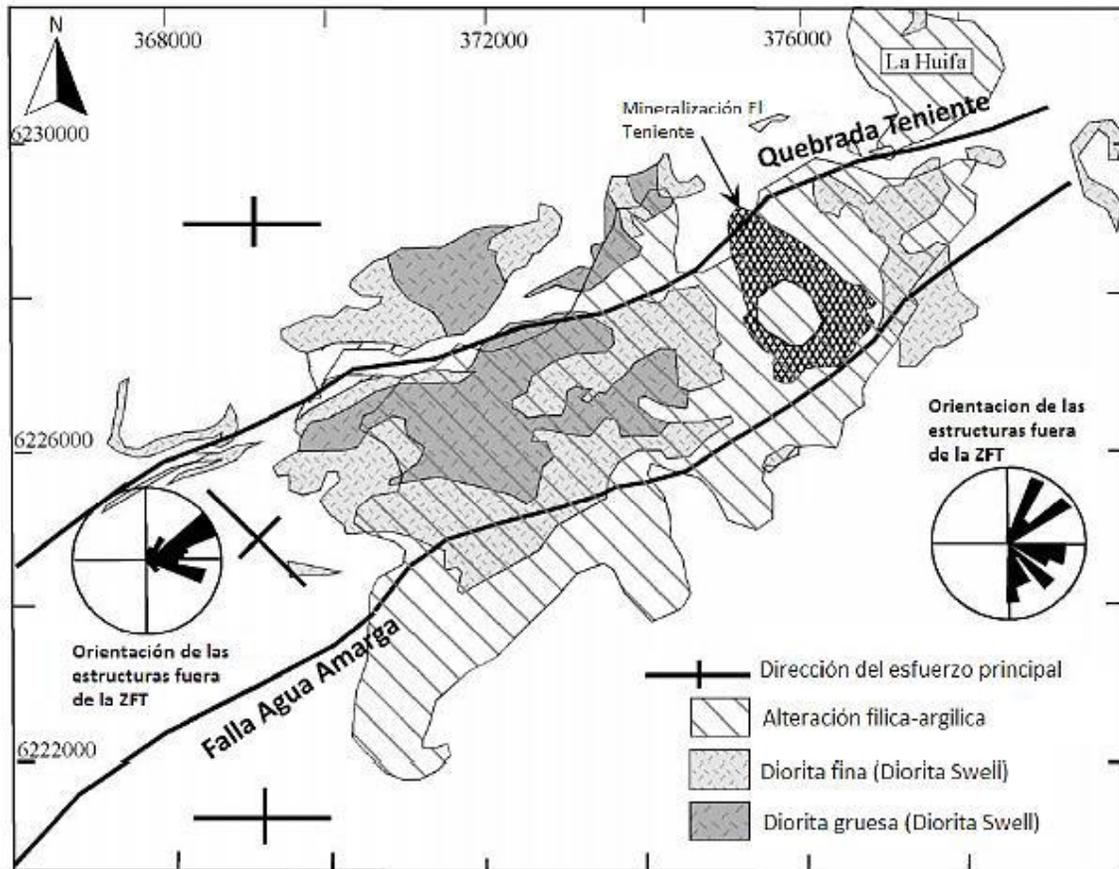


Figura 2.9: Zona de Falla El Teniente (ZFT). (Modificado de Garrido, 1995).

Dentro de la mina El Teniente las estructuras geológicas se clasifican de acuerdo a dos parámetros principales, la continuidad de la estructura y tipo de relleno (ver Tabla 2.2). En la mena primaria las estructuras se caracterizan por encontrarse selladas y con gran número de estructuras menores con trazas que alcanzan los 4 metros y conforman un denso enrejado por sobre las estructuras de mayores dimensiones. En los minerales de mena supérgenos, ubicados hacia sectores altos del yacimiento, el agua ha lixiviado algunos minerales cambiando las propiedades originales de las estructuras, lo que trae como consecuencia la pérdida de la impermeabilidad natural entregada por el relleno de las estructuras, lo que permite la circulación de agua.

Tabla 2.1: Clasificación de Estructuras Geológicas de El Teniente

Tipo de estructura	Continuidad	Espesor típico
Distritales	>1 km >1 m	>1 km >1 m
Maestras	>500 m	Entre 5 y 120 cm
Mayores	100 m o corta más de 3 labores	>7mm
Intermedias	>4m y <100 m o corta hasta 3 labores	<5mm
Menores	<4 m o no corta labor	≤2 mm

2.2.3 Alteración y Mineralización

La presencia de minerales de mena de Cobre y Molibdeno del yacimiento El Teniente es resultado de la superposición de diversos eventos de alteración y mineralización. En la actualidad se reconocen tres etapas de mineralización hipógenas, nombradas como Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía; además de una etapa supérgena. Éstas se encuentran relacionadas al emplazamiento de los cuerpos intrusivos félsicos, particularmente los pórfidos dacítico y diorítico, también se relacionan al anillo de brecha hidrotermal de turmalina y brecha Braden (Howell & Molloy, 1960). Producto de estos eventos de alteración, se originaron las vetillas Tardimagmáticas, Principales y Tardías, que conforman la evolución hipógena del yacimiento.

2.2.3.1 Etapa Pre-Tardimagmática

Definida por Cannel et.al. (2005), se trata de eventos tempranos de alteración que varían de pervasiva a controlada por vetas y ocurren en asociación con vetillas de magnetita tipo 1a. Entre los minerales de alteración se encuentran magnetita, cuarzo, anhidrita, actinolita, anortita y epidota. Los remanentes de esta alteración temprana se preservan en las unidades de andesita del yacimiento y principalmente en los márgenes del depósito como vetillas de magnetita. También se reconoce una alteración filica, con minerales de turmalina, sericita, clorita y magnetita, formada adyacente a la Tonalita Sewell. Esta etapa de alteración se encuentra asociada con vetas de cuarzo gruesas y no presenta mineralización de cobre o molibdeno.

2.2.3.2 Etapa Tardimagmática

Corresponde a los primeros eventos de alteración pervasiva del yacimiento. El mineral principal es la biotita secundaria, sin embargo también ocurre la alteración y deposición de minerales de anhidrita, albita, clorita, cuarzo, magnetita, sericita y turmalina. La mineralización ocurre mayoritariamente en vetillas sin halo, aunque existe también de manera diseminada (Zúñiga, 1982). El pórfido dacítico quedó con una zonación de minerales de mena durante esta etapa, con un núcleo rico en bornita, un sector intermedio de calcopirita y una parte externa con abundante pirita y magnetita.

Dentro del yacimiento existen dos sectores que presentan evidencias características de esta etapa de alteración. El primero es la zona norte, con la intrusión del pórfido dacítico (Arévalo y Floody, 1995) que presenta una gradación, desde el centro, en intensidad de alteración potásica con una alta cantidad de biotita secundaria, a propilítica. El segundo, es el sector sur del yacimiento, donde se observa la misma zonación mineral pero enmascarada por las alteraciones posteriores. En el Complejo Máfico El Teniente, la alteración se denota con la presencia de biotita, albita y cuarzo, que destruye la textura original de la roca (Arredondo, 1994).

2.2.3.3 Etapa Hidrotermal Principal

Esta etapa se superpone a la anterior y se relaciona con la interacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se caracteriza por la superposición de franjas de alteración cuarzo-sericita, ubicadas simétricamente con respecto al Pórfido Dacítico. Su intensidad se encuentra dictada por la frecuencia de vetillas de cuarzo, anhidrita y sulfuros, las que obliteran la mineralogía preexistente y texturas de la etapa tardimagmática (Ojeda *et al.*, 1980). Los minerales de mena corresponden a calcopirita, pirita y molibdenita subordinada, principalmente relleno de vetillas y escasamente en forma diseminada en los halos de alteración (Zúñiga, 1982). Las vetillas presentan relleno de cuarzo, anhidrita y calcopirita, con moscovita, digenita y molibdenita en menor cantidad. Las vetillas hidrotermales principales (HP) se asocian a esta etapa de alteración.

En la roca de caja, la mineralogía es reemplazada por una asociación de cuarzo-sericita, con anhidrita y clorita en menor proporción. La asociación se desarrolla superponiéndose a la biotita tardimagmática y a los feldespatos de las rocas máficas y del Pórfido Teniente respectivamente. En el Pórfido Diorítico y Pórfido Dacítico, el feldespato potásico, plagioclasa y los minerales ferromagnesianos se encuentran alterados en forma similar y la textura original fanerítica y/o porfídica es reemplazada por una textura sacaroidea fina.

2.2.3.4 Etapa Hidrotermal Tardía

Se relaciona espacial y genéticamente con la unidad Brecha Marginal (Villalobos, 1975). Se distingue por la alteración fílica de los fragmentos de la brecha, así como por vetas y vetillas rellenas con anhidrita, yeso, turmalina, siderita, cuarzo y con halos de alteración cuarzo-sericita-clorita-calcita. Minerales de mena de cobre, hierro y molibdeno se encuentran relleno de las vetillas (Zúñiga, 1982). Las vetillas se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas y además forman el cemento de la brecha hidrotermal de turmalina y como parte de la alteración de sus fragmentos. Arévalo *et al.* (1998), dividen a esta etapa en dos: una etapa temprana y una tardía propiamente tal asociada a la brecha de turmalina y constituye los valores máximos de penetrabilidad de la etapa tardía original.

2.2.3.5 Etapa Póstuma

Se relaciona a la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida por sericita, calcita y pirita en el cemento de la brecha, y por una alteración sericítica de la fracción clástica. Estructuras planares y cavidades son rellenas con minerales de baja temperatura tales como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización hipógena se presenta en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tennantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfalerita con anhidrita como mineral de ganga predominante, de manera subordinada se encuentran minerales de cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Como minerales secundarios se encuentran sericita, clorita y calcita junto con diseminaciones de pirita y calcopirita (Floody, 2000).

2.2.3.6 Etapa Supérgena

En esta etapa la alteración distribuye con una geometría elíptica de eje mayor NW del yacimiento en un área de 15 km² en la parte alta de éste (Portigliati & Camus, 1974; Ojeda *et al.*, 1980 y Álvarez, 1990). La cuenca alcanza una profundidad que varía entre los 100 y 600 m y un ancho que va desde los 100 a los 500 m (Cuadra, 1986). Esta etapa caracteriza por la lixiviación total de la anhidrita y la presencia de sericita y arcillas. La mineralización corresponde a sulfuros supérgenos entre los cuales se encuentran la calcosina gris, calcosina celeste y covelina azul, los cuales fueron generados por el reemplazo total de los sulfuros hipógenos preexistentes. El reemplazo fue gradual y selectivo para los sulfuros de cobre, primero los minerales de bornita y luego de calcopirita. La pirita durante el proceso de lixiviación no sufrió alteración (Álvarez, 1990). La edad de los eventos de alteración y mineralización se encuentra comprendida entre los 5,3 a 4,7 Ma (Cuadra, 1986 y Makshev *et al.*, 2001).

2.2.4 Modelo Estructural

De acuerdo a lo descrito por Howell (1960), Camus (1975), Cuadra (1986) y Cannel *et al.* (2005), el modelo de formación del yacimiento corresponde a un modelo de pórfido cuprífero, a diferencia de los establecido por Skewes *et al.* (2002) que argumenta que El Teniente se trata de un modelo de brechas mineralizadas.

El modelo de Cannel puede ser resumido en 3 eventos los cuales se pueden apreciar en la Figura 2.10. Primero un evento de intrusión inicial de un gran cuerpo plutónico a la roca huésped (CMET), el emplazamiento de este cuerpo generó esfuerzos inducidos los que provocaron la formación de las vetas concéntricas y radiales, estas vetas presentan alteración Tardímagmática, donde el Pórfido Dacítico, diques y pipas intruyeron a la roca madre, estas vetas presentan aproximadamente el 60% de la mineralización de cobre del yacimiento. Posteriormente durante la misma etapa se formaron las vetas de alteración Hidrotermal Principal, producto de la presión de fluidos magmáticos e hidrotermales, éstas redistribuyeron los minerales de mena y presentan el 30 % de la mineralización de Cu de El Teniente. Luego ocurrió un evento de subsidencia magmática del Plutón lo que provocó un cambio en las condiciones de los esfuerzos generando fracturas concéntricas subverticales sobre la cámara magmática con alteración Hidrotermal Tardía, en las cuales se encuentra el 10% de la mineralización de Cu del depósito; no se generaron fracturas radiales debido a la baja presión del magma. Finalmente se produjo un evento de resurgimiento del magma durante la etapa de alteración Hidrotermal Tardía, donde se generaron fallas inversas en el yacimiento y el emplazamiento de la Brecha Marginal y Brecha Braden.

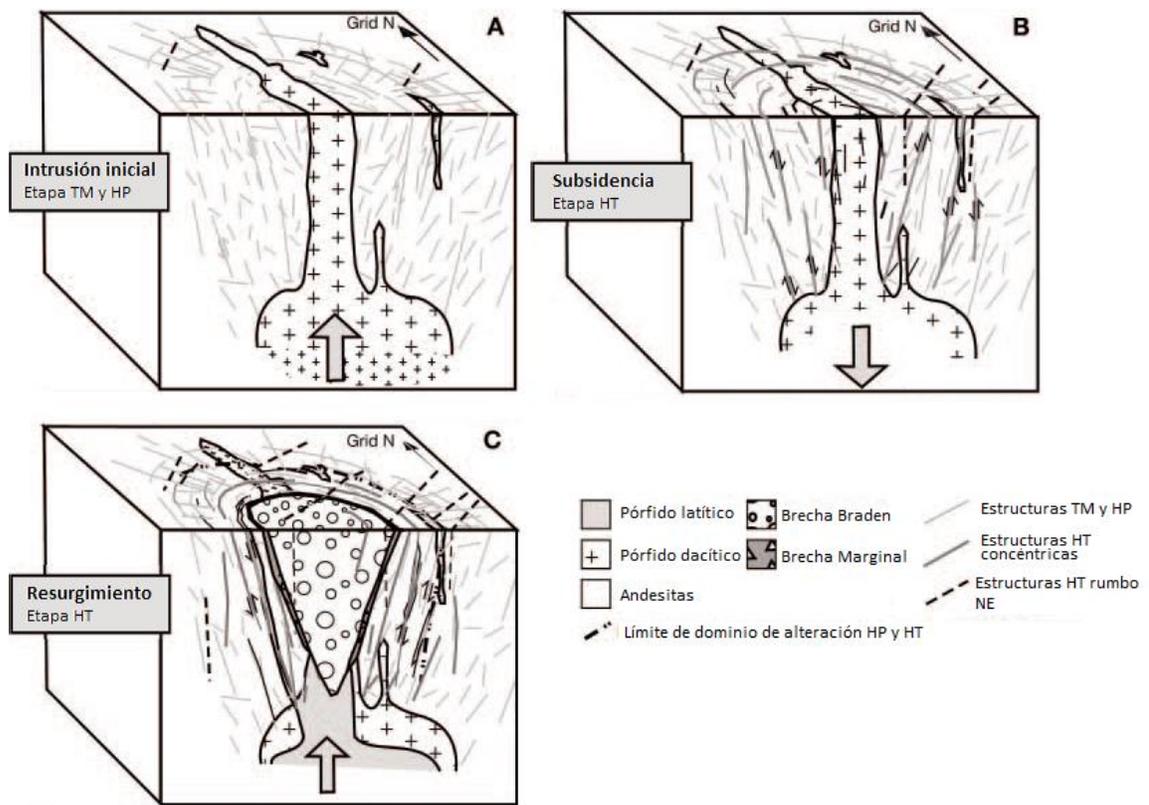


Figura 2.10: Modelo Estructural y Genético del Yacimiento El Teniente (Modificado de Cannel et. al., 2005)

3 METODOLOGÍA

Con el objetivo de encontrar los principales factores que controlan la recuperación de Mo en el procesamiento mineral del Yacimiento El Teniente, en primer lugar se dispone de una serie de datos correspondientes a los registros y procedencia de 1471 muestras, correspondientes a tramos de 12 a 36 metros de los yacimientos El Teniente y La Huifa. Estas muestras son filtradas bajo diversos criterios para finalmente disponer de la información de 1254 muestras las cuales únicamente pertenecen al yacimiento El Teniente. A partir de los datos de geometalurgia, geoquímica y mineralogía de las muestras se configura un sistema de bases de datos con énfasis en la información referente al Molibdeno. Cada base de datos se encuentra desarrollada de manera específica según su requerimiento. La información base contenida en cada base de datos corresponde a los parámetros de:

- Ley de Mo en las muestras de alimentación o cabeza.
- Ley de Cu en las muestras de alimentación o cabeza.
- Porcentaje de Molibdeno no sulfurado en las muestras de alimentación.
- Porcentaje de recuperación de Mo de la muestra en ensayo de flotación rougher.
- Porcentaje de Molibdenita en la muestra de alimentación.
- Concentración de Mo en la muestra de concentrado.
- Concentración de Mo en la muestra de relave.
- Sondaje de la muestra.
- Metraje del tramo de la muestra.
- Litología de la muestra.

Las bases de datos desarrolladas corresponden a una base de datos de:

- Geometalurgia.
- Geoquímica.
- Mineralogía.
- Distribución espacial, con los datos de ubicación de la muestra en el yacimiento (Este, Norte, Cota, Largo, Azimuth y Dip).
- Alteración.

A partir del sistema de bases de datos se procede a buscar correlaciones lineales y logarítmicas entre los datos disponibles para desarrollar una idea general sobre los parámetros que controlan o se relacionan con la recuperación de Molibdeno y cómo éstos interactúan con los demás datos geoquímicos y metalúrgicos de las muestras. Posteriormente entre los parámetros mejor que presentan mejores correlaciones con la recuperación de Mo, se realizan ajustes exponenciales, logarítmicos y polinómicos de manera de encontrar un modelo que mejor se adapte a la distribución de los datos más relevantes. Esto se efectúa con la función de detectar relaciones que el Coeficiente de Correlación de Pearson no puede evidenciar debido a que solo compara relaciones lineales.

Se estudian los posibles factores geológicos que pueden presentar una mayor influencia sobre los valores de los parámetros mineralógicos, geoquímicos y geometalúrgicos registrados en la base de datos y las correlaciones entre éstos. Los principales criterios geológicos encontrados que determinan un control sobre las variables de interés son la litología, la alteración de la roca y la zona geotécnica a la que pertenece la muestra. Estos criterios se incorporan a la base de datos y se evalúa en base a estos criterios el comportamiento de las correlaciones importantes encontradas entre los parámetros geometalúrgicos, geoquímicos y mineralógicos.

En primer lugar se registra la información litológica de las muestras y se comparan los valores promedio de la ley de Mo y recuperación de Mo de las muestras agrupadas según su litología. Luego se evalúan los resultados de las correlaciones y ajustes realizados a las variables de la base de datos en función de cada litología de la cual se tenga una cantidad de datos relevante, con el propósito de determinar el grado de influencia que presenta la litología de la roca en los resultados. Puesto a que en su mayoría las muestras corresponden al Complejo Máfico Teniente, el cual abarca cerca del 70% del volumen del yacimiento, es necesario conocer la ubicación de las muestras en el yacimiento. Se obtiene la información de coordenadas de las muestras en el yacimiento mediante la base de datos de El Teniente la cual se encuentra registrada en el programa Xilab, para luego representar espacialmente los datos haciendo uso del programa Leapfrog. Con la ayuda de Leapfrog, se realizan agrupaciones de las muestras en función de su ubicación en el yacimiento y proximidad con las rocas de las diferentes unidades intrusivas y brechas. Posteriormente se realizan nuevamente los cálculos de coeficientes de correlación y regresiones, y se evalúa la influencia de las agrupaciones de las muestras del CMET sobre las correlaciones entre la recuperación de Molibdeno y los principales parámetros de interés.

Luego se recopila la información numérica registrada sobre el grado y tipo de alteración de la roca en las muestras de sondajes, principalmente mediante los datos de mapeo de alteración realizados en el yacimiento, y la caracterización y clasificación de vetillas. Se incorporan los valores numéricos referentes al porcentaje de los eventos de alteración principales en el yacimiento (Pre-Tardimagmático, Tardimagmático, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardío) y se evalúa su control sobre los parámetros geometalúrgicos de interés, mediante el cálculo de coeficientes de correlación lineales y logarítmicos con los datos de alteración y evaluando las muestra por su litología correspondiente.

En conjunto con agregar el grado de alteración de las muestras en la base de dato++-----s, se asigna a las muestras los datos de su zona geotécnica correspondiente y se registra si se encuentran dentro de los dominios hidrotermales marcados por el límite HT/HP definido al Este del yacimiento. Posteriormente se procede a analizar las correlaciones de los parámetros de interés detallados en la base de datos y la influencia que presentan las zonas geotécnicas y los dominios hidrotermales sobre los controles geológicos y metalúrgicos estudiados.

Para desarrollar una caracterización geológica de la ocurrencia y distribución de la Molibdenita se realiza una descripción macroscópica a través del mapeo de muestras de

sondajes que corresponden a tramos de 12 metros de largo. Se mapearon más de 100 tramos, de los cuales, únicamente 69 contaban con una presencia importante de Molibdeno en forma de Molibdenita o de Powellita. Dentro de la información detallada en el mapeo destacan:

- La litología de la muestra, la cual debe ser monolitológica.
- La alteración presente en la muestra, con los porcentajes respectivos de los eventos de alteración.
- La mineralogía asociada al evento de alteración correspondiente.
- La mineralización de la muestra, sus asociaciones y evento de alteración asociados.
- Un estudio de vetillas completo, enfocado en las vetillas con presencia de Molibdenita, detallando el estilo de mineralización y las asociaciones minerales presentes.
- Una estimación del aporte porcentual de la Molibdenita según el evento de alteración donde precipitó. Realizado mediante una clasificación y conteo de vetillas, junto con una estimación de la Molibdenita contribuida al sistema.

Continuando con el estudio de caracterización geológica de la Molibdenita, se realiza un análisis a escala microscópica de las vetillas de Molibdenita. Esto se logró mediante la descripción de cortes de vetillas en microscopía óptica. Se describieron 20 cortes con vetillas que abarcan las litologías predominantes y los 3 eventos de alteración principales en el yacimiento. Los cortes fueron obtenidos a partir de muestras seleccionadas de los tramos de sondajes estudiados, bajo el criterio de estudiar todos los estilos mineralización observados a escala macroscópica y los eventos de alteración que presentan mineralización de Molibdenita. La descripción de los cortes consiste en detalle de:

- La litología de la roca hospedante, así como su mineralogía.
- La mineralogía de alteración de la vetilla en el relleno y el halo de la vetilla, y clasificar su evento de alteración correspondiente.
- El estilo de mineralización de la Molibdenita y sus fases minerales en asociación.

Con la caracterización macroscópica y microscópica de la Molibdenita realizada se procede a recopilar y comparar los estilos de mineralización definidos. Se entrega una explicación geológica del proceso de formación de cada estilo de mineralización y se clasifican los estilos de mineralización de acuerdo a su evento de alteración correspondiente.

Para complementar los estudios realizados se procede a realizar una selección de 20 muestras de tramos de 12 metros de sondaje, dentro de las muestras mapeadas previamente. Se realizan diversos estudios posteriores a un proceso de molienda y reducción homogénea de la muestra. Estos estudios incluyen un análisis químico, ensayos de flotación rougher y un análisis de mineralogía QEMSCAN mediante la configuración PMA que entrega información sobre el grado liberación de los cristales de

Molibdenita, los minerales a los que se encuentra asociados, y el tamaño de los cristales de Molibdenita y partículas asociadas. Con esta información se pueden comparar los datos de caracterización mineralógica con los datos geometalúrgicos mediante la elaboración de gráficos y definir tendencias en el comportamiento del Mo en el proceso de flotación. Esto se complementa con la caracterización de los estilos de mineralización y su evento de alteración asociado.

Posteriormente se recopila toda la información analizada y se busca encontrar una explicación geológica a las interacciones observadas entre todos los criterios geológicos y parámetros geometalúrgicos relacionados a la recuperación de Molibdeno. Se prosigue a definir sectores dentro del yacimiento con un comportamiento del Molibdeno geológico y geometalúrgico similar. Estos sectores son determinados a partir de sus características geológicas de litología, alteración y estructurales, formando zonas de influencia en común de determinados parámetros geológicos y geometalúrgicos sobre la recuperación de Mo.

Finalmente se detallan una serie de criterios que tienen como propósito determinar las bases para la construcción de Unidades Geometalúrgicas (UGM) de Molibdeno. Estos criterios se determinan en base a los controles geológicos estudiados y su influencia sobre el comportamiento del Molibdeno en los diferentes sectores del yacimiento El Teniente.

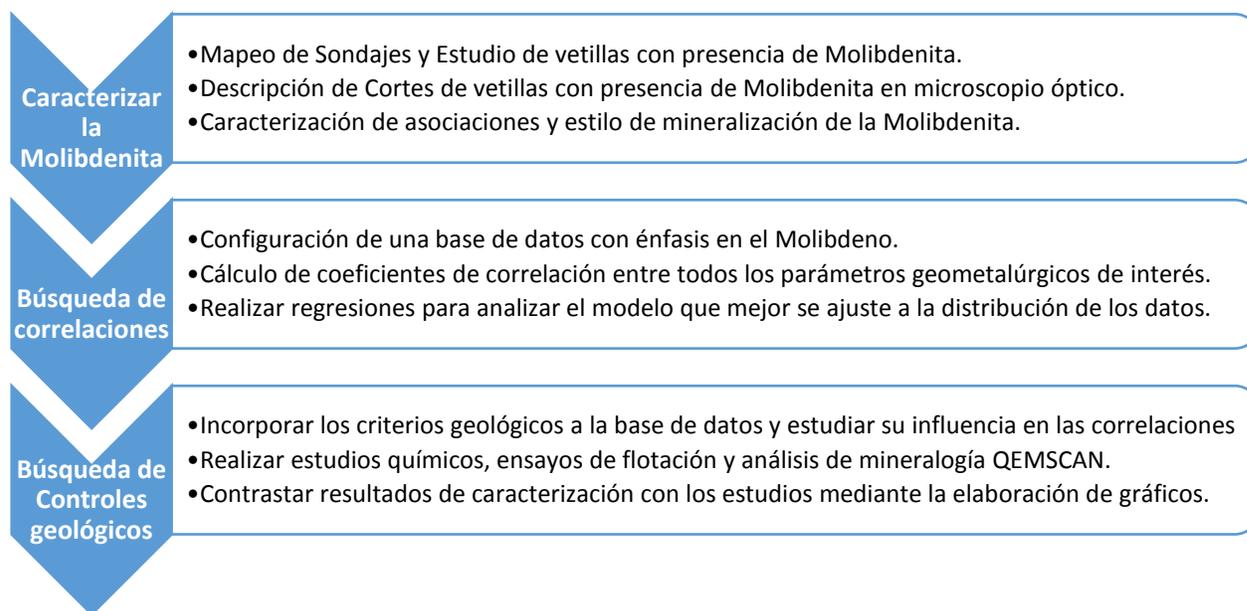


Figura 3.1: Resumen de metodología

4 RESULTADOS

4.1 ALTERACIÓN DEL YACIMIENTO Y SU RELACIÓN CON EL MOLIBDENO

El Teniente, además de ser el yacimiento tipo pórfido cuprífero más grande del mundo, es también la fuente más grande de molibdeno en el mundo, con una cantidad estimada de 2,5 Millones de toneladas de recursos. El Molibdeno del yacimiento es un subproducto de la minería del Cobre y tiene una ley promedio de 0,02%. Este elemento se encuentra presente principalmente en forma de Molibdenita (MoS_2), pero también existen otras fuentes minerales como la Wulfenita (PbMoO_4), la Powellita (CaMoO_4) y la Scheelita (CaWO_4). Estudios realizados sobre la génesis del yacimiento indican que la mineralización de Molibdenita ha estado presente en cada etapa de alteración del yacimiento pero en cantidades muy variables y se encuentra asociada a los mismos eventos que generaron la mineralización de sulfuros de cobre primarios.

4.1.1 Clasificación de Vetillas

Los eventos de Alteración y Mineralización del Yacimiento son clasificados de acuerdo a su tiempo de ocurrencia y las características petrológicas y metalogénicas. Cannel et.al. (2005), Vry et.al. (2010) y el Estándar de Geología de El Teniente, catalogan estas etapas mediante el estudio y clasificación de vetillas, cada uno de estos estudios presenta su propia clasificación de vetillas y las asocian a los eventos principales de alteración. En la Figura 4.1 se pueden apreciar las correlaciones existentes entre las 3 clasificaciones, cabe destacar que el estudio de Cannel et.al. (2005) no hace mención a la Molibdenita dentro de la mineralización de las vetillas.

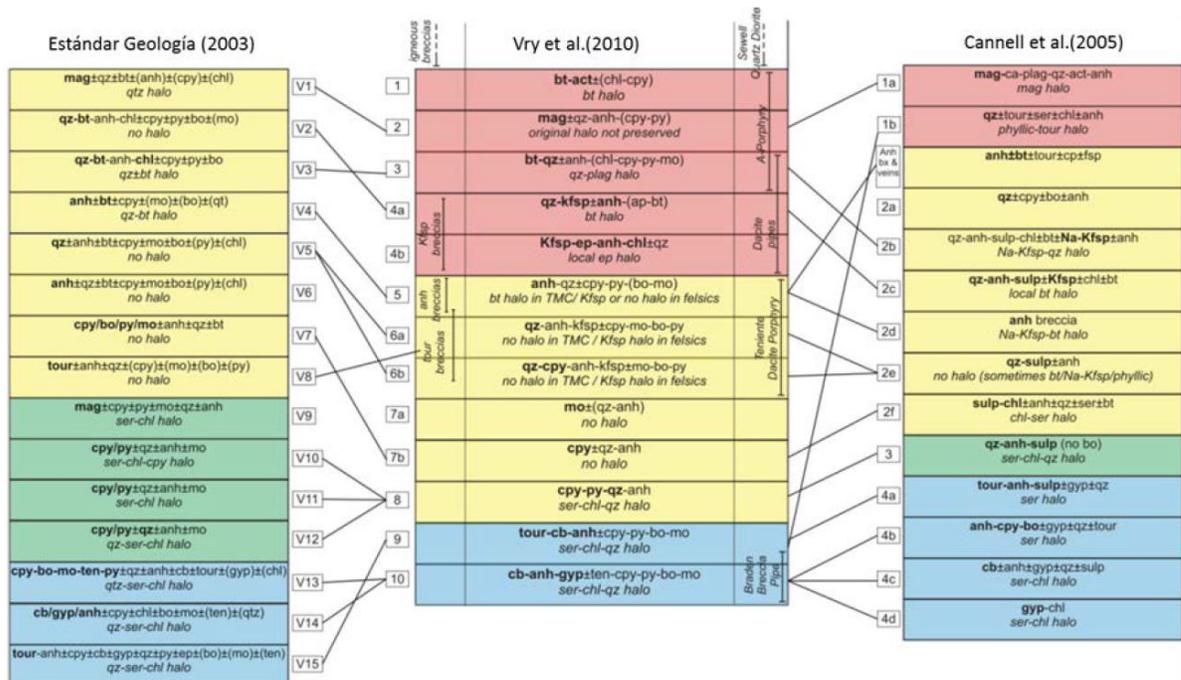


Figura 4.1: Correlación de la clasificación de las vetillas presentes en El Teniente (Estándares de geología de El Teniente (2003); Cannel et al. (2004) y Vry et al. (2010).)

De acuerdo al Estándar de Geología de El Teniente, existen 15 diferentes tipos de vetillas identificables en el yacimiento, las cuales se categorizan dentro de 3 diferentes eventos de alteración, según su mineralogía, origen y cronología. En la Tabla 4.1 se pueden apreciar las características principales de los diferentes tipos de vetillas.

Tabla 4.1: Catálogo de vetillas presentes en el Yacimiento El Teniente, según la clasificación del Estándar de Geología

Alteración	Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía principal	Halo	Características Diagnósticas
TM	V1	mt +-qz +-bt +-(anh) +- (cpy) +-(chl)	mt	Silíceo	Magnetita, Halo deslavado
	V2	qz-bt-anh-chl +-cpy +-py +-bn +-(moly)	qz-bt	Sin halo	Sin halo, Bordes nítidos, mineralogía qz-bt
	V3	qz-bt-anh-chl +-cpy +-py +-bn	qz-bt-chl	Silíceo-clorítico, Bt diseminada	Halo silíceo difuso, mineralogía qz-bt-chl. bt-chl en sutura
	V4	anh +-bt +-cpy +-(moly) +-(bn) +- (qz)	anh	Silíceo-Biotítico	Anhidrita, Halo característico
	V5	qz +-anh +-bt +-cpy +-moly +-bn +-(py) +-(chl)	Qz	Sin halo	Vetillas de bordes nítidos sin halo, Stockwork denso, sulfuros diseminados o en sutura central.
	V6	anh +-qz +-bt +-cpy +-moly +-(py) +- (chl)	anh	Sin halo	Vetillas de bordes nítidos sin halo, Stockwork denso, sulfuros diseminados.
	V7	cpy y/o bn y/o py y/o moly +-anh +-qz +-bt	sulfuros	Sin halo	Vetillas de bordes nítidos sin halo, Stockwork denso. Sulfuros se alternan con bt en microvetillas
	V8	mt +-qz +-bt +-(anh) +- (cpy) +-(chl)	Tur	Sin halo	Vetillas de bordes nítidos, sin halo.
HP	V9	mt +-cpy +-py +-moly +-qz +-anh	Mt	Sericítico-Clorítico, Cpy-Py diseminada	Halo simple/asimétrico, puede tener chl diseminada
	V10	cpy y/o py +-qz +-anh +-moly	cpy y/o py	Sericítico-Clorítico, Cpy-Py masiva.	Halo bandeado/simple con sulfuros diseminados o masivos
	V11	cpy y/o py +-qz +-anh +-moly	cpy y/o py	Sericítico-Clorítico	Halo bandeado semicomplejo con bordes difusos. Escasos sulfuros diseminados
	V12	cpy y/o py +-qz +-anh +-moly	cpy y/o py	Cuarzo-Sericítico-Clorítico, sulfuros masivos	Doble halo con mineralización diseminada o masiva
HT	V13	cpy-bn-moly-tete-py +-qz +-anh +-cal +-tur +-(ys) +-(chl)	sulfuros	Silíceo-Sericítico-Clorítico	Variedad mineralógica de sulfuros. Halo desarrollado y difuso
	V14	cal y/o ys y/o anh +-cpy +-chl +-bn +-moly +- (tete) +-(qz)	carbonatos y sulfatos	Silíceo-Sericítico-Clorítico	Variedad mineralógica. Halo desarrollado y difuso. Turmalina abundante
	V15	tur-anh +-cpy +-cb +-ys +-qz +-py +-ep +-(bn) +- (moly) +-(tete)	tur	Silíceo-Sericítico-Clorítico	Variedad mineralógica de carbonatos y sulfatos. Halo desarrollado y difuso

Dentro de las 15 vetillas descritas en el Estándar de Geología, 10 de ellas presentan Molibdeno ya sea de abundancia o diseminado. En la Tabla 4.2 se puede apreciar la comparación entre las vetillas con presencia de molibdenita dentro de las 3 clasificaciones existentes y su etapa de alteración correspondiente.

Tabla 4.2: Comparación entre vetillas con presencia de molibdenita y su etapa de alteración

Estándar de Geología		Vry 2010		Cannel 2005	
Vetillas	Alteración	Vetillas	Alteración	Vetillas	Alteración
V3	TM	Tipo 3	Pre Mineralización	2b	Pre Mineralización
V4	TM	Tipo 5	Mineralización principal	2d	Tardimagmática
V5	TM	Tipo 6a y 6b	Mineralización principal	2e	Tardimagmática
V7	TM	Tipo 7a	Mineralización principal	2f	Tardimagmática
V10-V11-V12	HP	Tipo 8	Mineralización principal	3	Hidrotermal Principal
V13-V14-V15	HT	Tipo 9 y 10	Mineralización tardía	4a-4b-4c-4d	Hidrotermal Tardía

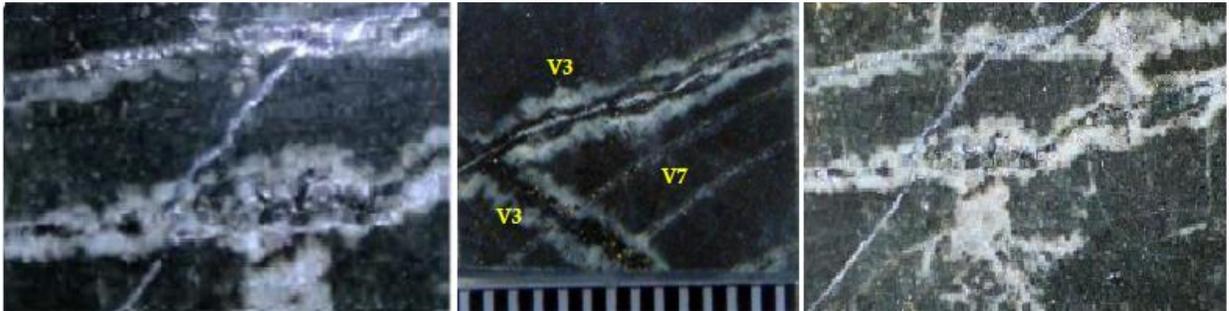


Figura 4.2: Vetillas V3 de Cuarzo y Biotita con presencia de Molibdenita

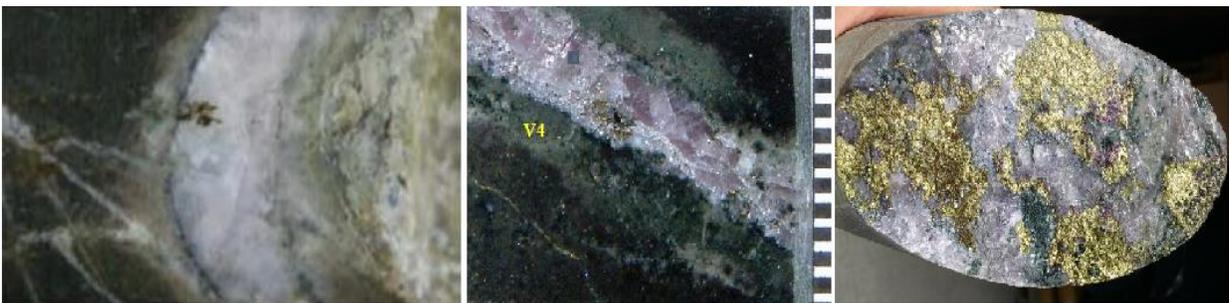


Figura 4.3: Vetillas V4 con relleno de Anhidrita con presencia de Molibdenita diseminada

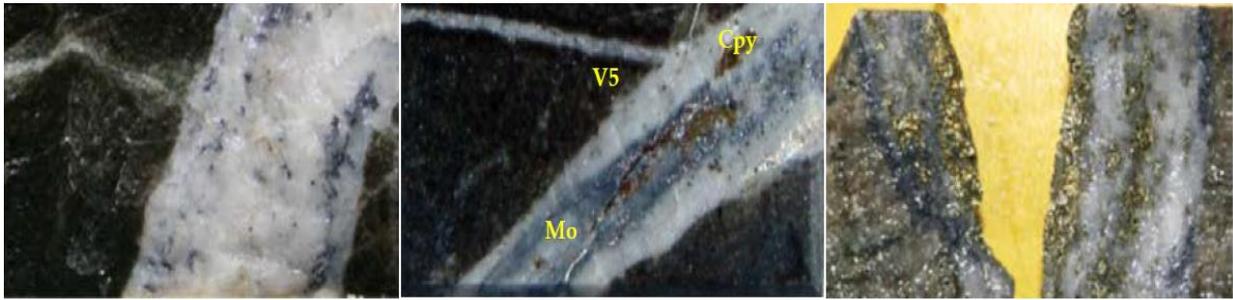


Figura 4.4: Vetillas V5 de Cuarzo con presencia de Molibdenita diseminada



Figura 4.5: Vetillas V7 de Molibdenita masiva y sin halo

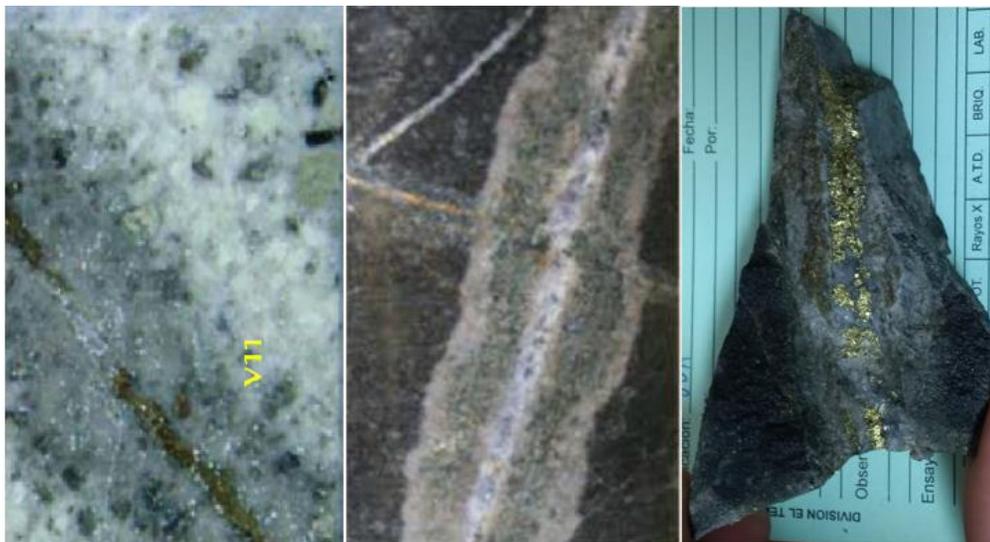


Figura 4.6: Vetillas V10-V11-V12 con sulfuros masivos y halo cuarzo-sericítico-clorítico bien definido



Figura 4.7: Vetillas V15 de turmalina con molibdenita diseminada, V14 de carbonatos y yeso con molibdenita diseminada

4.1.2 Modelo genético y mineralización de Molibdeno

El Yacimiento El Teniente se encuentra hospedado en el Complejo Máfico El Teniente, un complejo intrusivo y volcanoclástico que se emplazó en la Formación Farellones entre 15,2 y 7,5 Ma formando un lacolito de 50 km³ de volumen (Cuadra, 1986). En base a los estudios realizados por Cannel et.al. (2005), Vry et.al. (2010), Spencer et.al. (2015) y a la información dispuesta Estándar de Geología de El Teniente, identificamos 5 etapas de Alteración: Pre-Tardimagnética, Tardimagnética, Hidrotermal Principal, Hidrotermal Tardía y Póstuma.

4.1.2.1 Etapa Pre Tardimagnética

Esta alteración se caracteriza por presentar minerales de magnetita, cuarzo, anhidrita, actinolita, plagioclasa cálcica y epidota. El estilo de alteración varía de pervasiva a controlada por vetillas y se encuentra normalmente asociada a vetillas tipo V1 o cúmulos de magnetita diseminada reemplazando minerales de plagioclasa primaria. El margen del yacimiento es donde más se destaca la presencia de esta alteración, aunque también se encuentran vestigios de esta alteración dentro del Complejo Máfico El Teniente.

Se identifica una alteración fílica en los bordes adyacentes a la Tonalita Sewell con minerales de turmalina, sericita, clorita y magnetita y asociados a vetillas de cuarzo. Se le conoce también como etapa sin mineralización, ya que no presenta eventos importantes de mineralización de cobre o molibdeno.

4.1.2.2 Etapa Tardimagnética

Entre los 6,5 y 4,5 Ma tuvo lugar el emplazamiento de una serie de cuerpos intrusivos félsicos a intermedios cuyo ascenso se piensa fue debido a fluctuaciones en la temperatura y magma mixing (Cuadra 1986, Skewes et. al. 2002, Makshev et. al. 2004, Vry et. al. 2010, Spencer 2015). Cannel (2005) plantea que estos cambios son producto de la intrusión de un gran plutón félsico el cual se encuentra bajo el yacimiento. Esta etapa se caracteriza por estar asociada a una fuerte alteración potásica con biotita secundaria principalmente la cual se llega a extender por 1 km hacia afuera de los pórfidos dacíticos y en la periferia se produjo una alteración propilítica con clorita y sericita como minerales característicos, esta alteración se extiende más allá de 300 km de los cuerpos intrusivos.

Los principales eventos de mineralización en el yacimiento también se deben a este emplazamiento de intrusivos félsicos, esta mineralización ocurre principalmente en vetillas y brechas y sus porcentajes son mayores en los márgenes cercanos al contacto entre los pórfidos y el Complejo Máfico El Teniente. Es durante esta etapa donde se introduce aproximadamente el 60% del cobre presente en el yacimiento (Cannel et. al., 2005). Las vetillas mineralizadas contienen principalmente minerales de cuarzo, anhidrita y sulfuros, son generalmente continuas y sin halo (son clasificadas como vetillas V2 a V8 en el Estándar de Geología de El Teniente). Las brechas ígneas formadas durante la etapa tardimagnética, aunque contienen un alto porcentaje de sulfuros mineralizados, solo corresponde al 10% de la mineralización encontrada en el yacimiento.

La mineralización de sulfuros muestra en la etapa tardimagmática una fuerte correlación con la zona de alteración. En promedio la zona de alteración potásica presenta mayores leyes de Cu (>1%) y Mo (>0.1%). En la zona de transición potásica-propilítica las leyes de Cu se mantienen sobre el 1% pero las de Mo comienzan a bajar en un rango entre 0.1-0.3 %. En la zona de alteración propilítica la cual se encuentra más alejada de los pórfidos las leyes de minerales de mena disminuyen drásticamente, la ley de Cu se promedia por bajo el 0.5% y la Ley de Mo bajo el 0.1%.

La Cuarzo-Diorita Sewell es la intrusión más antigua, ubicada al SE del yacimiento, la cual fue intruída por el Pórfido Andesítico, ambos cuerpos se emplazaron entre los 6,9 y 5,7 Ma. El Pórfido Andesítico corresponde al primer cuerpo mineralizado del yacimiento, donde la mineralización se concentra principalmente en su flanco norte. El Pórfido Andesítico o Pórfido A presenta una de las mayores concentraciones de molibdeno en el yacimiento (>0.07 %) y su mineralización se da principalmente en vetas tipo V3 y V4. En las vetas V4 la molibdenita está presente como cristales alargados, principalmente en los márgenes de las vetillas, asociadas con cuarzo.

Posteriormente ocurre el emplazamiento de una serie de cuerpos de composición diorítica (La Diorita Sur, Diorita Central, Diorita Norte-Central y Diorita Norte), con una edad de emplazamiento aproximada entre los 6,1 y 5,6 Ma (Spencer et. al., 2015). En estos pórfidos la mineralización de molibdenita está controlada principalmente por vetillas V5 cuyo enriquecimiento de molibdeno se incrementa con la profundidad y disminuye drásticamente al alejarse (40-50m) de los márgenes de los pórfidos. La Molibdenita en estas vetas se encuentra diseminada y en la sutura central, asociadas a cuarzo el cual es el relleno principal de las vetas V5. La gradación de la Molibdenita presente en las vetillas es más evidente en las vetillas V5 que en cualquier otro tipo de vetillas del Yacimiento El Teniente.

Finalmente se emplazó el Pórfido Dacítico, el último gran cuerpo intrusivo asociado al Yacimiento El Teniente, éste se emplazó hace 5,3 Ma aproximadamente. La intrusión de este pórfido se encuentra asociada al emplazamiento de vetas y stockworks de cuarzo-anhidrita y mineralización de sulfuros, principalmente Calcopirita, Bornita y Molibdenita. La mineralización se da principalmente en vetillas V5 y V7, las vetillas V7 presentan una alta presencia de Molibdenita, alterada con Biotita, son aparentemente transicionales entre las vetillas V5 ricas en Molibdenita y V5 ricas en Calcopirita, y no aparentan tener una gradación importante en el porcentaje de Mo presente en éstas. Asociados a los cuerpos intrusivos emplazados durante la etapa tardimagmática se formaron cuerpos de Brechas Ígneas los cuales también se encuentran relacionados con la mineralización del yacimiento.

4.1.2.3 Etapa Hidrotermal Principal

Luego de la intrusión del Pórfido Dacítico, se formaron vetas con alteración fílica predominante, producto de la presión ejercida por los fluidos magmáticos e hidrotermales que se originaron en los intrusivos. La intensidad de la alteración fílica es mayor en la parte superior del depósito, donde corta la alteración potásica previamente formada durante la etapa tardimagnética. Estos fluidos redistribuyeron la mineralización principal depositada en la etapa Tardimagnética. Las vetillas presentes en esta etapa de alteración son principalmente gruesas (2mm-3cm) asociadas con intensos halos de alteración fílica, principalmente de sericita (75 %), gruesos (3mm-5cm), con cuarzo (5-25%), clorita y anhidrita como minerales secundarios.

La mineralización en esta etapa se da en vetas V9 a V12 rellenas normalmente de Anhidrita y menor Cuarzo, los minerales de mena presentes se dan en forma masiva y son principalmente Calcopirita, también es común la mineralización de Pirita masiva. La etapa Hidrotermal Principal contiene escasa mineralización de Bornita y Molibdenita, ésta última se da en forma de cúmulos asociada a Calcopirita en vetillas V10-V11 y V12, (Spencer et. al., 2015). Las vetillas Hidrotermales principales decrecen en cantidad en los niveles más someros de la mina y decrecen también a medida que aumenta su proximidad con el Pórfido Dacítico (Cannel et. al., 2005).

4.1.2.4 Etapa Hidrotermal Tardía

Esta etapa ocurrió entre los 4,95 y 4,65 Ma (Maksaev et. al., 2004) y es un segundo evento de alteración fílica en el Yacimiento El Teniente. Se encuentra asociada a un evento de subsidencia del magma que originó los depósitos intrusivos, y posteriormente a un resurgimiento del magma donde se finaliza con la intrusión de la Brecha Braden. El cambio en las condiciones de esfuerzo provocado por la subsidencia del magma, generó fracturas y vetillas concéntricas y subverticales a una baja presión, estas vetillas rodearon el sector donde posteriormente se emplazaría la Brecha Braden.

El resurgimiento del magma provocó una presión de fluidos hidrotermales que generó el emplazamiento de diques pórfido latíticos, zonas de brecha marginal y finalmente la Brecha Braden, con una edad de emplazamiento de 4,8 Ma (Cannel et. al., 2005). La brechización generada fue posiblemente freatomagnética (Sillitoe, 1985). Se formaron diversos tipos de brechas no ígneas durante esta etapa, entre las principales se encuentran la Brecha de Turmalina, Brecha de Sericita, las Brechas de Anhidrita, Brechas de Yeso, etc., los cuales presentan un enriquecimiento de Molibdeno de hasta 0,35% en promedio en algunos sectores. En las Brechas de Anhidrita, Yeso y Carbonatos, las cuales se encuentran enriquecidas en Molibdeno, éste se encuentra concentrado en el borde de los clastos y se presenta comúnmente como cristales tabulares alargados.

Las vetas y brechas formadas durante la etapa Hidrotermal Tardía contienen diversa mineralogía, turmalina, sulfatos como anhidrita y yeso, carbonatos, entre otros. La mineralización contiene sulfuros de Cobre y una gran concentración de Molibdenita. Ésta ocurre predominantemente en vetas V15 las cuales se puede observar que cortan a todos los cuerpos intrusivos y de brecha del yacimiento. Éstas se encuentran

fuertemente asociadas a la fase Brecha Marginal de la Pipa Braden y forman un halo de vetillas hacia el exterior del borde de la Brecha Braden (Cannel et. al., 2005). Estas vetillas presentan un relleno mayoritariamente de Turmalina y su mineralización es principalmente de Molibdenita diseminada. Presentan también un aparente enriquecimiento en Mo a medida que aumenta la frecuencia de las vetillas, la cual aumenta a su vez con la cercanía a los márgenes de la Brecha Braden, Brechas de Anhidrita y la Brecha de Turmalina. Las Vetillas V14 cortan a las vetillas V15, son más abundantes en las andesitas y gabros del CMET adyacentes a la Brecha Braden y menos abundantes dentro de ésta última. Las vetillas V14 tienen un relleno de carbonatos y sulfatos, además de presentar abundante Molibdenita, en cúmulos, masiva o diseminada, típicamente se da en los bordes de las vetillas, junto con cantidades variables de Calcopirita y Bornita (Spencer et. al., 2015). En las vetillas V13 la Molibdenita se encuentra asociada con Bornita, estas vetillas presentan una alta frecuencia al Sur del Complejo de Brechas Braden, a lo largo del Pórfido Diorítico Central y Pórfido Diorítico Sur, en brechas hidrotermales al sur y al este del complejo de Brechas Braden. Las vetillas de la etapa Hidrotermal Tardía V13-V14-V15 se encuentran en una relación espacial con fallas y fracturas que rodean al Complejo de Brechas Braden en los niveles superiores del Yacimiento El Teniente.

4.1.3 Distribución espacial de la Molibdenita en el yacimiento

En las Figura 4.8, Figura 4.9 y Figura 4.10 se observa la distribución de la ley de Mo en cortes en planta a diferentes cotas en el Yacimiento El Teniente. Estas imágenes resultan útiles para comprender de mejor manera la distribución del Molibdeno y su relación con su recuperación en los diferentes sectores de El Teniente, y así ocupar esta información para poder segregar, estudiar y analizar los futuros resultados obtenidos de una forma más eficiente.

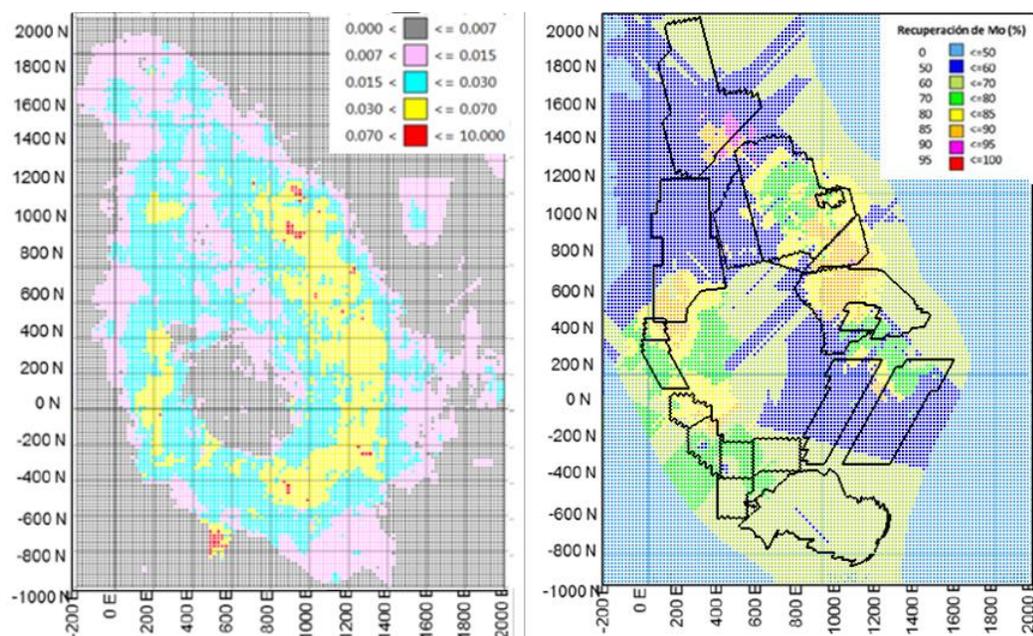


Figura 4.8: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota profunda (1960 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.

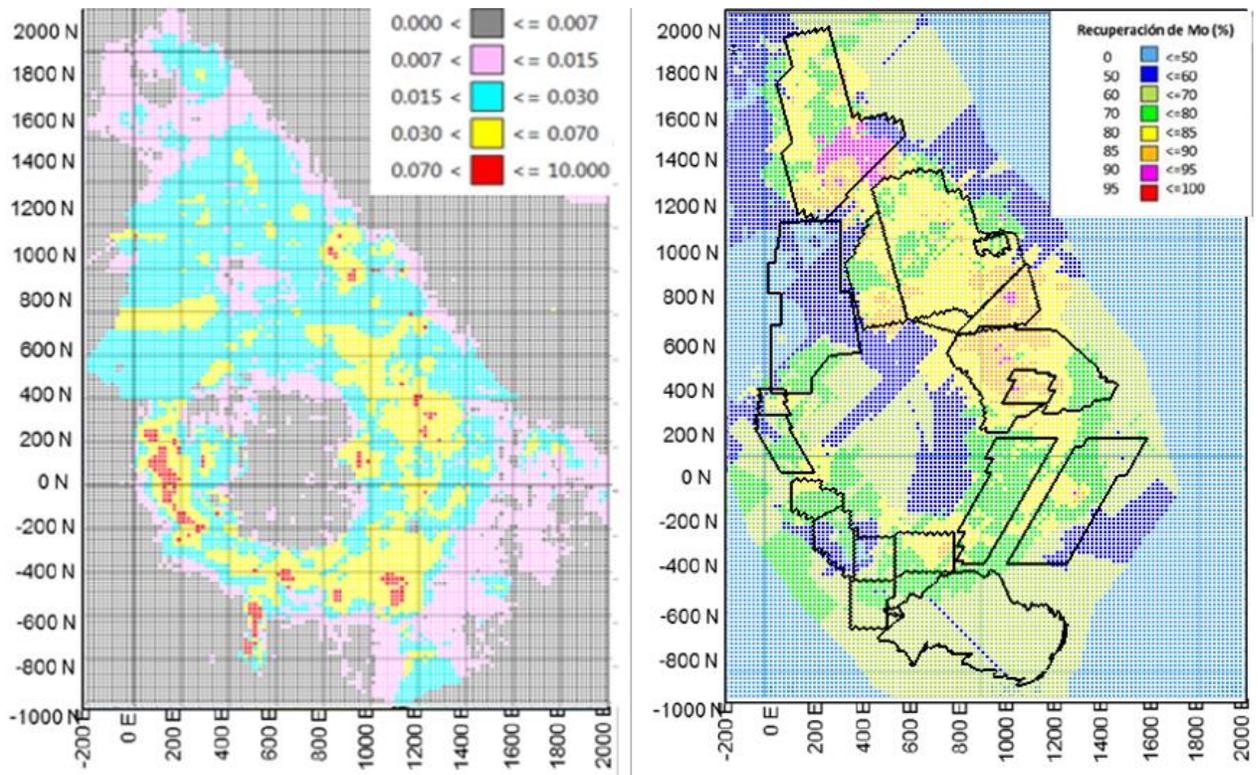


Figura 4.9: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota intermedia (2150 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.

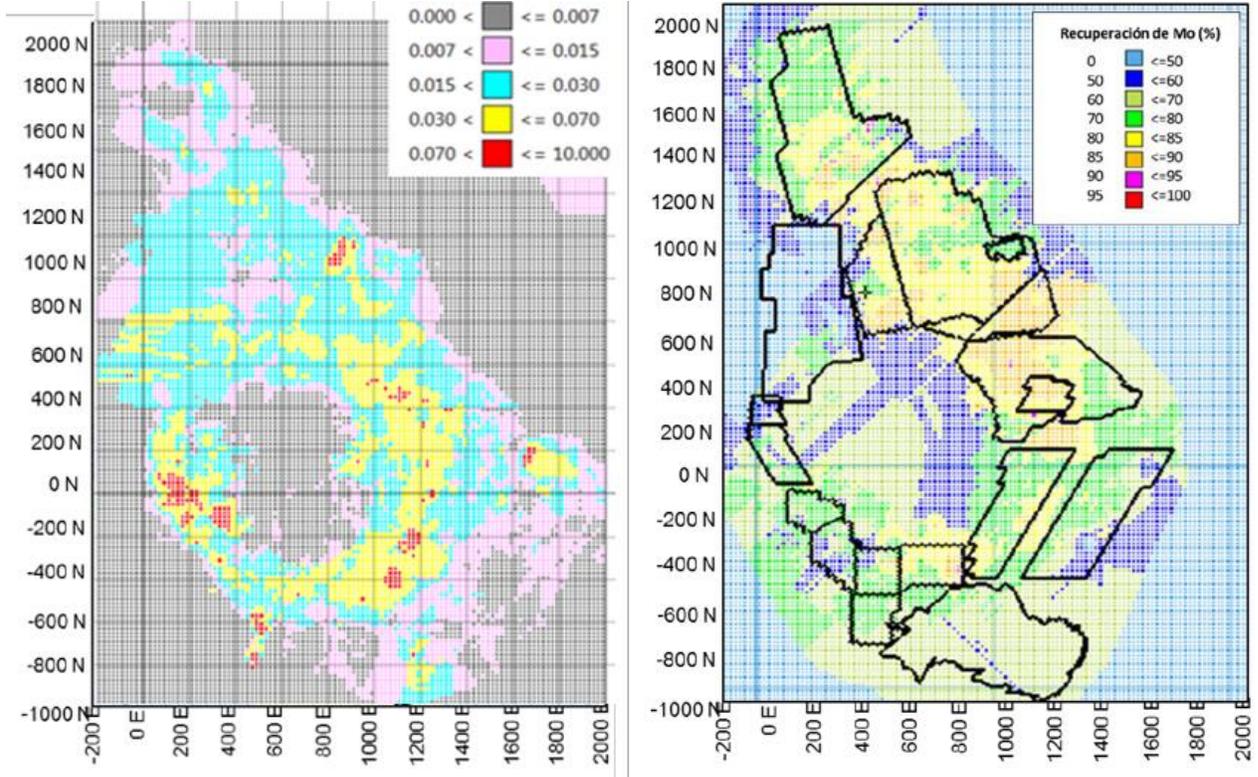


Figura 4.10: A la izquierda, mapa de distribución de Ley de Mo. A la Derecha, mapa de distribución de Recuperación de Mo. Cota somera (2210 m.s.n.m.), cortesía de CODELCO, División El Teniente, INF_26_2017, Fonseca, 2017.

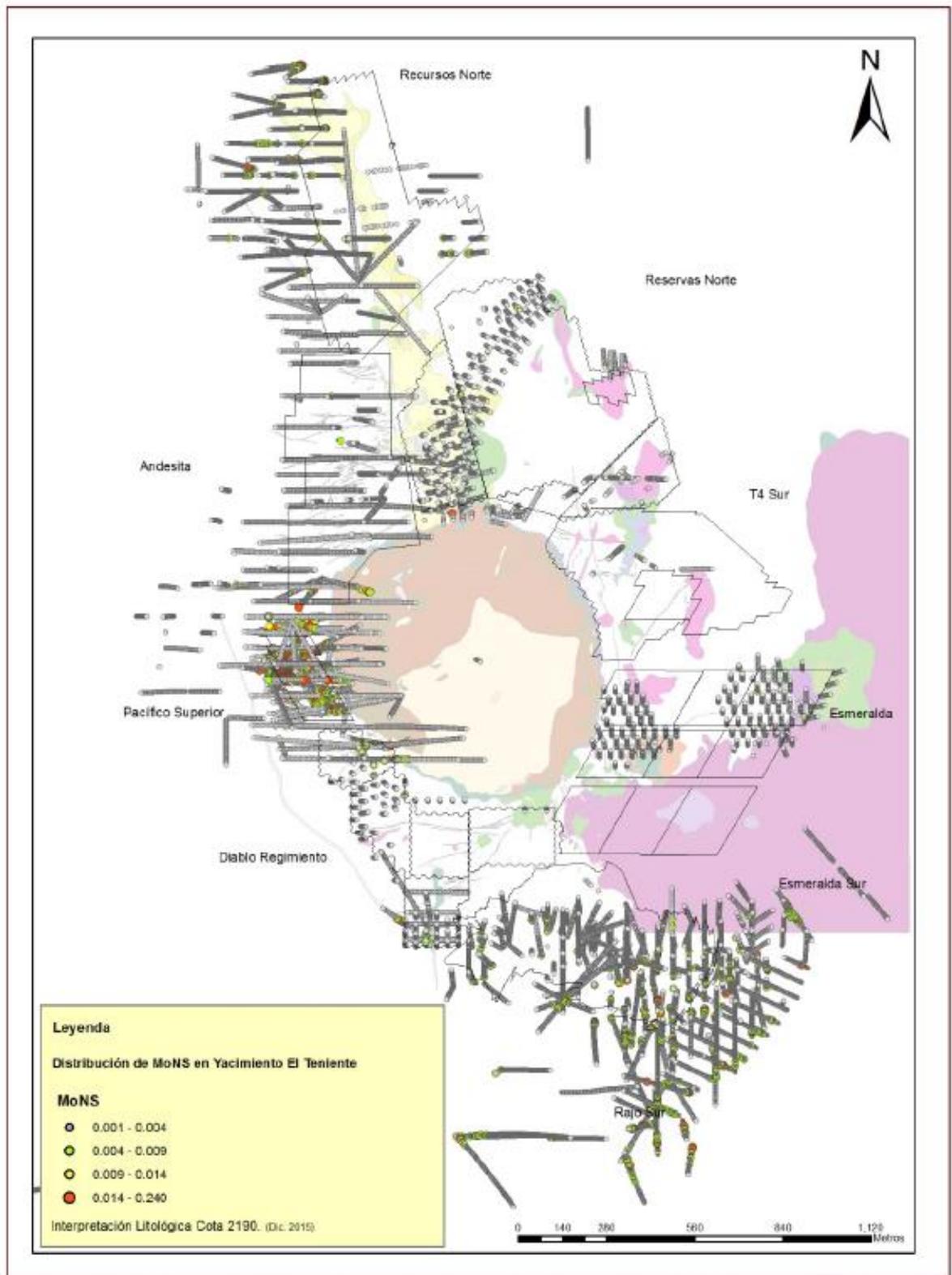


Figura 4.11: Distribución de las concentraciones de MoNS en El Teniente, Cortesía de Codelco, división El Teniente. Informe N°1-003-2017, Garrido, 2017.

En el yacimiento El Teniente existen diversos sectores productivos. Un análisis más detallado de la distribución y forma de ocurrencia del molibdeno por sector y su correlación con la geología del yacimiento permite tener un concepto más amplio de los posibles factores geológicos y geometalúrgicos que pudieran controlar la recuperación de Molibdeno.

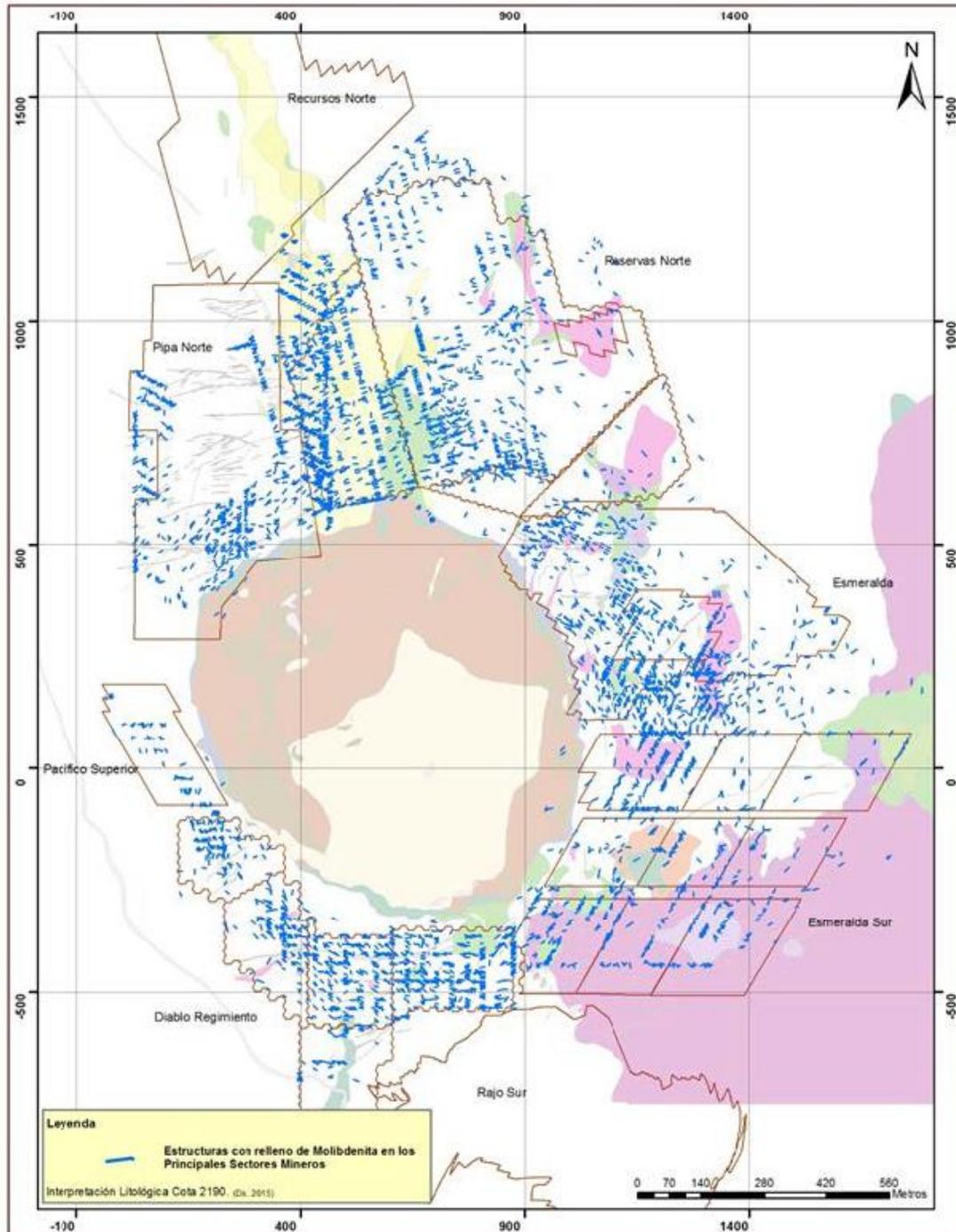


Figura 4.12: Ubicación de los principales sectores mineros en El Teniente y sus estructuras asociadas con presencia de Molibdenita. Cortesía de Codelco, división El Teniente. Informe N°1-003-2017, Garrido, 2017.

Sector de Reservas Norte (RENO)

La Molibdenita se encuentra principalmente asociada a vetillas HT y fallas tardías con presencia de cuarzo, carbonatos y anhidrita, con orientación principal E-W. En menor proporción se observan Vetillas TM tipo V5, asociadas a cuarzo masivo, anhidrita y calcopirita.

Sector Esmeralda

Las principales estructuras que presentan contenido de Molibdenita son estructuras HT asociadas a carbonatos y sulfatos. De estas estructuras destacan la Falla B, una estructura de rumbo NW con un espesor que varía de 1 a 10 cm y que se ubica al este del yacimiento, en la zona norte del Sector Esmeralda.

También se encuentran en menor proporción vetillas TM con relleno de Molibdenita, asociadas a cuarzo, anhidrita y sulfuros de cobre. Vetillas HP con presencia de Molibdenita son muy escasas.

Sector Pipa Norte

La Molibdenita se encuentra casi en su totalidad asociada a estructuras HT como fallas y vetillas con relleno de anhidrita, cuarzo, carbonatos y trazas de calcopirita. Estas estructuras presentan una orientación preferencial ESE-WNW.

Sector Dacita

Son vetillas HT y fallas tardías en donde se concentra principalmente la Molibdenita en este sector, éstas presentan una orientación predominante NE y se encuentran asociadas con anhidrita, yeso y bornita.

Sector Diablo Regimiento

En este sector, si bien la Molibdenita se encuentra mayoritariamente en las vetillas HT asociadas con anhidrita, carbonatos, tennantita y yeso. También se puede encontrar en vetillas HP en asociación con calcopirita, pirita y cuarzo y vetillas TM con cuarzo y menor calcopirita. Todas las estructuras presentan una orientación preferencial NW. Se reconoce también la presencia de Molibdenita asociada a la matriz de la Brecha de Turmalina.

Sector Pacífico Superior

Se encuentra al oeste del Complejo de Brechas Braden, se tiene escasos registros de la caracterización de estructuras del Sector, pero en su mayoría la Molibdenita se presenta en vetillas HT asociadas con cuarzo, calcopirita y yeso. De manera más escasa se encuentran vetillas TM con baja presencia de Molibdenita. También se encuentra en la matriz de Brecha de Turmalina y el margen del Complejo de Brechas Braden.

4.2 BASE DE DATOS

Para desarrollar las hipótesis del trabajo, seleccionar muestras para realizar estudios de mineralogía geoquímicos y geometalúrgicos, contrastar los registros de los estudios con los presentes en los informes realizados previamente, realizar análisis estadísticos de la información disponible y facilitar la búsqueda y visualización de los datos requeridos, se desarrolló una serie de bases de datos. Éstas presentan información de un total de 1254 muestras a las cuales se les realizaron estudios de flotación rougher (o flotación primaria), estudios geoquímicos y estudios mineralógicos. Tan solo 708 muestras contienen información de ensayos de flotación rougher, los que fueron desarrollados en condiciones alcalinas de primera limpieza (en ocasiones se realizó una segunda limpieza) con un PH de 9,5 y un tiempo de flotación de 12 minutos. Los ensayos geoquímico-metalúrgicos se realizaron para las muestras de cabeza, de concentrado y de relave luego del ensayo de flotación. La caracterización mineralógica se realizó mediante estudios de microscopía óptica y de mineralogía QEMSCAN. Todos los estudios se realizaron en laboratorios especializados (SGS, SIP-DET, CIMM, ASMIN, GDA).

Todas las muestras dispuestas en el sistema de bases de datos tienen registrado su sondaje de origen y el metraje del sondaje de donde ésta fue seleccionada. Las muestras además tienen registro de la litología a la que éstas pertenecen, corresponden a 1042 muestras provenientes del Complejo máfico El Teniente (CMET), 79 muestras correspondientes a Tonalita, 56 muestras corresponden a los Pórfidos dacíticos, 38 muestras pertenecen a los Pórfidos dioríticos, 38 muestras son correspondientes a la Brecha de anhidrita, 11 pertenecen a la Brecha de cuarzo, 26 muestras son de la Brecha pórfido dacítica, 11 corresponden al Complejo de Brechas Braden, 10 son parte de la Brecha pórfido diorítica, 37 corresponden a otros tipos de brecha y 20 abarcan a más de una litología.

Para las diferentes bases de datos se realizaron diversos filtros de la información contenida. Se filtraron los datos de las muestras cuya ubicación en el yacimiento no se encontraba registrada, se filtraron las muestras cuyo metraje era superior a 12 metros, se filtraron las muestras cuya información no hace lógica con la realidad (por ejemplo si el contenido de molibdeno no sulfurado es mayor al molibdeno total), se filtraron las muestras pertenecientes a la cavidad y las muestras no pertenecientes al yacimiento, entre otros criterios. Para determinadas bases de datos se filtraron las muestras que no registraban datos concisos de Ley de Mo, también se eliminó la información si los registros del porcentaje de Mo no sulfurado no eran precisos.

Además del sondaje de origen, ubicación y litología de las muestras la información esencial que se dispone en las bases de datos es la Ley de Cobre y Ley de Molibdeno; la recuperación de Cobre; la recuperación de Molibdeno; el porcentaje de Molibdeno para muestras de concentrado y relave; el porcentaje de Molibdeno no sulfurado para muestras de cabeza, concentrado y relave; el factor K de Molibdeno; y el porcentaje de cada mineral que contiene Molibdeno en la muestra de roca (Molibdenita, Powellita, Scheelita). En determinadas bases de datos se detalla el grado y tipo de alteración de la roca presente en la muestra, su zona geotécnica y su cercanía con otras litologías.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Una vez organizados los datos en la serie de bases de datos se procedió a realizar diversos análisis estadísticos con el objetivo de encontrar patrones, distribuciones, aproximaciones y correlaciones que permitan comprender de mejor manera el comportamiento del molibdeno en el yacimiento del punto de vista geológico y metalúrgico además de proporcionar información que permita adecuar el criterio de selección para las muestras de roca que se someterán a estudios posteriores.

4.3.1 Distribución de la Ley de Molibdeno

Se realizó la función densidad de probabilidad para conocer la media, la varianza y la distribución de la Ley de Mo para las muestras presentes en la base de datos. Un total de 1254 muestras presentan datos de Ley de Mo las cuales fueron usadas para observar su distribución. En un principio se obtuvo la media y la varianza de la Ley de Mo las cuales se pueden ver en la Tabla 4.3. Se realizó un ajuste de distribución Log-Normal para observar la distribución de la Ley de las muestras, debido a que las leyes en un yacimiento suelen presentar esa distribución. Se obtiene una media de -4,48 para el Logaritmo natural del Mo y una desviación estándar de 0,95, con estas variables se construye el ajuste Log-Normal de la distribución de las Leyes de Mo, el cual puede observarse en el Gráfico 4.1.

Tabla 4.3: Parámetros Estadísticos de la Ley de Mo

1er Cuartil	0.005
2ndo Cuartil	0.013
3er Cuartil	0.024
Media	0.021
Desviación estándar	0.033
Varianza	0.001

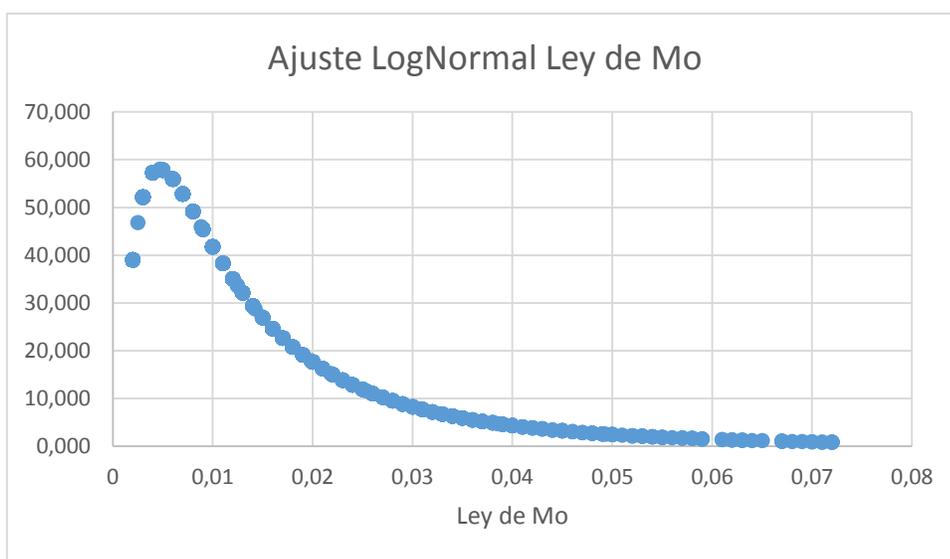


Gráfico 4.1: Densidad de probabilidad con distribución Log-Normal para las Leyes de Mo

4.3.1.1 Histograma de la Ley de Molibdeno

Los histogramas también son útiles para facilitar la visualización de la distribución de las muestras de la Ley de Molibdeno. Para realizar el Histograma se consideraron las muestras con una Ley menor de 0,1, donde 39 muestras presentan datos que superan a este valor como se puede apreciar en el Gráfico 4.2.

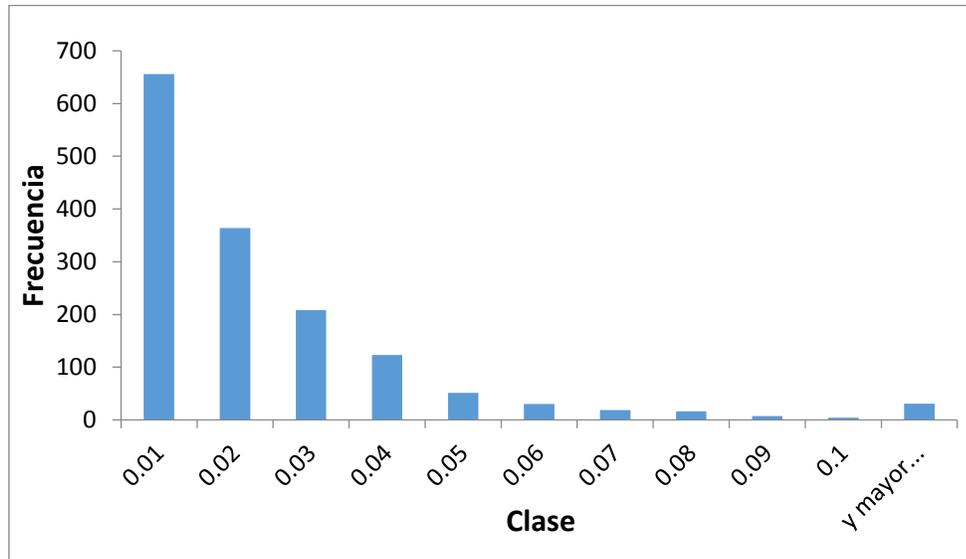


Gráfico 4.2: Histograma de Ley de Mo

4.3.1.2 Ley de Cobre vs Ley de Molibdeno

Una vez realizados los gráficos de distribución e histogramas de las Leyes de Cobre y Molibdeno se realiza un gráfico de dispersión para observar la posibilidad de que estas variables estén correlacionadas, en conjunto con el gráfico se calcula su Coeficiente de correlación de Pearson el cual es de 0.44. El gráfico de distribución e histograma para la Ley de cobre se encuentra en el Anexo A.

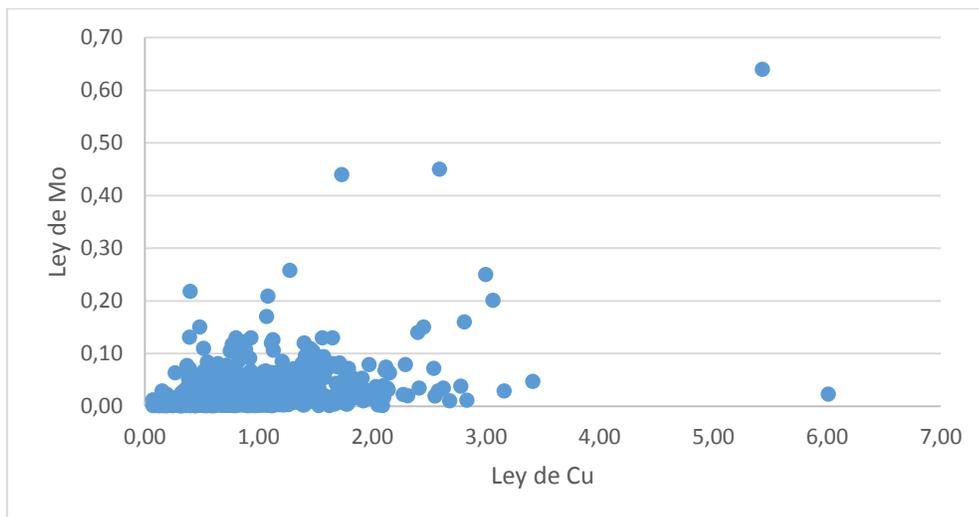


Gráfico 4.3: Dispersión de las Leyes de Cu y Mo de las muestras del yacimiento.

4.3.2 Recuperación de Molibdeno VS Ley de Mo

4.3.2.1 Recuperación y diferencias por Litología

Para tener una idea general de la distribución de la mineralización en el yacimiento El Teniente y su recuperación asociada, se calcula el promedio de las leyes y recuperaciones Rougher de Cobre y Molibdeno según la litología asociada de la muestras de la base de datos. No se consideran las muestras a las que se le asocia más de una litología, ni las litologías que presentan menos de 10 muestras. Esta información resultará útil para cumplir mejorar la planificación respecto a la recuperación de Mo en sectores claves del yacimiento. Los datos de los promedios pueden verse en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valores promedio de Ley y Recuperación Rougher de Cu y Mo para la litología respectiva.

Unidad Litológica	%Cu_Cab	%Rec Cu	%Mo_Cab	%Rec Mo
CMET	0.820	93.46	0.019	76.21
TO	0.683	92.89	0.010	73.88
PDA	0.828	92.22	0.014	75.66
PDI	1.106	95.55	0.033	81.85
BXIPDA	0.990	83.92	0.010	71.44
BXIPDI	1.489	96.99	0.075	82.20
BXANH	1.203	95.63	0.033	81.33
BXQZ	1.494	95.18	0.047	85.31
BXSU	2.211	91.42	0.021	80.65
BXTU	0.953	92.58	0.041	65.85
BB	0.521	88.64	0.016	48.10
CBB	0.644	68.85	0.039	42.54
Total	0.846	93.17	0.021	75.99

4.3.2.2 Diagrama Box Plot para la Recuperación y Ley de Molibdeno

Los diagramas de Box Plot, también conocidos como diagramas de Caja y Bigotes, permiten visualizar de manera sencilla no solo la mediana de los datos de una variable para diferentes agrupaciones, sino también los valores de sus cuartiles y sus valores máximos y mínimos. Se calcularon estos valores para los datos muestras con información registrada de Recuperación de Molibdeno, también se calcularon para los datos de Ley de Molibdeno de las mismas muestras, estos valores se encuentran en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 respectivamente. Posteriormente se procedió a graficar los diagramas de Caja y Bigotes para la Recuperación de Mo Rougher y para la Ley de Molibdeno en base a la información contenida en las tablas.

Tabla 4.5: Parámetros estadísticos de Recuperación de Mo según litología

Litología	BXANH	BXIPDA	CMET	PDA	PDI	TO
Valor mínimo	55.27	36.31	17.00	11.64	42.77	37.15
1er Cuartil	75.42	61.99	71.10	71.91	80.91	65.87
Mediana	82.72	72.39	80.62	79.78	82.98	76.77
3er Cuartil	86.71	82.66	85.72	85.77	88.15	83.06
Valor máximo	93.85	95.41	97.16	97.15	92.40	92.90

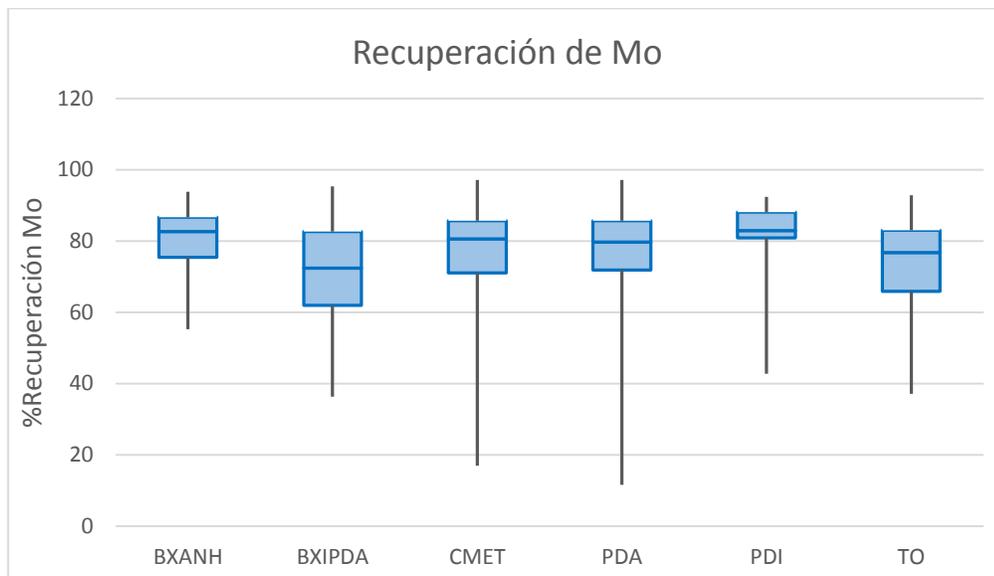


Gráfico 4.4: Diagrama Box Plot para la Recuperación de Mo según Litología

Tabla 4.6: Parámetros estadísticos de Ley de Mo según litología

Litología	BXANH	BXIPDA	CMET	PDA	PDI	TO
Valor mínimo	0.005	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002
1er Cuartil	0.015	0.005	0.008	0.007	0.018	0.006
Mediana	0.025	0.007	0.016	0.011	0.024	0.010
3er Cuartil	0.037	0.014	0.024	0.018	0.039	0.018
Valor máximo	0.120	0.034	0.440	0.045	0.150	0.067

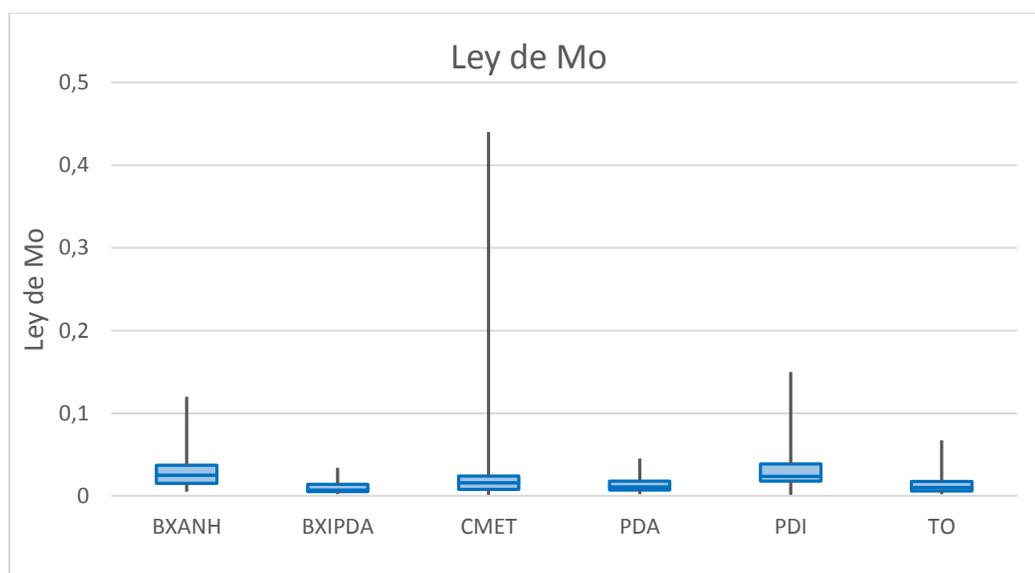


Gráfico 4.5: Diagrama Box Plot para la Ley de Mo según Litología

4.3.2.3 Gráficos Ley vs Recuperación de Molibdeno

Puesto que en el procesamiento mineral se busca obtener la máxima recuperación posible del material extraído cuya la Ley sea alta, al realizar una comparativa entre la Ley del Molibdeno junto con su recuperación permitirá evaluar de los datos cuando la recuperación del mineral es baja, dependiendo si esto sucede generalmente cuando la Ley es más alta o más baja.

Las muestras que contienen información tanto como de la Ley de Mo y la Recuperación de Mo son 711. Para conocer la relación entre ambos parámetros geometalúrgicos, en primer lugar se obtiene el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables el cual es de 0,394. Como el coeficiente de correlación es una medida de relación lineal se deben realizar otro tipo de modelos para determinar la regresión con el mejor coeficiente de determinación, es decir que mejor se ajuste a los resultados. La regresión logarítmica resulta ser la que maximiza el coeficiente de correlación y su modelo se puede ver en el Gráfico 4.6.

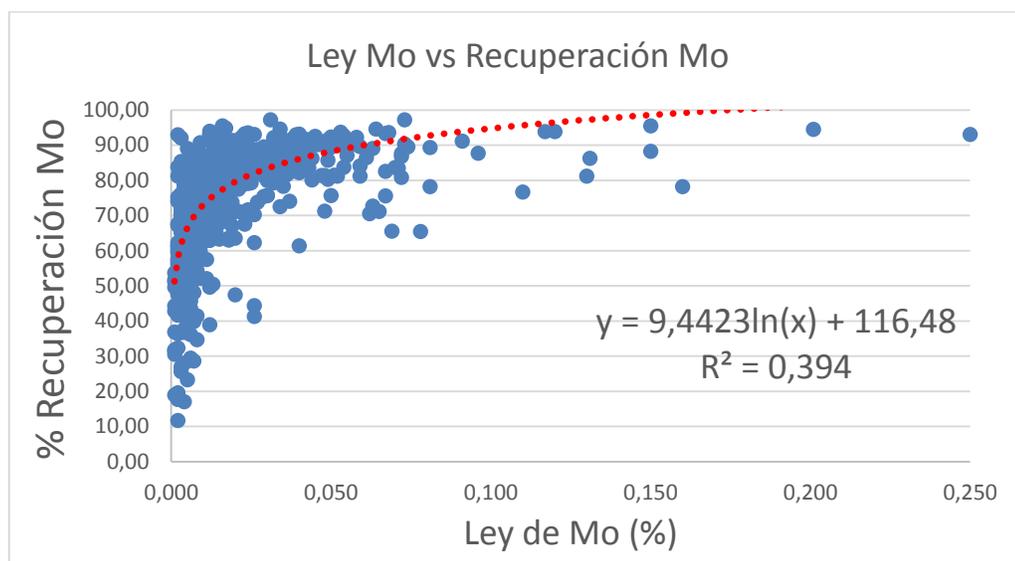


Gráfico 4.6: Dispersión Ley de Mo vs Recuperación Rougher de Mo con ajuste logarítmico

Puesto que una regresión con un coeficiente R^2 con un valor de 0,39 no muestra una gran representatividad de la distribución de los datos, se agruparon los datos por litología para determinar su ajuste logarítmico respectivo con el objetivo de mejorar los modelos de regresión (se realizaron diversos modelos, y el modelo logarítmico presentó los mejores coeficientes de ajuste). Las muestras que no presentaron más de 10 datos por litología fueron omitidas.

Tabla 4.7: Características de las regresiones logarítmicas de los gráficos de Ley Mo vs Rec Mo por litología

Litología	N° de datos	Factor R ²
CMET	486	0.394
TO	41	0.190
PDI	22	0.649
PDA	38	0.626
BXIPDA	25	0.686
BXANH	32	0.180

Las regresiones logarítmicas fueron expuestas en un mismo gráfico, el cual corresponde al Gráfico 4.7, para poder realizar una comparativa entre éstas para cada litología. Puesto que el coeficiente de determinación para el modelo de la distribución de las muestras correspondientes a la Brecha de Anhidrita es muy bajo (0,18), éste fue omitido en el gráfico.

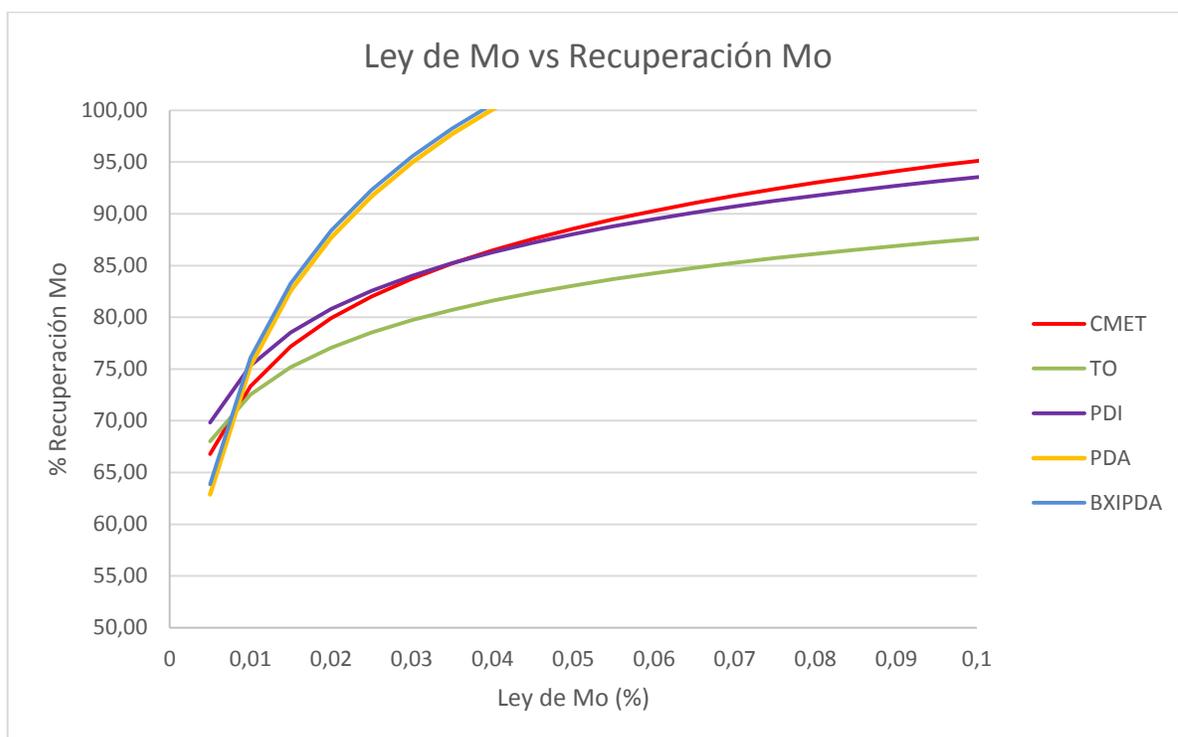


Gráfico 4.7: Regresiones logarítmicas de Ley de Mo vs Recuperación de Mo para cada litología

4.3.3 Recuperación de Molibdeno VS Factor K

El Factor K como se puede observar en la Ecuación 3, corresponde a la cantidad normalizada de Molibdeno no sulfurado en relación al Molibdeno total. Puesto que el Molibdeno no Sulfurado tiende a decantar en el proceso de flotación y por ende no se recupera, resulta directo suponer que el Factor K y la Recuperación de Molibdeno en Flotación Rougher se encuentran fuertemente correlacionados de manera negativa. Una vez realizado el análisis de correlación sobre las 468 muestras de la base de datos que contienen registros concisos de su Factor K y su Recuperación de Molibdeno en flotación Rougher, se obtuvo un factor de correlación de -0,65 lo que indica que estas variables sí presentan un correlación negativa importante.

Como el factor de correlación únicamente indica la relación lineal entre 2 variables, se realizaron diversas regresiones con el objetivo de encontrar el modelo que mejor describe la relación existente entre ambas variables. Sin tomar en cuenta las regresiones polinómicas de órdenes muy altos (debido a lo improbable que éstas otorguen una regla general para modelar variables con una alta desviación estándar como el Factor K y la Recuperación de Mo), la regresión exponencial otorga el mejor ajuste de mínimos cuadrados para relacionar el Factor K con la Recuperación de Mo.

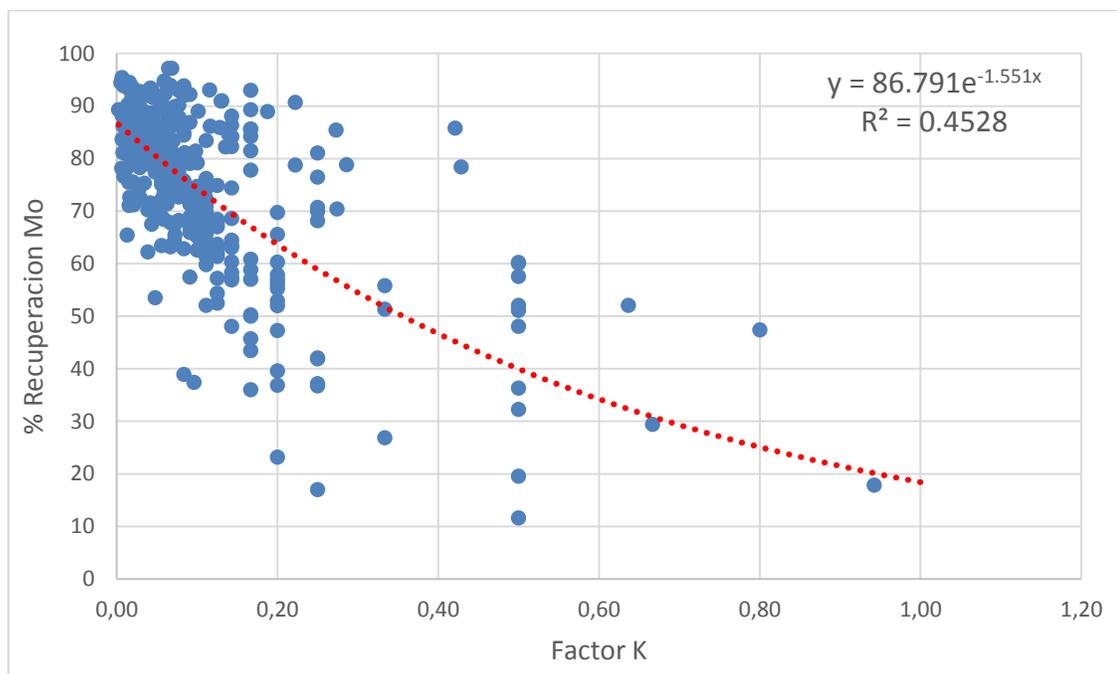


Gráfico 4.8: Distribución de Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial

A pesar de que se puede apreciar una tendencia en el gráfico, el valor R^2 de 0,45 indica que la regresión exponencial no es del todo representativa de la distribución de los datos. Esto muestra que existen más factores que controlan la recuperación de Molibdeno además del Factor K. Uno de estos factores es la litología a la cual pertenece cada muestra de roca, es por esto que se decidió eliminar este sesgo en la regresión exponencial y por esto se agruparon los datos por su respectiva litología, donde posteriormente se realizó el ajuste exponencial.

En la Tabla 4.8: Factor K vs Rec Mo, parámetros de las regresiones exponenciales según litología se observan el número de datos disponible en la base de datos para realizar las regresiones según litología y el factor R^2 asignado a cada regresión exponencial. Las unidades litológicas cuya cantidad de muestras con información registrada de su Factor K y Recuperación de Molibdeno, fuera menor a 10 no fueron consideradas. En anexos en los Gráfico 9.7 al Gráfico 9.14 se observan las regresiones exponenciales hechas para las muestras de cada litología respectiva.

Tabla 4.8: Factor K vs Rec Mo, parámetros de las regresiones exponenciales según litología

Litología	N° de Datos	Factor R^2
CMET	324	0.429
PDA	24	0.614
BXIPDA	11	0.546
TO	28	0.798
PDI	17	0.287
BXANH	30	0.043
Otras Brechas Ígneas	15	0.789
Otras Brechas Hidrotermales	17	0.566

Las Brechas Ígneas abarcan las litologías de Brecha Ígnea de Tonalita y Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico, Brecha Ígnea de Pórfido Microdiorítico y Brecha Ígnea de CMET, la Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico no fue considerada en este grupo ya que existen muestras suficientes como para tener su representación gráfica independiente. Las Brechas Hidrotermales comprenden las Brechas de Turmalina, las Brechas de Sulfuros, las Brechas de Cuarzo y las Brechas de Clorita, las Brechas de Anhidrita presentan muestras suficientes para tener su propio gráfico, por lo que no fueron incluidas en este grupo.

Una vez realizados los gráficos recopilamos las ecuaciones que definen las curvas de regresión que mejor se ajustaban a los datos y se proyectaron en un solo gráfico para compararlas. Puesto que la curva exponencial de las muestras de Brecha de Anhidrita entrega un coeficiente R^2 muy bajo de 0,043, se omitió de la comparación con la demás curvas. El conjunto de brechas restantes también fue excluido de la comparación debido a la alta variedad de litologías que abarca y a un alto sesgo asociado a su alteración. Se estableció un Factor K de 30 como límite del eje horizontal para facilitar la comparación de las curvas dentro de los valores más propensos a ocurrir.

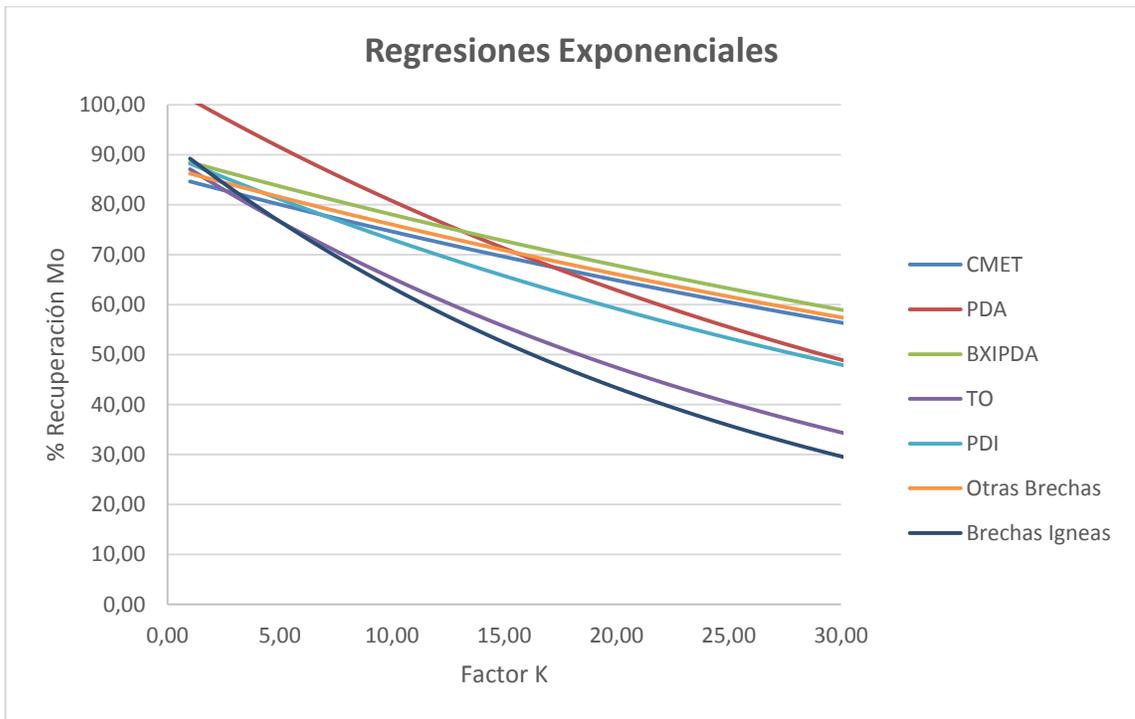


Gráfico 4.9: Ajuste exponencial de la Recuperación de Mo vs Factor K por litología

4.3.4 Correlaciones entre los parámetros

4.3.4.1 Correlaciones entre variables Geometalúrgicas

Para reconocer otras correlaciones lineales entre las variables geometalúrgicas con mayor importancia en la extracción y procesamiento del mineral de Molibdeno se desarrolló una tabla y se calculó el Coeficiente de correlación de Pearson entre cada una de las variables a partir de todos los datos disponibles en la base de datos.

Tabla 4.9: Índices de Correlación Lineal entre los Parámetros Geometalúrgicos

	%Cu_Cab	%Mo_Cab	%Rec_Mo_Ro	%MoNS_Cab	Factor K	%Mo_Conc	%Mo_Rel	Molibdenita
%Cu_Cab	1.000							
%Mo_Cab	0.436	1.000						
%Rec_Mo_Ro	0.302	0.291	1.000					
%MoNS_Cab	-0.085	0.197	-0.185	1.000				
Factor K	-0.298	-0.253	-0.654	0.296	1.000			
%Mo_Conc	0.339	0.951	0.399	0.072	-0.299	1.000		
%Mo_Rel	0.247	0.805	-0.022	0.338	-0.101	0.684	1.000	
Molibdenita_QS	0.314	0.748	0.187	-0.088	-0.186	0.221	0.104	1.000

Con el fin de encontrar correlaciones ocultas debido a que el factor de correlación solo identifica relaciones lineales, se calculó el factor de correlación entre los logaritmos naturales de los parámetros geometalúrgicos previamente estudiados. De esta manera transforman posibles correlaciones polinómicas y potenciales existentes entre las variables y se aproximan a correlaciones lineales.

Tabla 4.10: Índices de Correlación Logarítmica entre los Parámetros Geometalúrgicos

	Ln (%Cu_Cab)	Ln (%Mo_Cab)	Ln (%Rec_Mo)	Ln (%MoNS_Cab)	Ln (Factor K)	Ln (%Mo_Conc)	Ln (%Mo_Rel)	Ln (Molibdenita)
Ln(%Cu_Cab)	1.000							
Ln(%Mo_Cab)	0.496	1.000						
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.384	0.557	1.000					
Ln(%MoNS_Cab)	-0.104	0.350	-0.105	1.000				
Ln(Factor K)	-0.512	-0.818	-0.602	0.253	1.000			
Ln(%Mo_Conc)	0.475	0.949	0.672	0.192	-0.849	1.000		
Ln(%Mo_Rel)	0.367	0.771	0.053	0.315	-0.583	0.659	1.000	
Ln(Molibdenita)	0.377	0.675	0.283	-0.049	-0.279	0.518	0.457	1.000

4.3.4.2 Correlaciones de Variables Geometalúrgicas con la Mineralogía

Puesto que se desean encontrar controles geológicos asociados a los parámetros geoquímicos y geometalúrgicos, la forma de búsqueda más básica de estos controles es el cálculo del Coeficiente de correlación de Pearson entre los parámetros mencionados en la Tabla 4.9 y el porcentaje contenido mineralógico específico para cada mineral presente en la muestra de roca. Estas correlaciones se observan para las muestras de cabeza en la Tabla 4.11 y para muestras de concentrado y relave en la Tabla 4.12.

Tabla 4.11: Correlación lineal de los parámetros Geometalúrgicos principales con la Mineralogía

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Molibdenita_%
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.197	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.291	-0.185	1.000	
Molibdenita_%	0.748	-0.088	0.187	1.000
Cuarzo_%	-0.243	-0.110	-0.112	-0.052
Plagioclasa_%	0.093	0.135	0.294	-0.015
Feldespato_K_%	0.278	0.280	-0.051	0.019
Piroxeno_%	-0.210	-0.308	-0.301	-0.014
Hornblenda	0.329	-	-	0.176
Biotita_%	0.237	0.137	0.290	0.150
Muscovita_Sericita_%	-0.210	-0.307	-0.284	-0.092
Actinolita_%	0.048	0.526	-	-0.109
Tremolita_%	0.418	0.618	-	0.285
Clorita_%	-0.185	0.131	-0.169	-0.188
Epidota_%	-0.002	-0.234	-0.075	0.361
Arcillas_%	-0.046	-0.030	-0.360	0.011
Caolinita_%	-0.194	0.033	-0.475	-0.265
Ilmenita_%	-0.049	-0.094	0.093	-0.044
Calcita_%	0.574	-0.078	0.200	0.070
Anhidrita_Yeso_%	0.331	0.163	0.331	0.113
Turmalina_%	-0.071	0.150	-0.294	-0.159
Pirita_%	-0.361	-0.262	-0.228	-0.186
Pirrotina_%	-0.235	0.462	-0.186	-0.197
Arsenopirita_%	0.445	-	-	0.396
Tetraedrita_%	0.009	-0.054	-0.184	0.016
Tennantita_Enargita_%	0.294	0.058	-0.013	0.119
Scheelita_%	0.151	0.302	-	0.347
Powellita_%	0.812	0.198	-	0.811
Calcopirita_%	0.125	-0.175	0.246	0.375
Bornita_%	0.437	0.053	0.184	0.234
Calcosina_Digenita_%	-0.075	-0.034	-0.065	0.129
Calcosina_Covelina_%	-0.083	0.125	-0.020	-0.089
Covelina_%	-0.043	0.281	-0.131	-0.058

Tabla 4.12: Correlaciones Lineales de la mineralogía con las Leyes de Mo de Concentrado y Relave

	%Mo_Conc	%MoNS_Conc	%Mo_Rel
Plagioclasa_%	0.267	0.000	-0.113
Feldespato_K_%	0.190	0.000	0.299
Cuarzo_%	-0.243	0.000	-0.098
Hornblenda	-	-	-
Piroxeno_%	-0.261	0.000	-0.058
Biotita_%	0.339	0.000	0.098
Muscovita_Sericita_%	-0.307	0.000	-0.075
Clorita_%	-0.211	0.000	-0.032
Actinolita_%	-	-	-
Tremolita_%	-	-	-
Epidota_%	-0.082	0.000	0.003
Caolinita_%	-0.244	0.000	0.087
Arcillas_%	-0.185	-	0.028
Ilmenita_%	-0.011	0.000	-0.085
Calcita_%	0.594	-	0.449
Anhidrita_Yeso_%	0.380	0.000	0.132
Turmalina_%	-0.091	0.000	0.268
Scheelita_%	-	-	-
Arsenopirita_%	-	-	-
Pirita_%	-0.368	0.000	-0.214
Tetraedrita_%	0.014	0.000	0.167
Tennantita_Enargita_%	0.397	0.000	0.165
Pirrotina_%	-0.283	0.000	-0.119
Molibdenita_%	0.221	0.000	0.104
Powellita_%	-	-	-
Calcosina_Covelina_%	-0.133	-	-0.092
Calcosina_Digenita_%	-0.030	0.000	0.009
Covelina_%	-0.058	0.000	-0.058
Bornita_%	0.464	0.000	0.111
Calcopirita_%	0.067	0.000	0.015

4.3.4.3 Correlaciones de Variables Geometalúrgicas con la Geoquímica

Se obtuvieron también las correlaciones de las variables geometalúrgicas con los datos de la composición geoquímica de las muestras, para determinar si existe una dependencia o relación entre estos parámetros con los elementos mayores o elementos trazas presentes en las rocas del yacimiento.

Tabla 4.13: Correlación lineal de la Geoquímica con los parámetros Geometalúrgicos Principales

	%Cu_Cab	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Fe_Cab	-0.204	-0.282	-0.046	0.325	-0.188
%S_Cab	0.319	0.128	-0.159	-0.089	0.101
%SiO2_Cab	-0.087	-0.132	0.047	0.052	-0.123
%Al2O3_Cab	-0.222	-0.101	-0.018	0.020	-0.095
%FeO_Cab	-0.257	-0.186	-0.177	-0.007	0.000
%Fe2O3_Cab	-0.226	-0.228	-0.032	0.288	-0.236
%CaO_Cab	0.076	0.155	-0.034	-0.283	0.221
%MgO_Cab	-0.068	0.002	0.015	0.022	0.019
%Na2O_Cab	0.107	0.078	-0.047	-0.180	0.152
%K2O_Cab	0.047	0.139	0.175	-0.035	0.001
%TiO2_Cab	-0.115	0.023	0.065	0.071	0.059
%MnO_Cab	-0.343	-0.069	0.166	0.189	-0.237
%P2O5_Cab	-0.117	-0.084	0.035	0.084	0.021
%CO2_Cab	-0.134	0.862	-0.153	-0.288	-
As_Cab	0.169	0.177	-0.023	-0.154	-0.038
Mn_Cab	-0.253	-0.047	-	-	-0.628
Ni_Cab	-0.100	-0.074	0.071	0.227	-0.051
Pb_Cab	-0.003	0.032	0.061	0.005	-0.148
Re_Cab	-0.023	0.673	-	-	0.733
Cr_Cab	-0.092	-0.161	0.362	0.156	-0.233
Co_Cab	-0.163	-0.214	-0.255	-0.028	-0.071

4.3.5 Correlaciones entre los parámetros Geometalúrgicos y la Alteración

Se realizó una nueva base de datos a partir del listado de sondajes a los que pertenecen las muestras de la primera base de datos. Con este listado se obtuvieron los registros del tipo y grado de alteración de los sondajes por tramo, los tipos de alteración registrada se encuentran descritos en el marco geológico y corresponden a la alteración Pre Tardimagmática, la alteración Tardimagmática, la alteración Hidrotermal Principal y la Alteración Hidrotermal Tardía. Luego se procedió a encontrar el o los tramos de sondaje los cuales coinciden con la ubicación de las muestras con registros de parámetros geometalúrgicos, geoquímicos y mineralógicos de la primera base de datos. Esto se realizó con el propósito de determinar si existen correlaciones entre estos parámetros y las condiciones de alteración en las que se encuentra la roca. En total la base de datos de alteración se compone de los datos de 728 muestras los que a lo menos contienen registros de la Ley de Molibdeno de la muestra y de la Alteración de la roca.

Es importante mencionar que el mapeo de alteraciones en El Teniente es relativamente nuevo y existe un sesgo relacionado a la persona que efectuó el mapeo. También, si bien es posible correlacionar los porcentajes y tipos de alteraciones con las variables geometalúrgicas de las muestras, no se encuentra registrado en qué tipo de alteración se encuentra la mineralización y ley detallada en la información de la muestra, tan solo el porcentaje de cada tipo de alteración se encuentra en el tramo de muestra.

En primer lugar se calcularon los Coeficientes de Correlación de Pearson entre las variables Geometalúrgicas de interés y los porcentajes de alteración, para todas las muestras de la base de datos de alteración, estos resultados se exponen en la Tabla 4.14. Se calcularon también el factor $f(HP)$ y $f(HT)$ que corresponde al porcentaje de alteración Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía respecto al total de alteración hidrotermal presente en la roca. Para estos factores también se obtuvieron los Coeficientes de Correlación para obtener una comparación entre los 2 diferentes eventos de alteración hidrotermal del yacimiento y su influencia.

Tabla 4.14: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K
%PreTM	-0.040	0.177	0.145
%TM	-0.011	-0.140	-0.127
%HP	-0.056	-0.065	0.212
%HT	0.049	0.200	-0.019
f(HP)	-0.142	-0.158	0.171
f(HT)	0.142	0.158	-0.171

A su vez se calcularon las correlaciones aplicando logaritmo a los datos para encontrar correlaciones ocultas o no lineales.

Tabla 4.15: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)
Ln(%PreTM)	-0.053	0.343	0.491
Ln(%TM)	-0.069	-0.095	0.102
Ln(%HP)	-0.151	-0.068	0.091
Ln(%HT)	-0.096	0.274	0.107
Ln[f(HP)]	-0.091	-0.101	0.154
Ln[f(HT)]	0.113	0.168	-0.045

Debido a que tanto en la Tabla 4.14 como en la Tabla 4.15 no se apreció ninguna correlación importante entre el grado de alteración y las variables geometalúrgicas, se realizaron segregaciones por litología en búsqueda de un mayor Coeficiente de Correlación. A la vez se promediaron los datos de alteración para visualizar de manera más sencilla el tipo y grado de alteración promedio presente en cada litología, esta información se encuentra expuesta en el Gráfico 4.10. Solo se consideraron litologías que presentaran más de 10 datos de alteración entre sus muestras.

Tabla 4.16: Porcentaje de Alteración según litología de las muestras

Litología	N° de Muestras	Pre TM	TM	HP	HT
CMET	560	0.7	86.5	6.2	6.7
PDA	20	0.1	78.3	18.3	3.3
PDI	29	0.1	85.2	9.6	5.1
TO	21	0.0	71.9	17.5	10.6
BXIPDI	10	0.0	93.9	3.7	2.4
BXANH	22	0.2	75.1	5.5	19.2
BBS	12	0.0	0.0	0.0	100.0

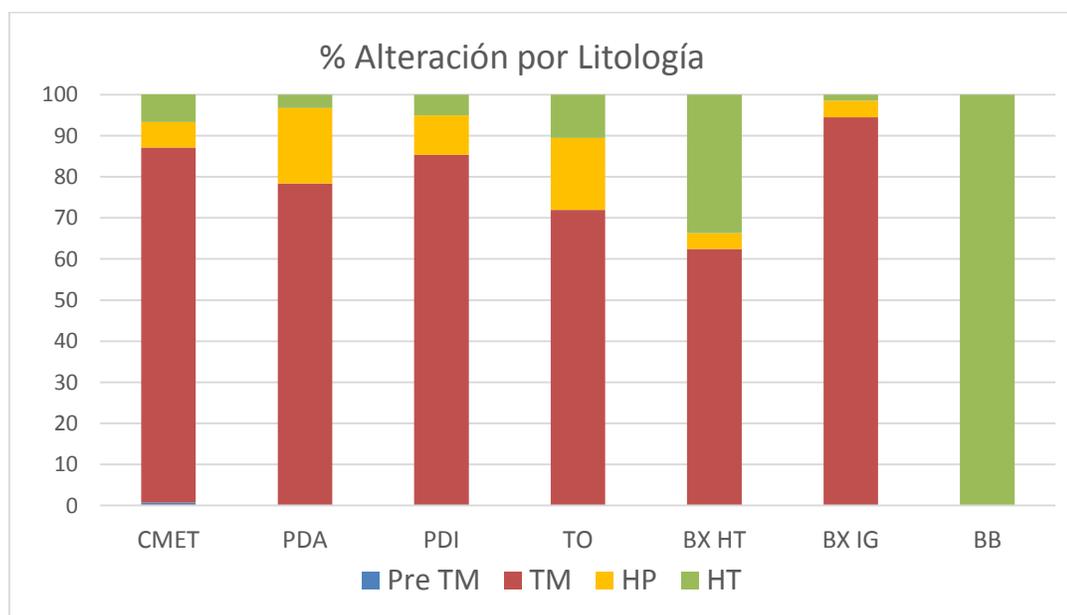


Gráfico 4.10: Gráfico de Barras del tipo de Alteración según la litología correspondiente

4.3.5.1 Alteración en el Complejo Máfico El Teniente

A continuación se muestran las tablas que contienen los coeficientes de correlación lineales entre las variables geometalúrgicas de interés y el porcentaje de alteración presente en el CMET.

Tabla 4.17: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.251	1.000		
Factor K	-0.368	0.491	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.419	-0.007	-0.603	1.000
PreTM	0.005	0.248	0.153	0.078
TM	0.012	-0.078	-0.011	0.154
HP	-0.099	-0.109	0.001	-0.199
HT	0.065	0.154	-0.009	-0.060
f(HP)	-0.206	-0.219	0.140	-0.193
f(HT)	0.206	0.219	-0.140	0.193

Se realizaron también las mismas correlaciones para las demás litologías presentes en la Tabla 4.16. Los resultados de estas correlaciones pueden observarse en las tablas a continuación.

4.3.5.2 Alteración en la Tonalita

Tabla 4.18: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Tonalita

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.000	1.000		
Factor K	-0.757	0.000	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.610	0.000	-0.919	1.000
PreTM	-	-	-	-
TM	-0.335	0.000	0.194	-0.100
HP	-0.377	0.000	0.193	-0.276
HT	0.706	0.000	-0.387	0.332
f(HP)	-0.660	0.000	0.453	-0.438
f(HT)	0.660	0.000	-0.453	0.438

4.3.5.3 Alteración en el Pórfido Dacítico

Tabla 4.19: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido dacítico

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.000	1.000		
Factor K	-0.738	0.000	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.781	-	-0.866	1.000
PreTM	-0.162	0.000	-0.112	-0.071
TM	0.474	0.000	-0.766	0.606
HP	-0.479	0.000	0.778	-0.608
HT	0.148	0.000	-0.265	0.400
f(HP)	-0.370	0.000	0.417	-0.287
f(HT)	0.370	0.000	-0.417	0.287

4.3.5.4 Alteración Pórfido diorítico

Tabla 4.20: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido diorítico

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.000	1.000		
Factor K	-0.727	0.000	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.355	0.000	-0.753	1.000
PreTM	-0.125	-	-	0.142
TM	-0.390	0.000	0.050	-0.061
HP	0.598	0.000	-0.200	0.262
HT	-0.091	0.000	0.159	-0.198
f(HP)	0.113	0.000	0.119	0.196
f(HT)	-0.113	0.000	-0.119	-0.196

4.3.5.5 Alteración Brecha Ígnea Pórfido Diorítica

Tabla 4.21: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de BXIPDI

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.997	1.000		
Factor K	-0.714	-0.660	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.148	0.188	0.006	1.000
PreTM	-	-	-	-
TM	0.128	0.185	-0.204	0.651
HP	-0.043	-0.063	0.260	-0.843
HT	-0.233	-0.333	-0.093	0.097
f(HP)	0.448	0.457	-0.152	-0.640
f(HT)	-0.448	-0.457	0.152	0.640

4.3.5.6 Alteración Brecha de Anhidrita

Tabla 4.22: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Brecha de Anhidrita

	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.643	1.000		
Factor K	-0.296	0.340	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.463	-0.081	-0.679	1.000
PreTM	-0.100	-	-	0.044
TM	-0.149	-0.852	-0.267	0.278
HP	-0.212	-0.307	-0.066	-0.052
HT	0.219	0.944	0.283	-0.248
f(HP)	-0.265	-0.533	-0.098	-0.068
f(HT)	0.265	0.533	0.098	0.068

4.4 SECTORIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

4.4.1 Segregación del Complejo Máfico El Teniente por ubicación en el yacimiento

Se puede observar en la tabla 19 que de las 728 muestras que presentan información sobre la alteración del yacimiento, el 77% tienen como litología correspondiente al Complejo Máfico El Teniente. Además estas muestras se encuentran distribuidas por todo el yacimiento, en todos los sectores de la mina, como se aprecia en la Figura 4.13. Por ende es natural que la varianza de los datos presentes sea alta, así como que los coeficientes de correlación sean cercanos a 0. Es por esto que una de las segregaciones más importantes que se realizó, fue segregar las muestras pertenecientes al CMET fue por su ubicación en el yacimiento, donde el factor para determinar los diferentes grupos de Complejo Máfico El Teniente, fue la cercanía de las muestras a los pórfidos y brechas del yacimiento. De acuerdo a los diferentes sectores definidos de muestras se pudieron realizar la diferentes correlaciones entre los datos de los parámetros geometalúrgicos y geológicos para diferentes agrupaciones, como se observa en la Figura 4.14.

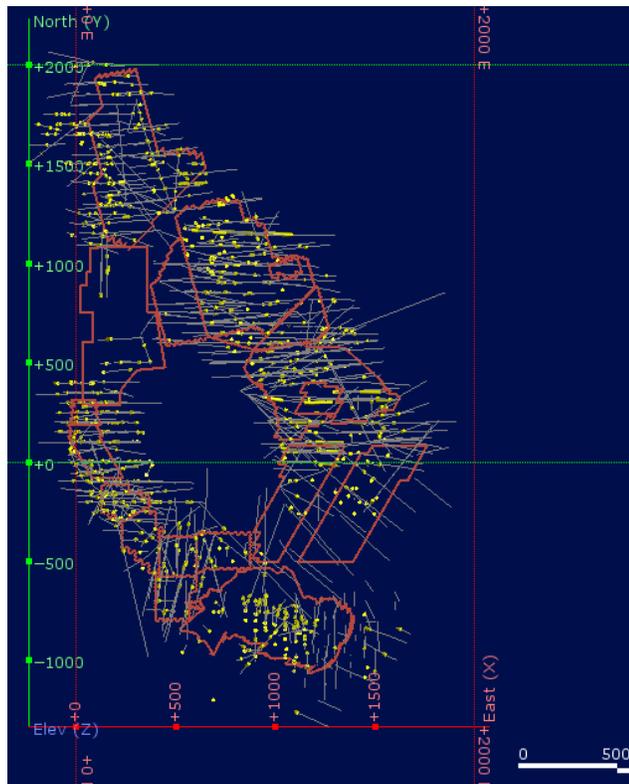


Figura 4.13: Distribución de las muestras de CMET en el Yacimiento El Teniente

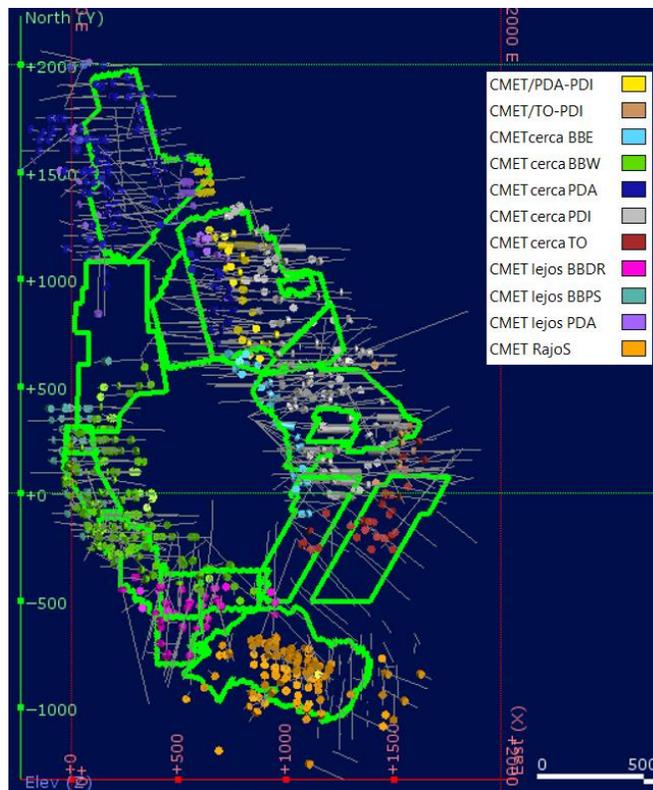


Figura 4.14: Agrupaciones de las muestras de CMET de acuerdo a su distribución en el yacimiento y la cercanía con las otras litologías

4.4.1.1 CMET relacionado al Pórfido Dacítico

Se agruparon las muestras de CMET que estuvieran cercanas al Pórfido Dacítico de orientación NS el cual se ubica al norte de la Pipa Braden, también se incluyeron las muestras cercanas a las Brechas Ígneas de Pórfido Dacítico debido a la proximidad de estas Brechas al PDA.

Tabla 4.23: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al PDA

PDA	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1.000				
%MoNS_Cab	0.041	1.000			
Factor K	-0.189	0.791	1.000		
% Rec Mo	0.354	-0.419	-0.811	1.000	
Molibdenita_%	-0.013	-0.182	-0.142	0.166	1.000
PreTM	-0.132	0.435	0.351	-0.060	0.419
TM	0.127	0.015	0.047	0.040	0.140
HP	-0.130	-0.035	-0.077	0.016	-0.217
HT	-0.012	-0.041	-0.044	-0.198	-0.091
f(HP)	-0.312	0.135	0.136	-0.084	0.088
f(HT)	0.312	-0.135	-0.136	0.084	-0.088

4.4.1.2 CMET relacionado a los Pórfidos Dioríticos

Se agruparon las muestras de CMET cuya ubicación fuera relativamente cercana a la sucesión de Pórfidos dioríticos y Brechas Ígneas de Pórfido Diorita, los cuales se distribuyen al este de la Pipa Braden en la zona oriental del yacimiento.

Tabla 4.24: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al PDI

PDI	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1.000				
%MoNS_Cab	0.247	1.000			
Factor K	-0.680	-0.027	1.000		
% Rec Mo	0.657	0.000	-0.844	1.000	
Molibdenita_%	0.571	-	-	-0.016	1.000
PreTM	-0.002	-0.034	0.364	0.161	-0.302
TM	-0.004	0.087	-0.031	-0.088	0.322
HP	-0.060	-0.061	0.052	-0.090	-0.388
HT	0.126	-0.057	-0.128	0.113	0.073
f(HP)	-0.269	0.179	0.411	-0.350	-0.456
f(HT)	0.269	-0.179	-0.411	0.350	0.456

4.4.1.3 CMET relacionado a la Tonalita Sewell

La Tonalita Sewell corresponde a uno de los primeros eventos intrusivos del yacimiento, por ende la influencia que ésta debe tener sobre la variación composicional de la roca cercana debe ser importante y pudiera o no influir en el comportamiento de la alteración y mineralización posterior. Se realizó entonces una agrupación de muestras correspondientes al CMET que estuvieran en las cercanías de la Tonalita Sewell ubicada al sureste del yacimiento.

Tabla 4.25: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas a la Tonalita Sewell

TO	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1.000				
%MoNS_Cab	0.000	1.000			
Factor K	-0.621	0.000	1.000		
% Rec Mo	0.341	0.000	-0.841	1.000	
Molibdenita_%	0.832	-	-	0.507	1.000
PreTM	-0.183	0.000	0.419	-0.347	-0.227
TM	-0.275	0.000	0.285	-0.289	-0.308
HP	-0.258	0.000	0.162	-0.248	0.450
HT	0.496	0.000	-0.442	0.477	-0.030
f(HP)	-0.586	0.000	0.539	-0.537	0.317
f(HT)	0.586	0.000	-0.539	0.537	-0.317

4.4.1.4 CMET relacionado a la Brecha Braden

El Complejo de Brechas Braden se encuentra en el centro del yacimiento El Teniente y tiene la forma de un cono invertido, éste corresponde al sector de menor mineralización del yacimiento, sin embargo presenta un halo de brechas y vetillas en su exterior que corresponden a una de las zonas con mayor concentración de minerales de mena del yacimiento. En particular el borde de la Pipa Braden presenta gran abundancia de Molibdeno, el cual se encuentra dentro de la matriz de las brechas y rellenando vetillas.

La primera agrupación asociada a al Complejo de Brechas Braden se conformó por las muestras cercanas al borde de la Pipa, principalmente cercanas a la Brecha Marginal.

Tabla 4.26: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET cercanas al CBB

BB	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1,000				
%MoNS_Cab	0,605	1,000			
Factor K	-0,287	0,386	1,000		
% Rec Mo	0,485	0,268	-0,562	1,000	
Molibdenita_%	0,891	0,000	-0,904	0,435	1,000
PreTM	0,115	0,275	0,167	0,222	0,150
TM	-0,098	-0,069	0,034	0,221	-0,055
HP	-0,014	-0,206	-0,188	-0,328	-0,089
HT	0,112	0,137	0,025	-0,055	0,102
f(HP)	-0,119	-0,334	-0,055	-0,409	-0,193
f(HT)	0,119	0,334	0,055	0,409	0,193

Debido a que la Pipa Braden se encuentra situada en el centro del yacimiento, existen numerosas diferencias entre las asociaciones geoquímicas, alteraciones y relaciones con brechas e intrusivos para muestras correspondientes al CMET. En general estas muestras pueden separarse en 2 grandes sectores dentro del yacimiento, uno en el borde suroeste de la Pipa Braden donde existe una mayor interacción con las Brechas Hidrotermales, y el otro en el borde este donde hay una importante influencia de la intrusión de los principales intrusivos félsicos en el CMET.

Tabla 4.27: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET al oeste del CBB

CBB Oeste	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1,000				
%MoNS_Cab	0,538	1,000			
Factor K	-0,383	0,375	1,000		
% Rec Mo	0,492	0,355	-0,523	1,000	
Molibdenita_%	0,891	0,000	-0,904	0,435	1,000
PreTM	0,106	0,250	0,165	0,245	0,150
TM	-0,072	0,121	0,129	0,213	-0,055
HP	-0,029	-0,391	-0,306	-0,315	-0,089
HT	0,090	0,017	-0,021	-0,050	0,102
f(HP)	-0,139	-0,567	-0,164	-0,430	-0,193
f(HT)	0,139	0,567	0,164	0,430	0,193

Tabla 4.28: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET al este del CBB

CBB Este	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1,000				
%MoNS_Cab	0,000	1,000			
Factor K	-0,839	0,000	1,000		
% Rec Mo	0,720	0,000	-0,765	1,000	
Molibdenita_%	-	-	-	-	1,000
PreTM	-	-	-	-	-
TM	0,065	0,000	0,033	-0,041	-
HP	-0,156	0,000	0,075	-0,252	-
HT	0,005	0,000	-0,076	0,186	-
f(HP)	-0,034	0,000	0,044	-0,101	-
f(HT)	0,034	0,000	-0,044	0,101	-

4.4.1.5 CMET en el Rajo Sur

El sector Rajo Sur es la zona de mayor cota en el yacimiento El Teniente, las muestras provenientes de este sector presentan principalmente una litología de CMET o Tonalita, sin embargo no todas las muestras de CMET se encuentran cercanas a la Tonalita. Esto sumado al hecho que las ubicaciones de las muestras se encuentran en un sector muy específico dentro de la mina fueron los factores que influyeron para realizar las correlaciones de los parámetros de interés para la agrupación de las muestras de CMET pertenecientes al Rajo Sur.

Tabla 4.29: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET del Rajo Sur

Rajo Sur	Ley de Mo	%MoNS_Cab	Factor K	% Rec Mo	Molibdenita_%
Ley de Mo	1.000				
%MoNS_Cab	-	1.000			
Factor K	-	-	1.000		
% Rec Mo	0.685	-	-	1.000	
Molibdenita_%	0.832	-	-	0.507	1.000
PreTM	-0.316	-	-	-0.703	-0.227
TM	-0.130	-	-	-0.426	-0.308
HP	0.277	-	-	0.025	0.450
HT	-0.075	-	-	0.426	-0.030
f(HP)	0.114	-	-	-0.348	0.317
f(HT)	-0.114	-	-	0.348	-0.317

4.4.2 Segregación por Límite HT_HP

En el sector este del yacimiento El Teniente se encuentra definido, en base al modelo de zonas geotécnicas, un límite que marca el fin del dominio de la alteración Hidrotermal Tardía en la roca (dominio que empieza en la Brecha Braden) y da inicio al dominio de la alteración Hidrotermal Principal. El límite HT_HP fue determinado a partir de los modelos que definieron zonas geotécnicas, estas zonas indican la abundancia y dureza de las vetillas mapeadas en el yacimiento, los cuales son parámetros que se encuentran directamente influenciados por los eventos de alteración en el yacimiento.

Debido a que la alteración Tardímagmática afectó prácticamente de igual manera a todas las rocas del yacimiento, las zonas geotécnicas indican por tanto sectores que marcan la influencia de los diferentes eventos de alteración hidrotermal. De esta manera se separaron las muestras del sector este del yacimiento en 2 grupos, las que pertenecen al dominio Hidrotermal Tardío, y las que pertenecen al dominio Hidrotermal Principal. Este límite solo se aprecia en el sector Noreste de la Pipa Braden en el yacimiento, ya que es el único sector donde se produce un cambio brusco de la calidad geotécnica y la fragmentación entre las 2 zonas geotécnicas.

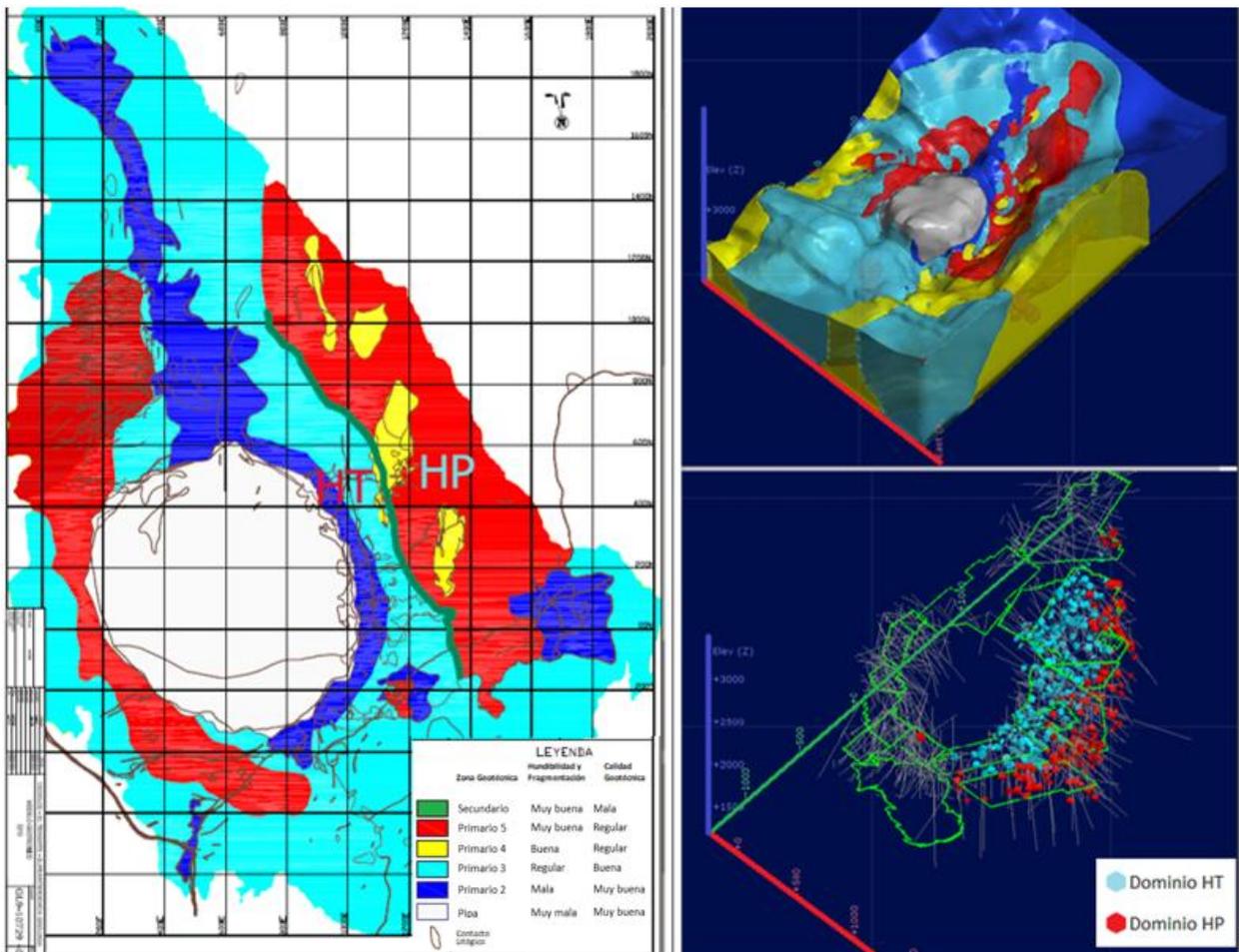


Figura 4.15: Límite HT_HP en el yacimiento

Para comprobar la veracidad del límite HT_HP se compararon las muestras correspondientes a cada dominio hidrotermal con el mapeo de la alteración realizado en los tramos de sondaje de dichas muestras. Los resultados de la comparación pueden observarse en la Tabla 4.30.

Tabla 4.30: Comparación de valores de alteración promedio del Límite HT_HP con el mapeo de alteración

	Lim HP	Lim HT
PreTM	0.27	0.86
TM	82.31	82.53
HP	11.22	5.05
HT	6.22	11.64
f(HP)	0.75	0.39
f(HT)	0.25	0.61

Una vez definidas las muestras según su dominio, se realizaron los cálculos estadísticos para determinar la influencia de este límite en los parámetros geometalúrgicos de interés. Se hicieron cálculos de los promedios de las variables para todas las muestras identificadas dentro de los dominios. Además de realizar los mismos cálculos segregando las muestras de las 3 litologías donde el límite presenta mayor influencia, el Complejo Máfico El Teniente, la Tonalita Sewell y el Pórfido Diorítico.

Tabla 4.31: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP

Todas	Dominio HP	Dominio HT
%Mo_Cab	0.020	0.022
%MoNS_Cab	0.001	0.002
Factor K	0.082	0.066
%Rec_Mo_Ro	72.84	77.51

Tabla 4.32: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de CMET

CMET	Dominio HP	Dominio HT
%Mo_Cab	0.024	0.030
%MoNS_Cab	0.001	0.001
%Rec_Mo_Ro	75.05	83.49

Tabla 4.33: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de TO

TO	Dominio HP	Dominio HT
%Mo_Cab	0.015	0.038
%MoNS_Cab	0.001	0.001
%Rec_Mo_Ro	73.09	81.03

Tabla 4.34: Parámetros Geometalúrgicos de Mo promedio según Límite HT_HP para las muestras de PDI

PDI	Dominio HP	Dominio HT
%Mo_Cab	0.039	0.036
%MoNS_Cab	0.001	0.001
%Rec_Mo_Ro	84.43	83.98

Posteriormente se realizaron las correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos para cada una de las muestras pertenecientes a cada dominio, estas correlaciones se realizaron con el objetivo de observar si existe una mayor influencia de los factores que controlan la recuperación en base al dominio de la alteración hidrotermal del yacimiento. No se encuentran correlaciones importantes entre los parámetros geometalúrgicos y los grados de alteración para cada dominio respectivo, principalmente debido a que cada dominio hidrotermal ya representa una mayor presencia de un determinado evento de alteración.

Tabla 4.35: Correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos para los Dominios Hidrotermales

Dominio HP	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.540	1.000		
Factor K	-0.387	-0.134	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.279	0.073	-0.832	1.000
Dominio HT	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	Factor K	%Rec_Mo_Ro
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	-0.021	1.000		
Factor K	-0.610	0.092	1.000	
%Rec_Mo_Ro	0.460	0.000	-0.711	1.000

4.4.3 Segregación por Zona Geotécnica

Las zonas geotécnicas en el yacimiento se definen de acuerdo a la hundibilidad y fragmentación de la roca y a la calidad geotécnica de la roca, es decir, se clasifican en base a su frecuencia de vetillas y su relleno. Por lo tanto las zonas geotécnicas se encuentran indirectamente relacionadas con la litología de la roca y la alteración, ya que las vetillas de la roca se formaron a partir del emplazamiento de los cuerpos intrusivos y de brecha, los cuales también marcaron los eventos de alteración.

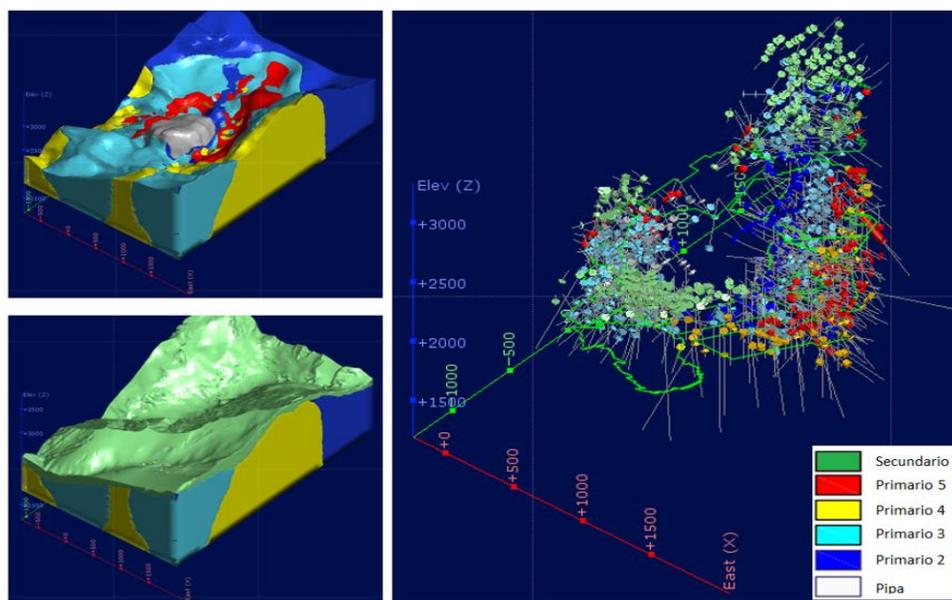


Figura 4.16: Clasificación de las muestras según las zonas geotécnicas

Las características que determinan las zonas geotécnicas, así como la litología predominante de las muestras correspondientes a cada zona se pueden observar en la Tabla 4.36.

Tabla 4.36: Características de las zonas geotécnicas

Zona Geotécnica	Hundibilidad y Fragmentación	Calidad Geotécnica	Litología Predominante
Secundaria	Muy Buena	Mala	Variada
Primario 5	Muy Buena	Regular	CMET
Primario 4	Buena	Regular	CMET-TO-PDI
Primario 3	Regular	Buena	CMET
Primario 2	Mala	Muy Buena	CMET-PDA-BXANH
Pipa	Muy Mala	Muy Buena	Brecha Braden

Una vez clasificadas las 1254 muestras de la base de datos de acuerdo a la zona geotécnica donde estas se encuentran, se obtiene el promedio los parámetros geometalúrgicos de interés para cada zona. Esto ayuda a conocer si existe una dependencia significativa de la calidad y fragmentación de la roca sobre la recuperación de Mo o los factores geoquímicos que la controlan.

Tabla 4.37: Parámetros geometalúrgicos promedio de las zonas geotécnicas

Zona Geotécnica	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
Secundaria	0.009	0.002	68.49	25.91
Primario 5	0.025	0.001	76.22	7.23
Primario 4	0.032	0.001	78.71	6.25
Primario 3	0.026	0.002	79.16	7.57
Primario 2	0.024	0.001	82.05	6.86
Pipa	0.025	0.004	67.74	9.51

Para conocer la magnitud de la influencia de la zona geotécnica sobre los controles de la recuperación de Mo, se realizaron las correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos para cada agrupación de muestras de acuerdo a su zona geotécnica. No se efectuaron nuevamente las correlaciones entre el porcentaje de alteración y los parámetros geometalúrgicos, puesto a que el sector del yacimiento en donde la zona geotécnica presenta una relación importante con los eventos de alteración del yacimiento es en el límite HT/HP, el cual ya fue estudiado.

Tabla 4.38: Correlaciones entre parámetros geometalúrgicos según la zona geotécnica

Pipa	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.332	1.000		
%Rec_Mo_Ro	-0.179	-0.608	1.000	
Factor K	-0.103	0.863	-0.256	1.000
Primario 2	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	-0.022	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.376	0.240	1.000	
Factor K	-0.416	0.421	-0.464	1.000
Primario 3	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.393	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.310	0.087	1.000	
Factor K	-0.327	0.230	-0.440	1.000
Primario 4	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.000	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.263	0.000	1.000	
Factor K	-0.422	0.000	-0.892	1.000
Primario 5	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.431	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.266	0.151	1.000	
Factor K	-0.360	-0.042	-0.769	1.000
Secundario	%Mo_Cab	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro	Factor K
%Mo_Cab	1.000			
%MoNS_Cab	0.234	1.000		
%Rec_Mo_Ro	0.293	-0.353	1.000	
Factor K	-0.313	0.333	-0.816	1.000

4.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MOLIBDENITA EN EL YACIMIENTO

4.5.1 Molibdenita en muestras de Roca.

Se revisaron más de 70 tramos de sondajes con un largo mínimo de 12 metros con el propósito de caracterizar la ocurrencia y distribución de la Molibdenita en el yacimiento. Si bien el 70% de los tramos descritos corresponden al Complejo Máfico El Teniente, se registró la información de al menos 2 tramos de cada una de las litologías más importantes del yacimiento. Los tramos revisados fueron seleccionados con el propósito de ser muestreados, por ende tienen como requerimiento ser mono-litológicos.

El mapeo de cada tramo consistió en el registro de:

- La litología del tramo.
- El porcentaje de cada etapa de alteración.
- La mineralogía y mineralización correspondiente a cada etapa de alteración.
- El registro de la presencia de Molibdenita, Powellita o Scheelita, asociado la etapa de alteración correspondiente.
- El estilo de mineralización de la Molibdenita y su asociación mineral.
- La descripción de las vetas que presentan Molibdenita.

De la totalidad de los tramos de sondajes mapeados, la alteración Tardimagmática se hace presente en un 94% de la roca, mientras que la alteración Hidrotermal Principal corresponde a un 2% del total de los tramos y la alteración Hidrotermal Tardía abarca aproximadamente el 4%, finalmente se reconoce menos del 1% de alteración Pre Tardimagmática. Los números anteriores representan los porcentajes totales de todos los tramos en conjunto, sin embargo esos porcentajes varían considerablemente al estudiar cada tramo a nivel individual con un máximo de alteración TM de 100%, 20% de alteración HP, 100% de alteración HT y 10% de alteración Pre TM. En cuanto a la mineralogía encontrada, ésta puede identificarse claramente dependiendo del tipo de alteración.

En las fases de alteración Pre TM observadas en la roca se encontró que predominan los minerales de magnetita y cuarzo dispuestos en parches difusos inmersos dentro de la alteración Tardimagmática. La alteración TM presenta como mineral predominante la biotita secundaria la cual altera de manera pervasiva toda la roca y en ocasiones puede presentar cloritización o albitización. Se caracteriza por presentar vetas sin halo con relleno de cuarzo, anhidrita y turmalina principalmente. La mineralización principal de esta alteración corresponde a calcopirita y bornita, aunque también presenta mineralización de covelina primaria pirita y molibdenita. Es importante destacar que en el mapeo de los tramos de sondaje, a pesar que se reconoció una mayor mineralización de sulfuros de cobre, las vetillas TM se presentan como una de las 2 fuentes principales de molibdenita encontradas en el estudio.

La alteración HP presente en los tramos de sondaje, se caracteriza por sus vetillas de sulfuros y halos bien definidos preferentemente sericíticos o silíceos. La mineralización principal corresponde a Calcopirita y Bornita, sin embargo existen escasos registros de

presencia de Molibdenita en cúmulos en asociación con calcopirita. Estas vetillas se encuentran cortando las vetillas de Alteración TM.

La Alteración HT se caracteriza en los sondajes estudiados por presentar en las muestras de roca vetillas con halos difusos principalmente sericíticos y cloríticos y extensos. Estas vetillas cortan a todas las anteriores, su relleno consiste en minerales de anhidrita, carbonatos y yeso principalmente, pero también se encuentran minerales de cuarzo, sericita, turmalina y sulfuros. La mineralización de estas vetillas corresponde principalmente a Molibdenita y Calcopirita, aunque también se encuentran mineralización de Bornita, Tennantita y Scheelita.

Respecto al aporte de mineralización de Mo para cada evento de alteración se realizó un estimado en base a los tramos de roca caracterizados y a los registros de mineralización y alteración presentes en la base de datos. De acuerdo a esta estimación en las rocas afectadas por alteración Tardimagnética se concentra el 75% del total de Molibdeno en El Teniente, en vetillas y brechas Hidrotermales Tardías se encuentra más del 25% del Mo del yacimiento, y en vetillas HP se encuentra menos del 1% de Mo. Sin embargo a pesar de que el mayor aporte de Mo se encuentra en la alteración TM, las leyes de Mo más altas fueron registradas en tramos de sondajes correspondientes a Brechas Hidrotermales con una alta alteración HT.

Un detalle del mapeo de los tramos de sondaje se encuentra en el Anexo E. Se reconocieron 11 estilos de mineralización de la Molibdenita en el yacimiento los cuales se describen a continuación.

1. **Rosetas:** Corresponden a cúmulos de Molibdenita cristalina los cuales se disponen de manera de láminas hexagonales. Esta forma de precipitar la Molibdenita es escasa en el yacimiento, pero pudo observarse en vetas Tardimagnéticas.



Figura 4.17: Rosetas de Molibdenita

2. **Diseminada/Pequeños Cúmulos:** Son pequeñas y numerosas agrupaciones de Molibdenita presentes tanto en vetillas, como en la matriz principal de la roca. Este estilo generalmente se encuentra en vetillas Tardimagmáticas cuando solo existen trazas de Molibdenita.



Figura 4.18: Molibdenita diseminada/ en pequeños cúmulos

3. **Cúmulos:** Se reconocen como aglomeraciones de Molibdenita en estado masivo, pueden ser pequeños o de gran tamaño. Son frecuentes encontrarlos en asociación con Calcopirita y Bornita en vetillas Tardimagmáticas.

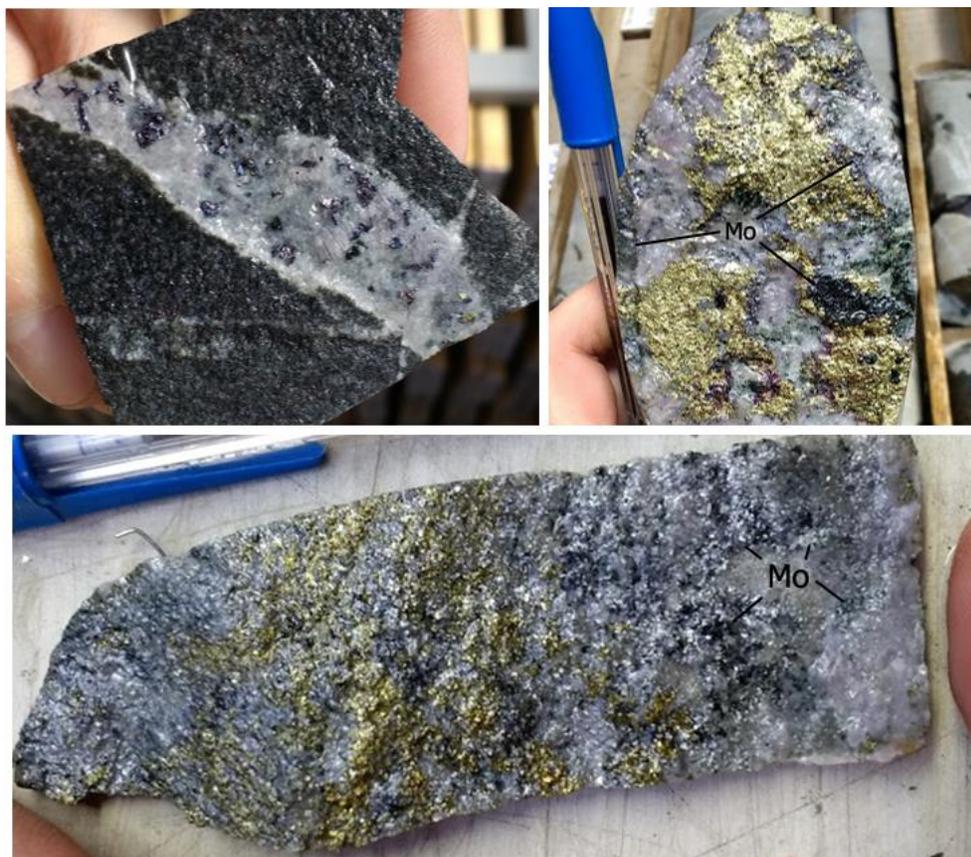


Figura 4.19: Molibdenita en cúmulos

4. **Cúmulos Lentiformes:** Al igual que el anterior, son aglomeraciones de molibdenita masiva, sin embargo éstas siguen la orientación de la veta y toman forma de un lente alargado. No son muy comunes, pero se presentan en vetillas Tardimagmáticas y de manera más escasa en vetillas HP asociados a Calcopirita masiva.



Figura 4.20: Molibdenita en cúmulos lentiformes en vetillas

5. **En sutura:** Se presenta como una sutura de vetas predominantemente de cuarzo o anhidrita. El ancho de la sutura puede variar y también se puede encontrar la Molibdenita asociada a otros sulfuros como Calcopirita. Este estilo puede presentarse tanto en vetillas TM como en vetillas HT.



Figura 4.21: Molibdenita en sutura

- 6. Reutilizando una vetilla previa:** Este estilo en particular tiene lugar luego de que una vetilla Tardimagmática, frecuentemente de cuarzo, es reutilizada en otro evento magmático o hidrotermal generando un nuevo relleno de Molibdenita en esta veta y alterando los bordes de ésta. Se encuentran principalmente en eventos Tardimagmáticos, pero se observaron casos donde una vetilla Hidrotermal Tardía reutilizó una veta Tardimagmática.



Figura 4.22: Molibdenita en relleno reutilizando una vetilla previa

- 7. En los Bordos de una vetilla/Vetilla reutilizada:** Es el caso contrario a la reutilización de una vetilla previa, en este estilo se observa que una vetilla TM previa con mineralización de Molibdenita es reutilizada luego de un evento Hidrotermal Principal. De esta manera se observa una vetilla con bordes bien definidos de Molibdenita.



Figura 4.23: Molibdenita en los bordes de una vetilla reutilizada

8. **Diseminada Fina:** Se encuentra frecuentemente en vetillas Hidrotermales Tardías, corresponde a Molibdenita de tamaño muy reducido que se encuentra diseminada dentro de la veta intercrecida y en asociación con otros minerales como sulfuros, turmalina o anhidrita. Tiene una apariencia de polvo de Molibdenita.



Figura 4.24: Molibdenita diseminada fina en vetillas

9. **En patina:** Es una variación de la mineralización diseminada fina, la diferencia radica en que en lugar de que la molibdenita se encuentre relleno de la veta, ésta solo se observa depositada como una suave capa de precipitación sobre una fractura de la roca. Es frecuente en fracturas y vetillas Hidrotermales Tardías.



Figura 4.25: Molibdenita en patina en vetillas y fracturas

- 10. En Halo:** Solo se encontró en un caso puntual donde se vislumbró una vetilla HT con relleno de Qz-Sericita cortando una vetilla TM de Calcopirita y Bornita masiva, dejando un halo con límite irregular de Molibdenita.



Figura 4.26: Molibdenita en el Halo de un vetilla

- 11. En matriz de brecha:** Se reconoció en tramos de brechas hidrotermales con alta Ley de Mo, donde se la Molibdenita se encuentra en altas cantidades de manera diseminada fina en la matriz de la brecha en los sectores de mayor Ley y va gradando a encontrarse en enrejado y finalmente en vetillas HT a medida que la Ley de Mo del tramo va disminuyendo.

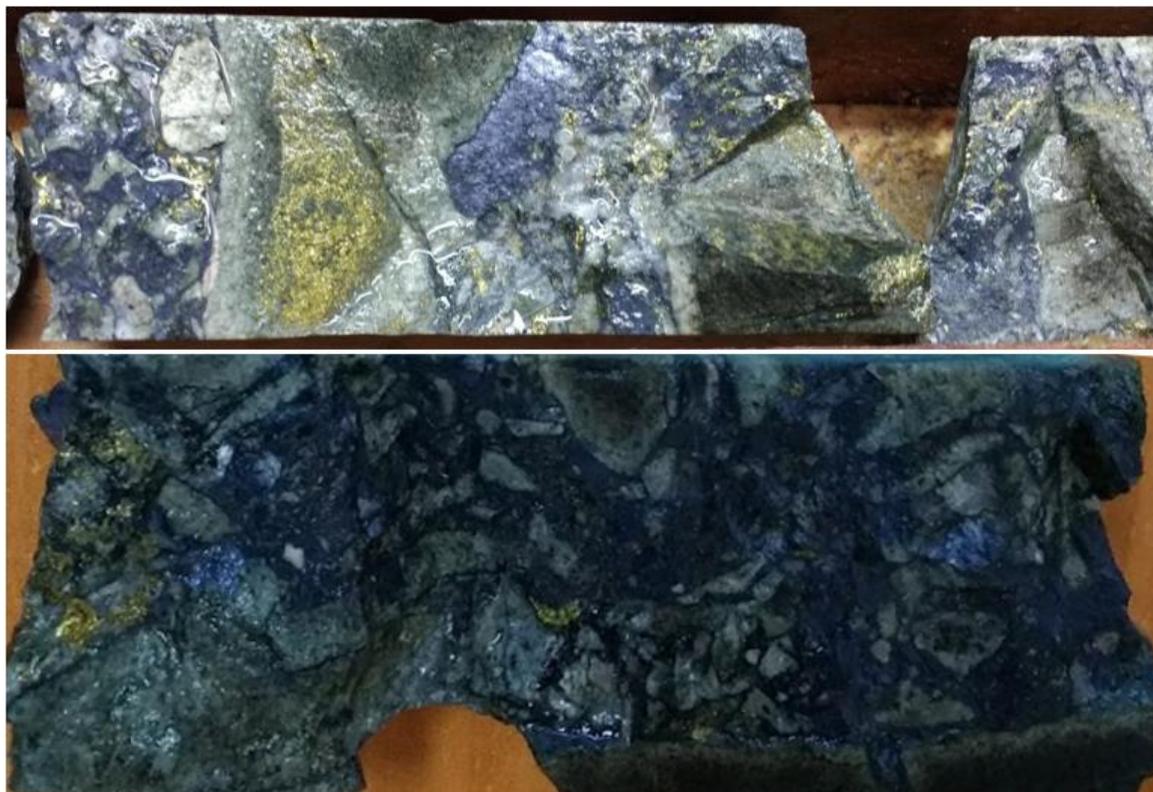


Figura 4.27: Molibdenita en matriz de brecha hidrotermal

4.5.2 Caracterización de la Molibdenita en microscopia óptica

De los tramos de sondajes descritos para caracterizar la Molibdenita, se sustrajeron 20 muestras las cuales se caracterizan por presentar vetillas con presencia de Molibdenita, con el propósito de describir su ocurrencia a una escala microscópica. De las muestras obtenidas se procuró que hubiera la presencia de todas las litologías de intrusivos predominantes en el yacimiento, también se procuró de que existieran muestras con presencia de Molibdenita en vetillas de los 3 diferentes eventos de alteración, al igual que abarcar la mayor cantidad de estilos de mineralización posibles. Finalmente se buscó estudiar en los cortes la mayor cantidad de los estilos de mineralización reconocidos en muestras de roca descritos anteriormente.

Tabla 4.39: Características de los cortes estudiados

Nombre muestra	Litología	Alteración vetilla
PA0641@51	TO	TM
PA0641@60	TO	TM
PA0649@3 (1)	TO	TM
PA0649@3 (2)	BXITO	TM
PA0668@9 (1)	CMET/PDA	TM
PA0668@9 (2)	CMET	TM
PA0668@9 (3)	CMET	TM
PA0672@9	CMET	TM
PA0678@21	CMET	TM
PA0694@60 (1)	CMET	TM
PA0694@60 (2)	CMET	HT
PA0699@9	PDA	TM
PA0722@2.06	TO	HT
PA0710@24.4	BXANH	HT
DDH2654@119.05	PDI	TM
DDH1801@430	BXQZ	HT
DDH1801@440	BXQZ	HT
DDH1801@454	BXQZ	HT
DDH2544@19.08	CMET	HP
DDH2791@23.4	CMET	HT

En general la mineralogía reconocida en los cortes coincide con lo observado a escala macroscópica en los tramos de sondajes estudiados, tanto para la litología de las muestras como para los eventos de alteración.

4.5.2.1 Estilo de mineralización

Se identificaron 14 estilos de mineralización de Molibdenita en los cortes descritos, en su mayoría son característicos de una etapa de alteración particular, generalmente Tardimagmática o Hidrotermal Tardía. No obstante también se observan estilos de mineralización en común para varias etapas de alteración. Por lo general los cristales de Molibdenita observados presentan forma laminar y elongada, pueden ser rectos o sinuosos y su largo y ancho es variable.

- 1. Cristal aislado:** corresponden a 1 o 2 cristales tabulares elongados de gran tamaño, con un largo superior a $450\ \mu\text{m}$, los cuales se encuentran distantes a cualquier otro mineral de mena. Frecuentemente se encuentran en asociación con cuarzo, rellenando vetillas Tardimagmáticas o aislados en la roca, al no haber presencia cercana de otros minerales de mena, no se puede clasificar como estilo diseminado.

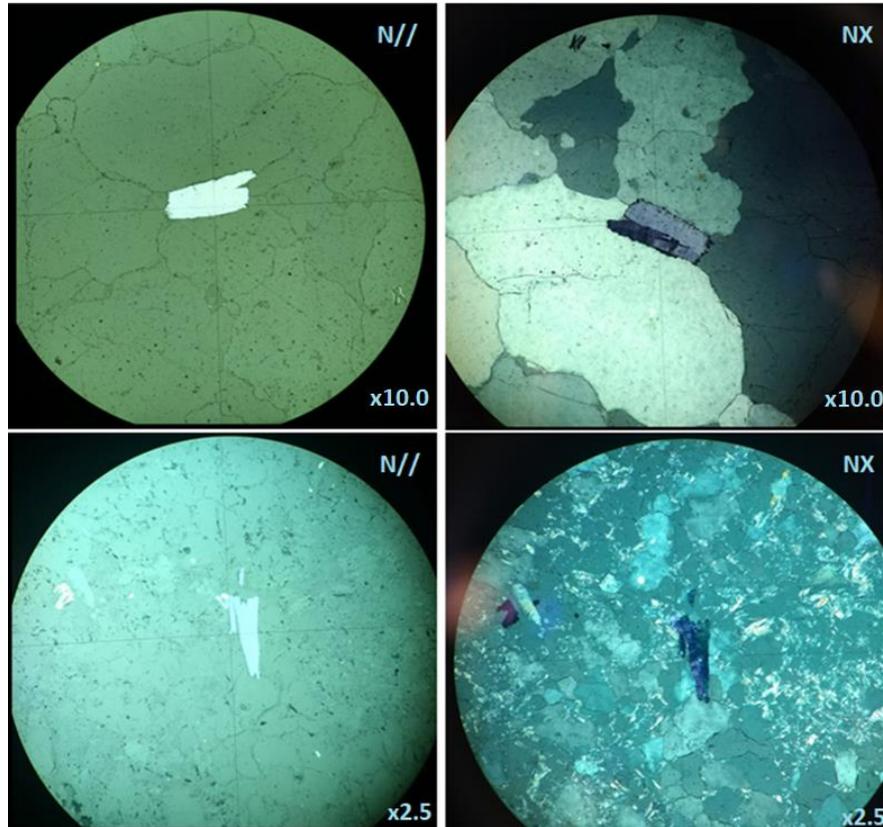


Figura 4.28: Cristales de Molibdenita aislados en vetillas Tardimagmáticas

- 2. Cúmulos Grandes:** Agrupaciones de varios cristales de gran tamaño (largo mayor a $400\ \mu\text{m}$), generalmente elongados, los cuales pueden o no tener una orientación preferencial, se caracterizan por ser cristales euhedrales o subhedrales los cuales se encuentran en asociación con cuarzo y en ocasiones con minerales de mena.

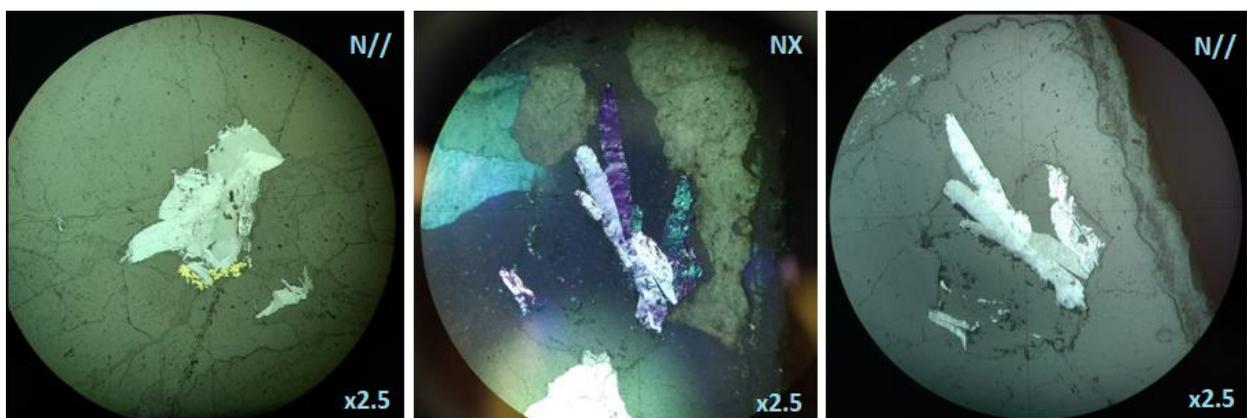


Figura 4.29: Cúmulos grandes de cristales de Molibdenita en vetillas TM

3. **Cristales Radiales:** Corresponden a pequeños cristales de Molibdenita elongados, los cuales se encuentran agrupados en uno de sus extremos, mientras que el otro se encuentra hacia el exterior, dando la apariencia de un asterisco o una flor.

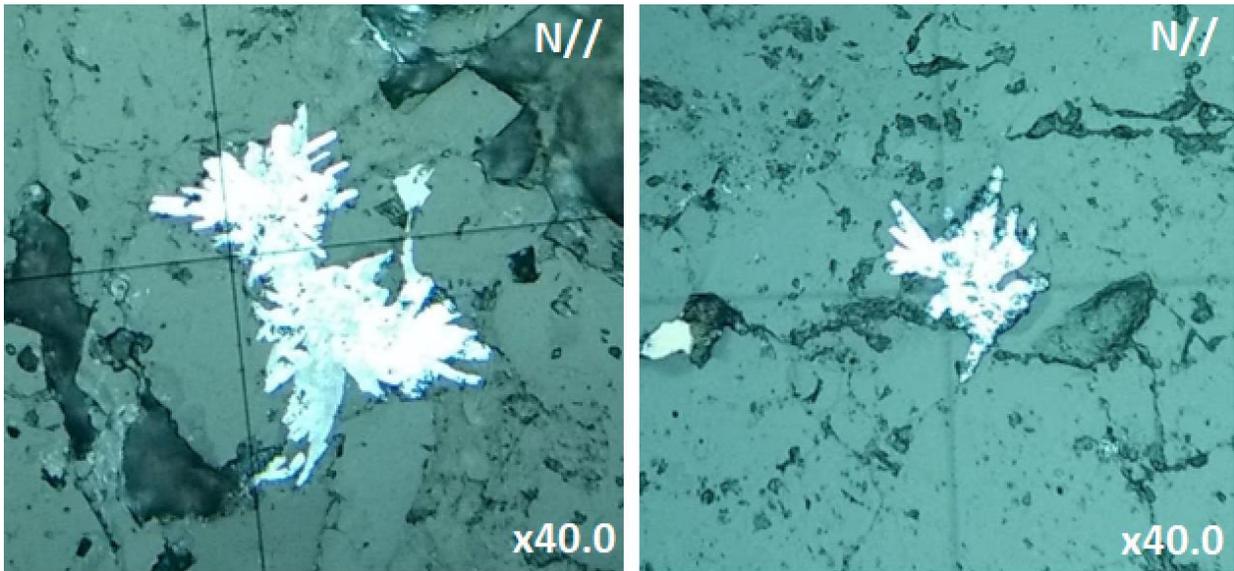


Figura 4.30: Cristales de Molibdenita dispuestos en forma radia

4. **Cúmulos de cristales desorientados:** Cristales elongados de Molibdenita, parcialmente agrupados, sin tener una orientación preferente. El cúmulo de cristales si puede tener una orientación en el sentido de la vetilla, formando parte de una sutura o un cúmulo lentiforme. El largo de los cristales varía entre los 40 y 250 μm .

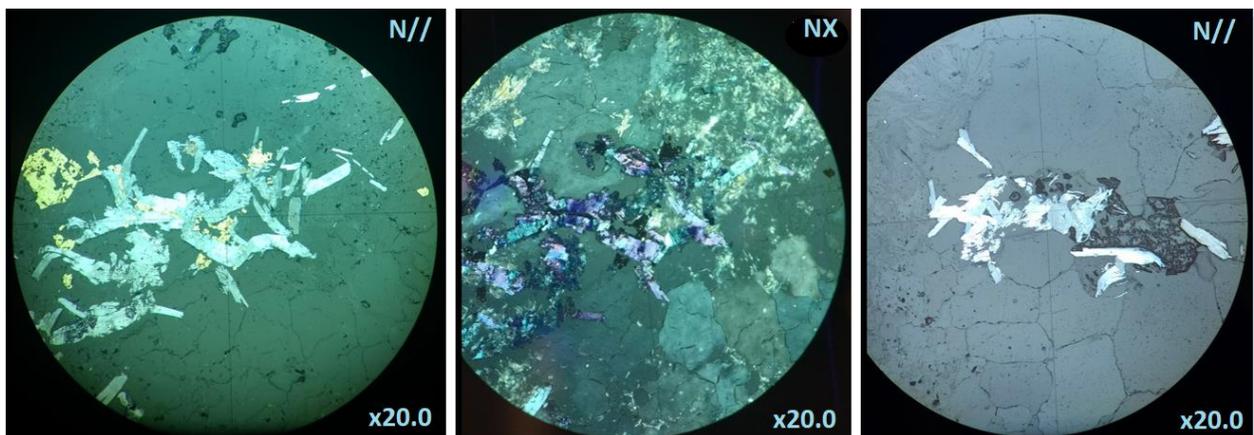


Figura 4.31: Cúmulos de cristales de Molibdenita sin orientación preferente

5. **Sutura Cristalina:** Se forma por el alineamiento y agrupación de cristales euhedrales y subhedrales de Molibdenita, estos cristales se caracterizan por ser tabulares rectos achatados de tamaño medio, largo $>100\mu\text{m}$ y ancho $>45\mu\text{m}$. Se encuentran alineados de forma continua con una orientación en sentido de la vetilla. En ocasiones, esta sutura se puede encontrar de forma discontinua, formando cúmulos lentiformes. Se observó solamente en vetillas Tardimagmáticas.

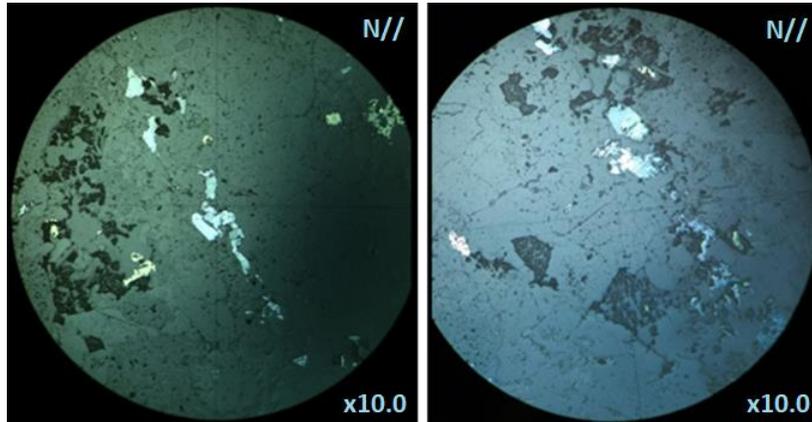


Figura 4.32: Sutura de Molibdenita de cristales de gran tamaño

6. **Sutura de cristales finos:** Abundantes cristales de Molibdenita elongados y sinuosos con un largo menor a $75\mu\text{m}$, se agrupan semi-orientados en dirección de la vetilla en la que se encuentran, la delgadez de los cristales da la apariencia de una textura de entre-crecimiento vermicular. La exsolución de estos cristales ocurre en el centro de una vetilla Tardimagmática o Hidrotermal Tardía rellena generalmente de cuarzo o sericita. A veces pueden observarse asociaciones con calcopirita en la sutura.

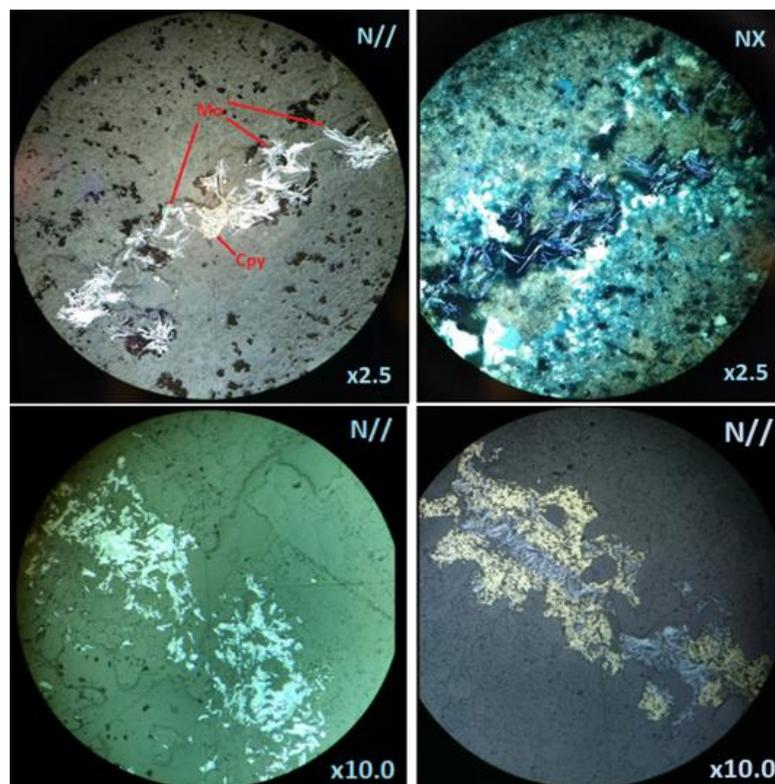


Figura 4.33: Sutura de cristales finos de Molibdenita

7. **Cúmulos Lentiformes:** Agrupaciones de cristales los cuales se disponen con una orientación preferente y además el cúmulo presenta una orientación en el sentido de la vetilla donde éste fue formado. Los cristales pueden ser finos o de gran tamaño. Pueden formarse producto de suturas discontinuas o por la exsolución heterogénea de cristales de Molibdenita.

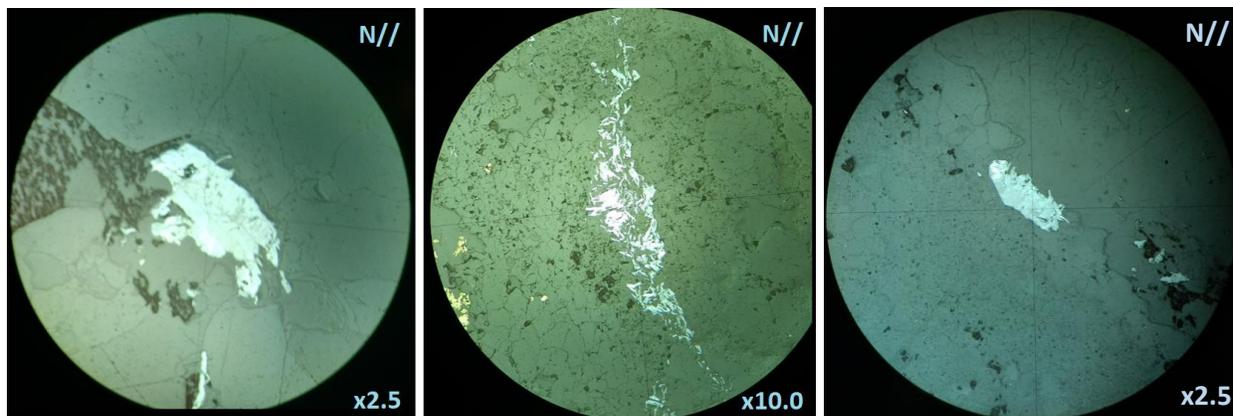


Figura 4.34: Cúmulos de cristales de Molibdenita lentiformes

8. **En Bordes de Vetilla:** Cristales finos que se forman producto de la precipitación de Molibdenita en las paredes de vetillas Tardimagmáticas generalmente rellenas de cuarzo y con sutura de otro sulfuro (calcopirita, pirita). También pueden formarse producto de la reutilización de una vetilla tardimagmática con relleno de Molibdenita, empujando la Molibdenita a los bordes de la vetilla reutilizada.

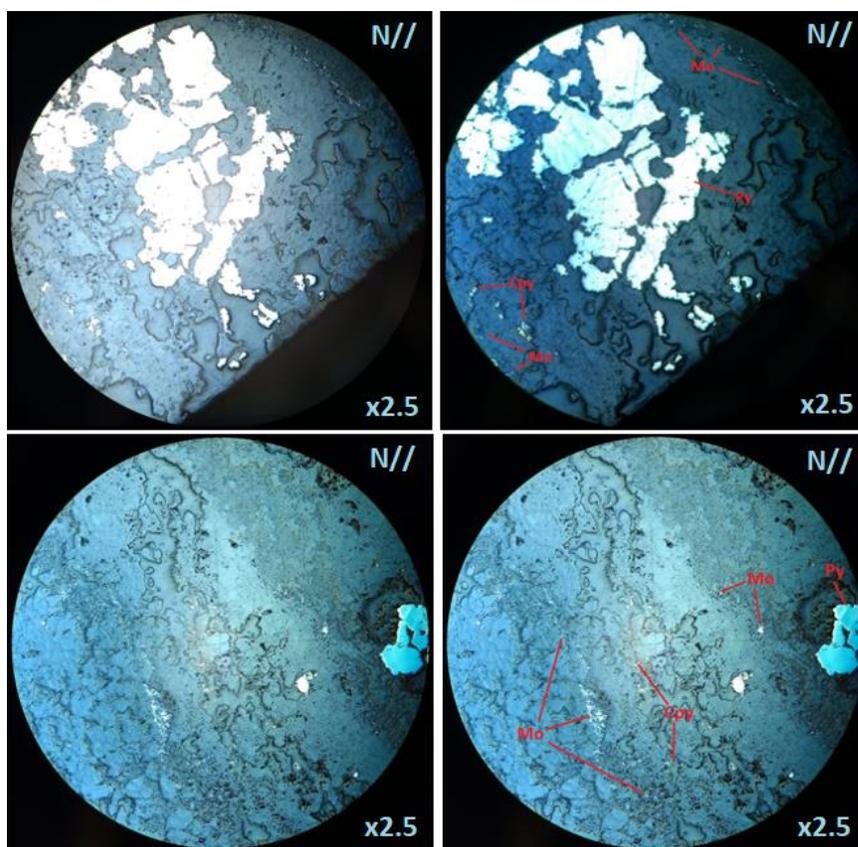


Figura 4.35: Cristales finos de Molibdenita en bordes de vetilla

9. Cristales diseminados: Pequeños cristales de Molibdenita, elongados, los cuales se distribuyen sin una orientación preferencial ni agrupación en vetillas y en la roca hospedante. Suelen encontrarse en asociación con cuarzo, sericita, biotita y plagioclasa, en raras ocasiones se encuentran en contacto con calcopirita diseminada.

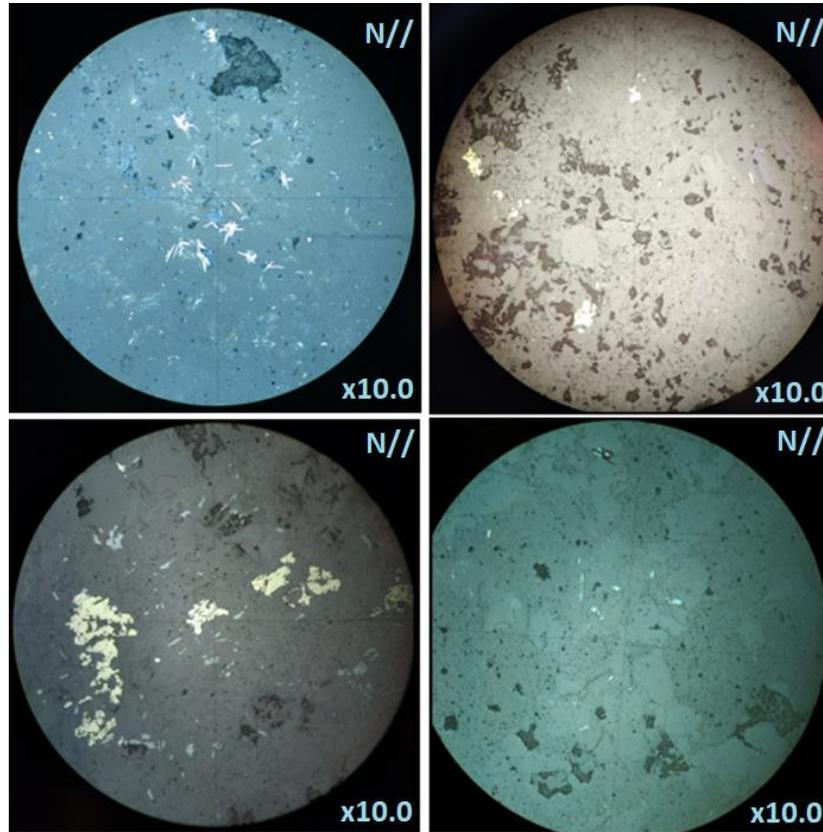


Figura 4.36: Cristales de Molibdenita diseminados en el corte

10. Cristales Anhedrales: Cristales de Molibdenita que no presentan las caras propias ni la forma elongada características de la Molibdenita. Pueden encontrarse en cúmulos o aislados, en asociación con minerales de ganga o de mena. Son más comunes fuera de las vetillas, diseminados en la roca.

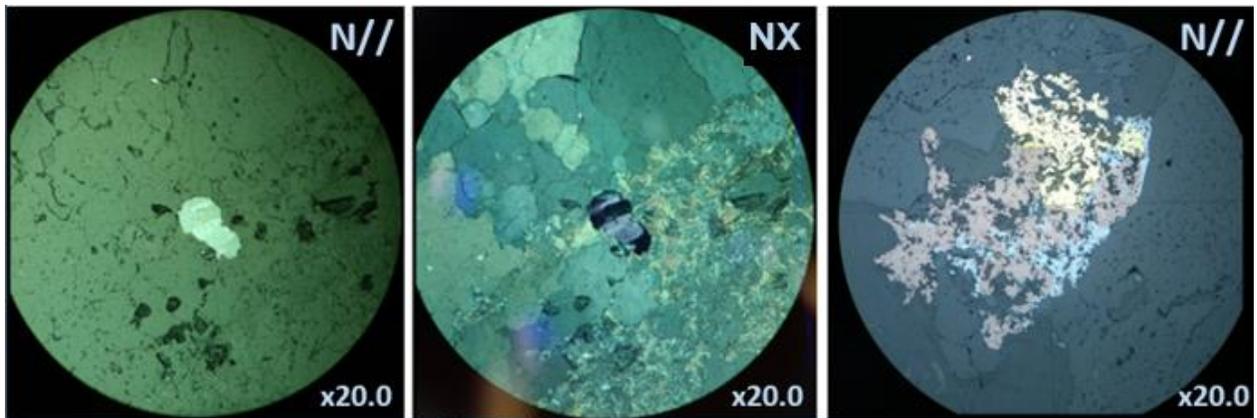


Figura 4.37: Cristales Anhedrales de Molibdenita

11. Relleno de espacios intercrystalinos: Cristales delgados de Molibdenita que precipitaron en los espacios encontrados entre cristales de cuarzo producto de la circulación de fluidos hidrotermales. Únicamente se observaron en un corte, correspondiente a una vetilla Hidrotermal Tardía superpuesta sobre una vetilla Tardimagmática en una roca del Complejo Máfico El Teniente.

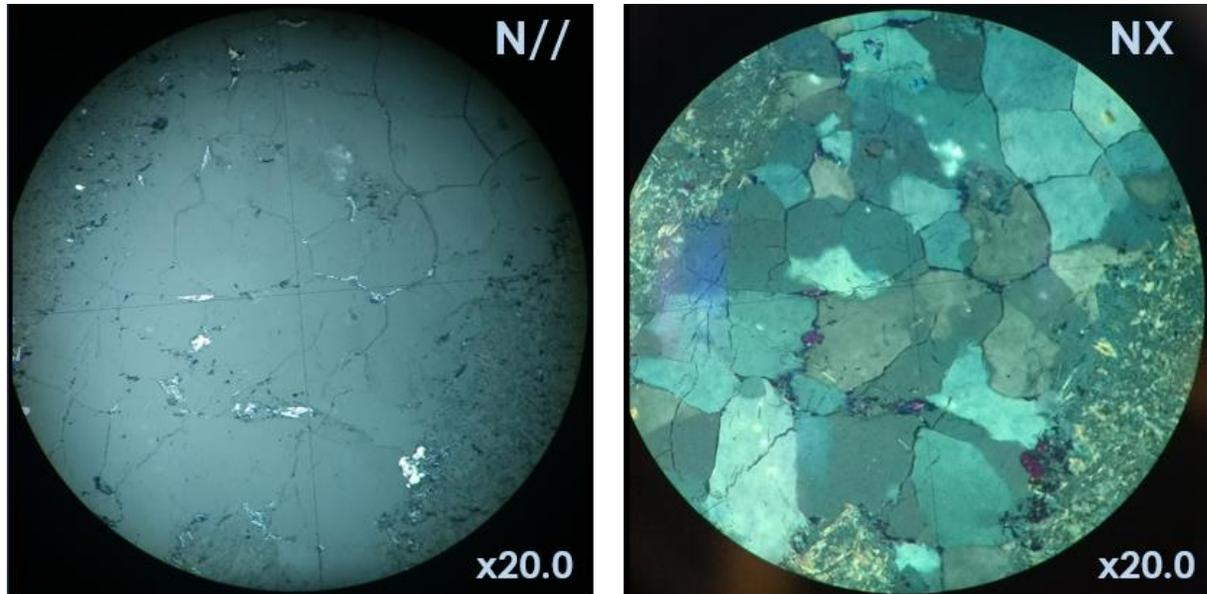


Figura 4.38: Relleno intergranular de Molibdenita

Halo de cristales finos: Cristales finos de Molibdenita (<75 μ m de largo) diseminados y agrupados en cúmulos, distribuidos en el borde exterior de una vetilla Hidrotermal Tardía. En el halo pueden observarse diversos estilos independientes como cúmulos pequeños, cristales radiales, cristales aislados, etc.

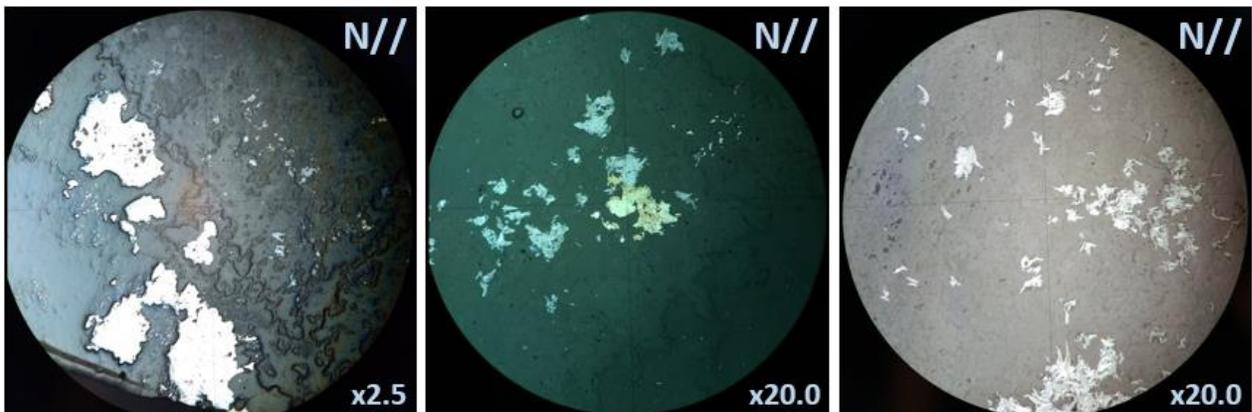


Figura 4.39: Halo de cristales finos de Molibdenita

12. Cristales muy finos diseminados en vetillas: La Molibdenita es encuentra diseminada en vetillas hidrotermales tardías, el tamaño de los cristales no supera los 10µm. Las vetillas pueden encontrarse aisladas o en stockworks que eventualmente pueden llegar a formar una brecha hidrotermal.

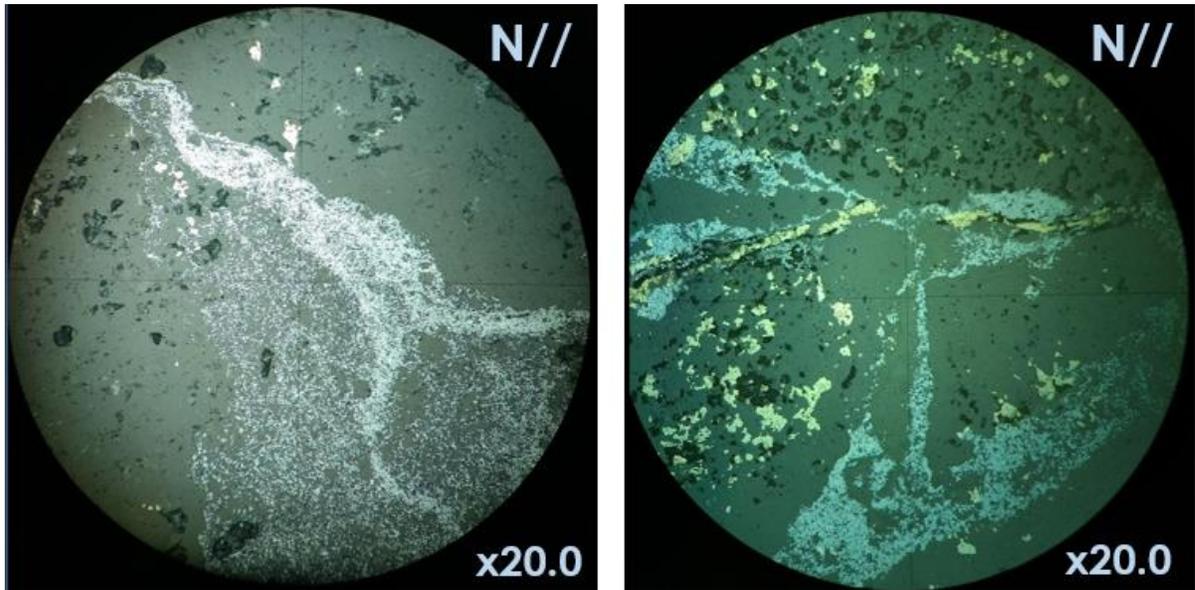


Figura 4.40: cristales muy finos de Molibdenita diseminados en vetillas

13. Matriz de Brecha: Corresponde a cristales muy finos de Molibdenita de largo <10µm, diseminados en la matriz de una brecha hidrotermal tardía.

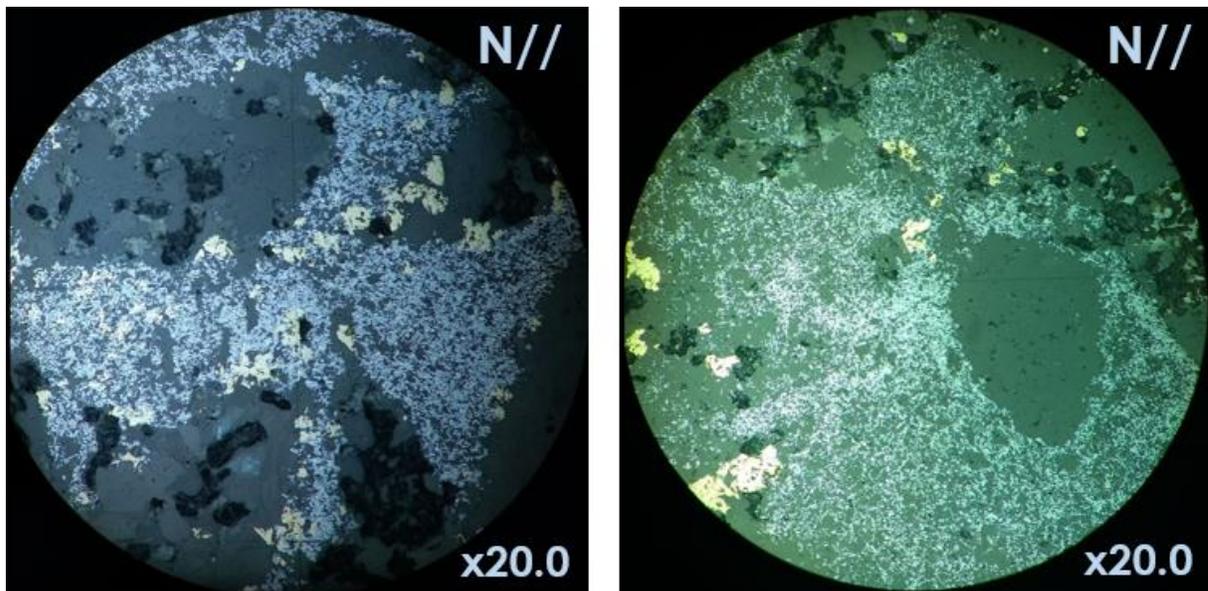


Figura 4.41: Cristales de Molibdenita diseminados en matriz de brecha

4.5.2.2 Asociaciones minerales

Los cristales de Molibdenita se encuentran con mayor frecuencia dentro de las vetillas, en donde presentan asociaciones con los demás minerales que rellenan la vetilla. En vetillas Tardimagmáticas generalmente se encuentran en asociación a minerales de Cuarzo y Anhidrita, rellenando espacios vacíos o como sutura, en menor proporción se presentan asociados a sericita y minerales de mena como Calcopirita y Bornita, generalmente como contactos nítidos o textura de intercrecimiento.

Cuarzo

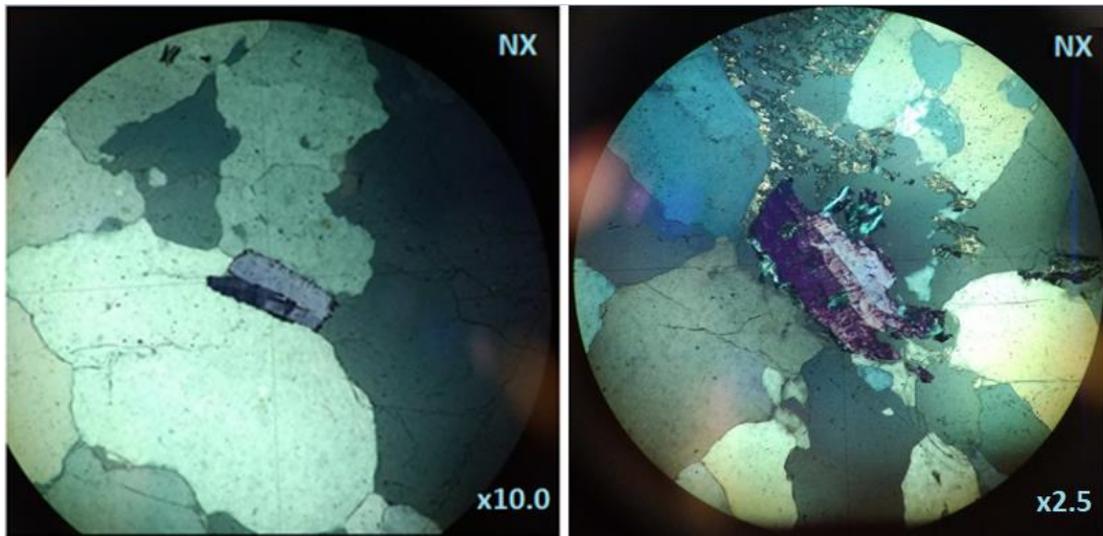


Figura 4.42: Asociación Molibdenita-Cuarzo en vetillas TM

Sericita

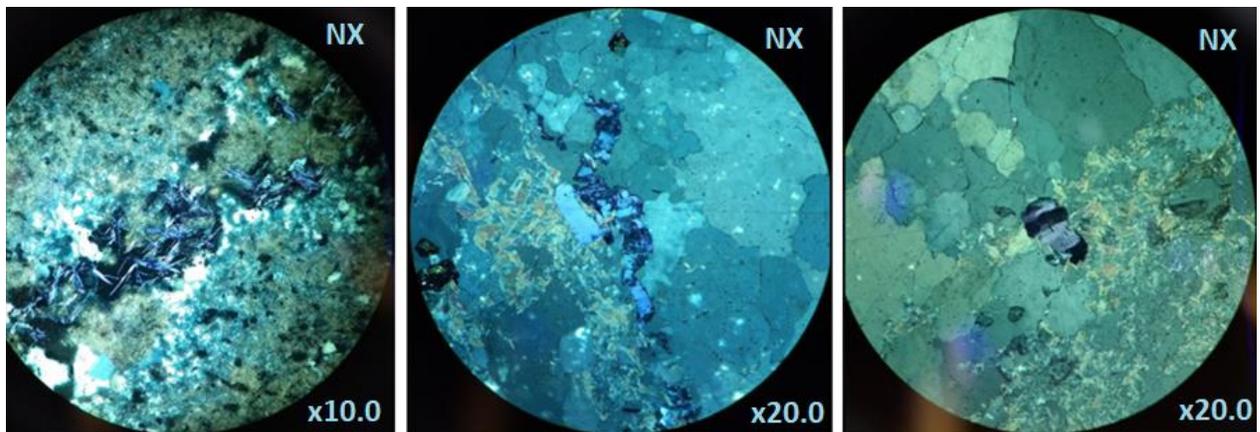


Figura 4.43: Asociación Molibdenita-Sericita en vetillas TM

Bornita

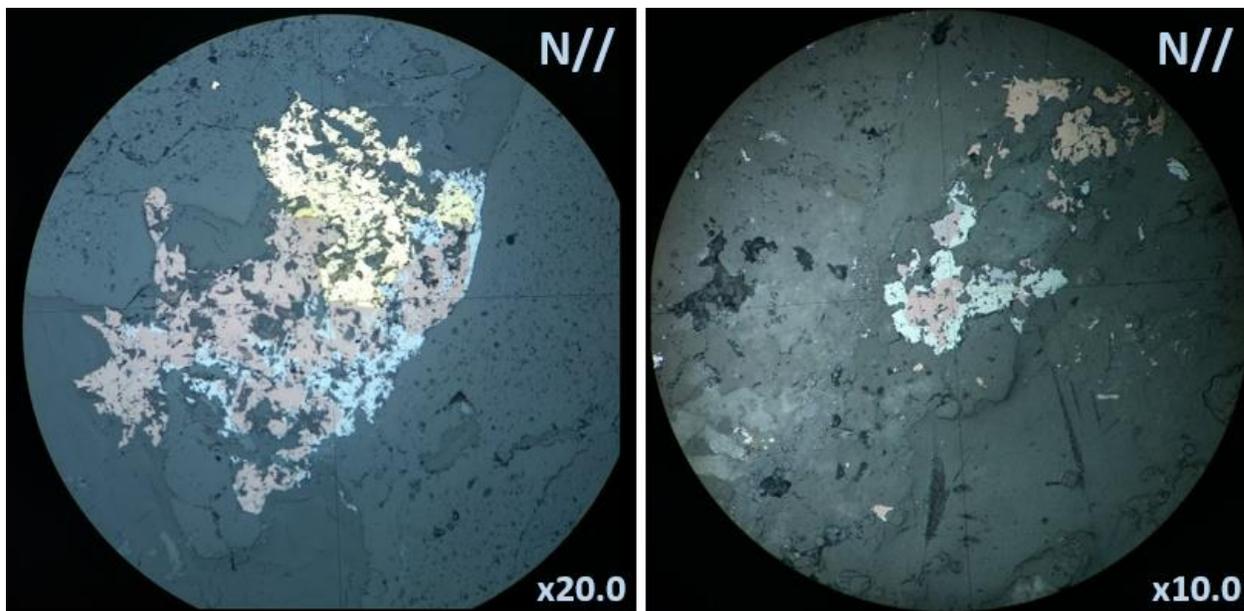


Figura 4.44: Asociación Molibdenita-Bornita en vetillas TM

Calcopirita

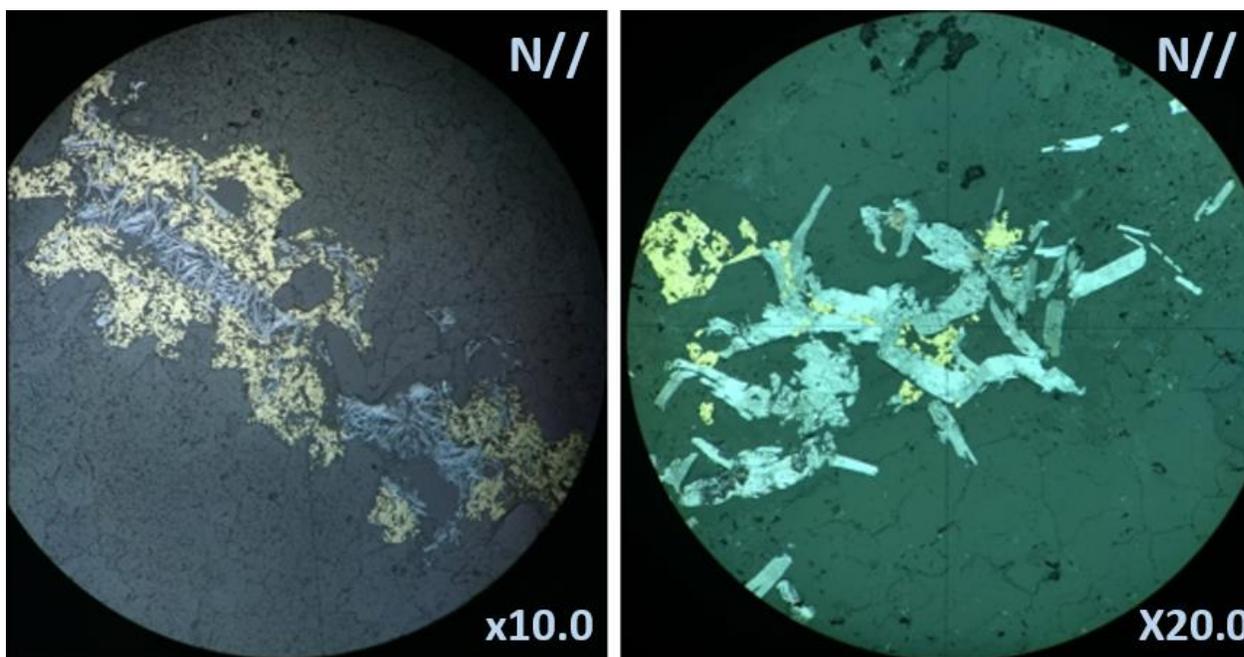


Figura 4.45: Asociación Molibdenita-Calcopirita en vetillas TM

En la vetilla Hidrotermal Principal con presencia de Molibdenita estudiada La principal asociación mineral encontrada es con la calcopirita, los cristales suelen encontrarse como un crecimiento heterogéneo de calcopirita en las paredes de los cristales de Molibdenita. También es común la asociación con el cuarzo, en menor frecuencia se encuentra asociaciones con sericita y epidota. Se debe destacar que en las vetillas HP se encuentra un gran contenido de sericita en el Halo, aunque ésta no se encuentre en asociación con la Molibdenita.

Cuarzo

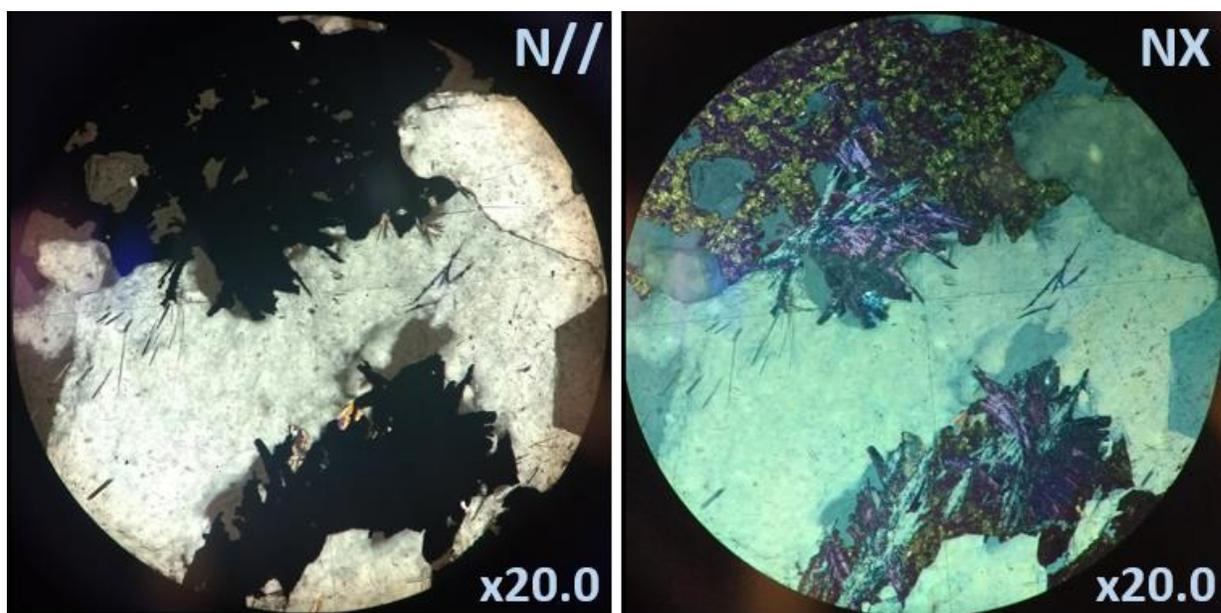


Figura 4.46: Asociación Molibdenita-Cuarzo en vetillas HP

Calcopirita

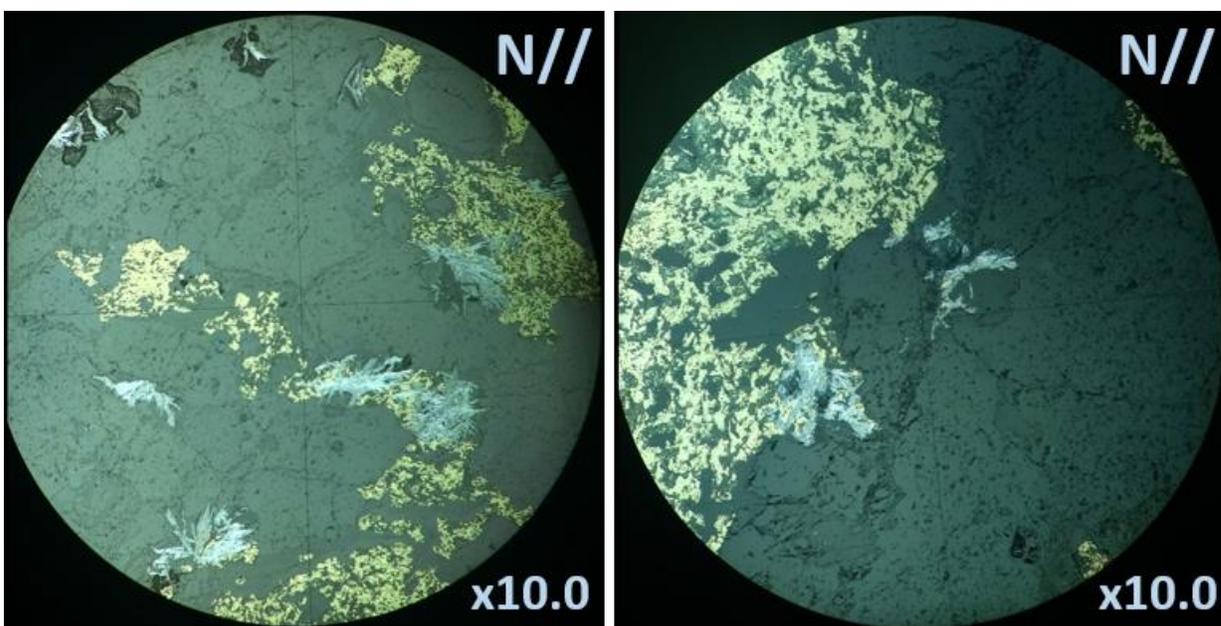


Figura 4.47: Asociación Molibdenita-Calcopirita en vetillas HP

En vetillas Hidrotermales Tardías los cristales de Molibdenita encuentran generalmente asociados a anhidrita, yeso y carbonatos con contactos nítidos o textura de intercrecimiento consertal. También es común encontrar cristales de Molibdenita asociados a sericita rellenando espacios entre los cristales.

Anhidrita/Yeso

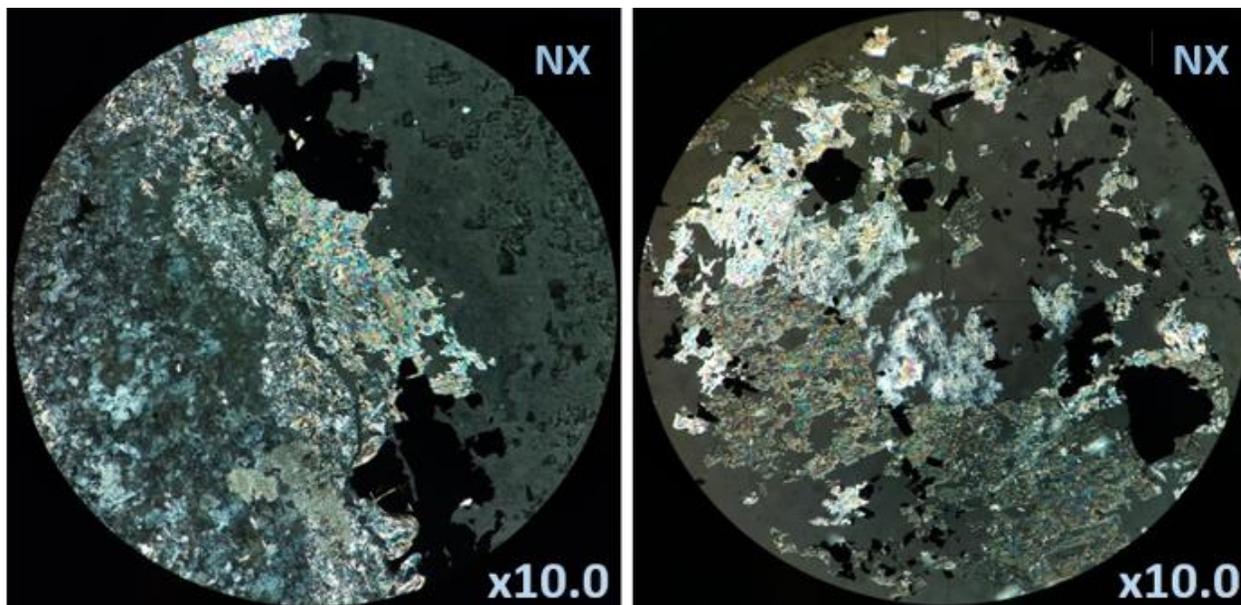


Figura 4.48: Asociación Molibdenita-Anhidrita/Yeso en vetillas HT

Sericita

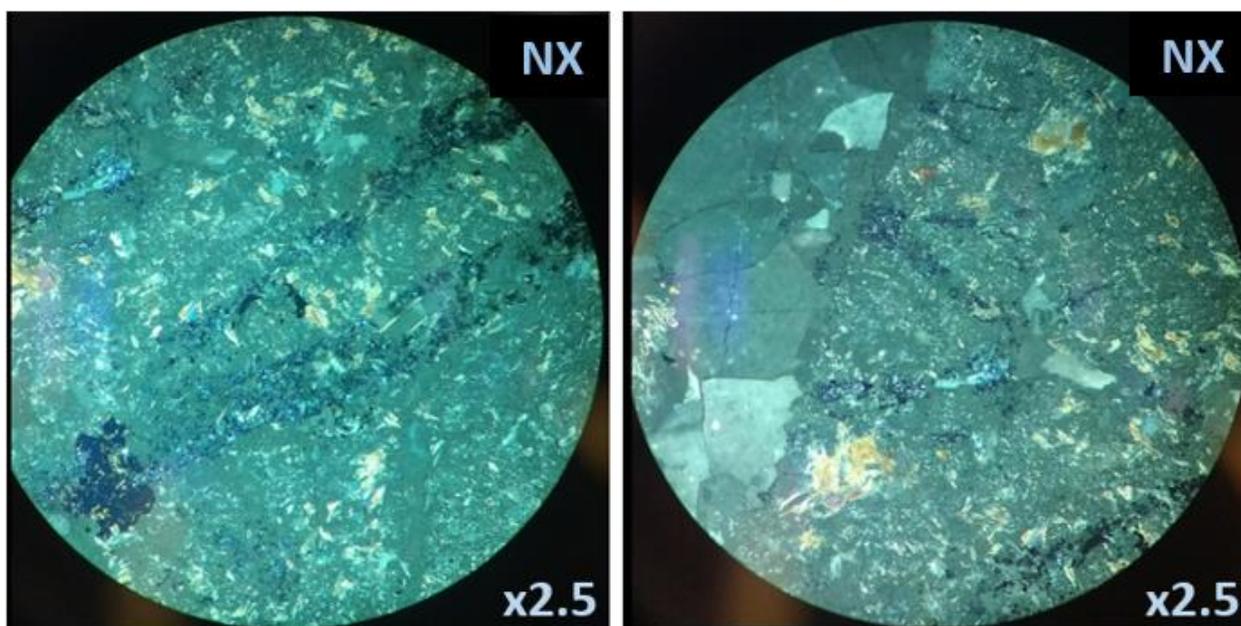


Figura 4.49: Asociación Molibdenita-Sericita en vetillas HT

4.5.3 Ensayos de Flotación y Mineralogía QEMSCAN

Para estudiar de manera cuantitativa a escala microscópica la ocurrencia y distribución de la Molibdenita, se realizó un estudio mineralógico a través de un análisis QEMSCAN. Este análisis consiste en un escaneo de microscopía electrónica que entrega información sobre el porcentaje de asociación mineral, el tamaño de la especie mineral y el grado de liberación de la especie mineral, presentes en una muestra de roca. Se realizó el análisis QEMSCAN para 20 muestras correspondientes a tramos de 12 m de sondajes con una presencia relevante de Molibdenita, las cuales fueron previamente caracterizadas a escala macroscópica. Para que sea posible estudiar el comportamiento de la recuperación de Mo en función de los datos de mineralogía obtenidos, previamente a los análisis QEMSCAN realizados. Fueron efectuados ensayos de Molienda y Flotación a cada una de las 20 muestras. Estos resultados de los ensayos de flotación, en conjunto con los datos de ubicación y litología de la muestra, se encuentran dispuestos en la Tabla 4.40. El detalle del mapeo macroscópico de los tramos de sondaje se encuentra registrado en el Anexo E.

Tabla 4.40: Datos de muestras y resultados de ensayo de flotación

Muestra	Sondaje	Desde	Hasta	Litología	Ley de Mo	% Rec Mo
S1214	PA0722	0	12	TO	0.081	78.5
S1215	PA0668	0	12	CMET	0.045	82.5
S1216	PA0714	48	60	BXITO	0.013	86.0
S1217	PA0649	0	12	BXITO	0.03	81.4
S1218	PA0713	24	36	TO	0.007	87.1
S1219	PA0713	24	36	TO	0.007	77.7
S1220	PA0709	60	72	CMET	0.006	62.5
S1221	PA0641	48	60	TO	0.011	87.4
S1222	PA0715	24	36	CMET	0.008	76.9
S1223	PA0715	24	36	CMET	0.01	79.5
S1224	PA0710	72	84	BXSU	0.212	50.2
S1225	PA0710	18	30	BXANH	0.092	59.0
S1226	PA0693	0	12	BXCL	0.088	78.2
S1227	PA0696	48	60	BBS	0.095	66.2
S1228	PA0671	0	12	BXANH	0.013	75.7
S1229	PA0703	60	72	CMET	0.007	86.5
S1230	PA0699	0	12	PDA	0.005	81.0
S1231	PA0694	54	66	CMET	0.012	92.1
S1232	PA0672	0	12	CMET	0.013	93.3
S1233	PA0673	12	24	CMET	0.012	85.3
S1234	PA0678	18	30	CMET	0.022	88.0

El análisis QEMSCAN determinó los porcentajes correspondientes a cada asociación mineral de las partículas de la muestra que presentan Molibdenita. A su vez se obtuvieron los porcentajes del grado de liberación de la Molibdenita dentro de las partículas presentes en la muestra. Finalmente se obtuvieron los resultados del tamaño de la especie mineral de Molibdenita, este tamaño es alusivo únicamente al cristal de Molibdenita y no a la partícula donde se encuentra asociada. Estos datos fueron graficados y comparados con los resultados del ensayo de flotación respectivo de cada muestra y se visualizan en el Gráfico 4.11, Gráfico 4.12 y Gráfico 4.13 respectivamente.

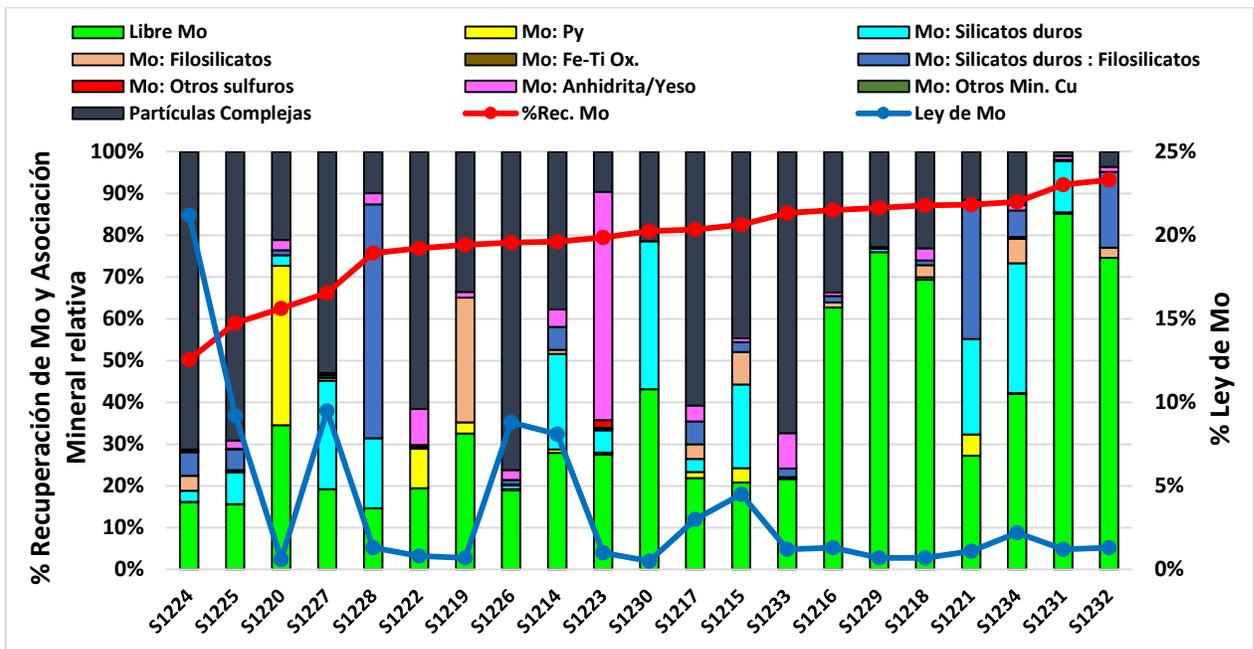


Gráfico 4.11: Asociación mineral de Molibdenita relativa vs Recuperación y Ley de Mo

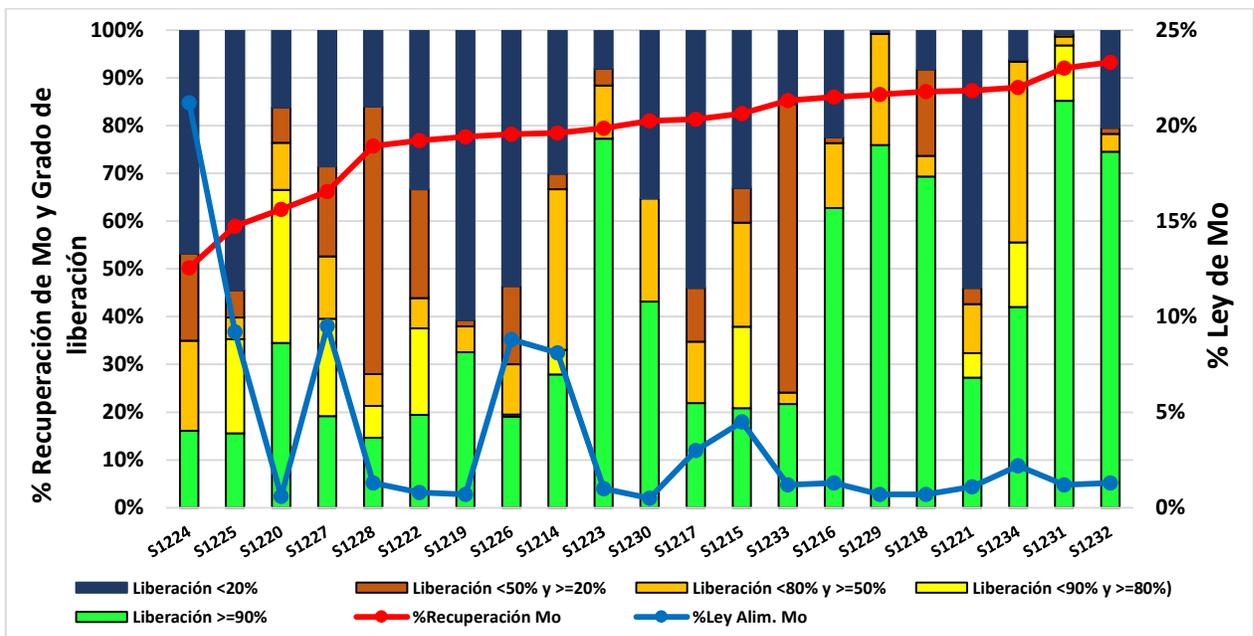


Gráfico 4.12: Grado de Liberación de Molibdenita relativo vs Recuperación y Ley de Mo

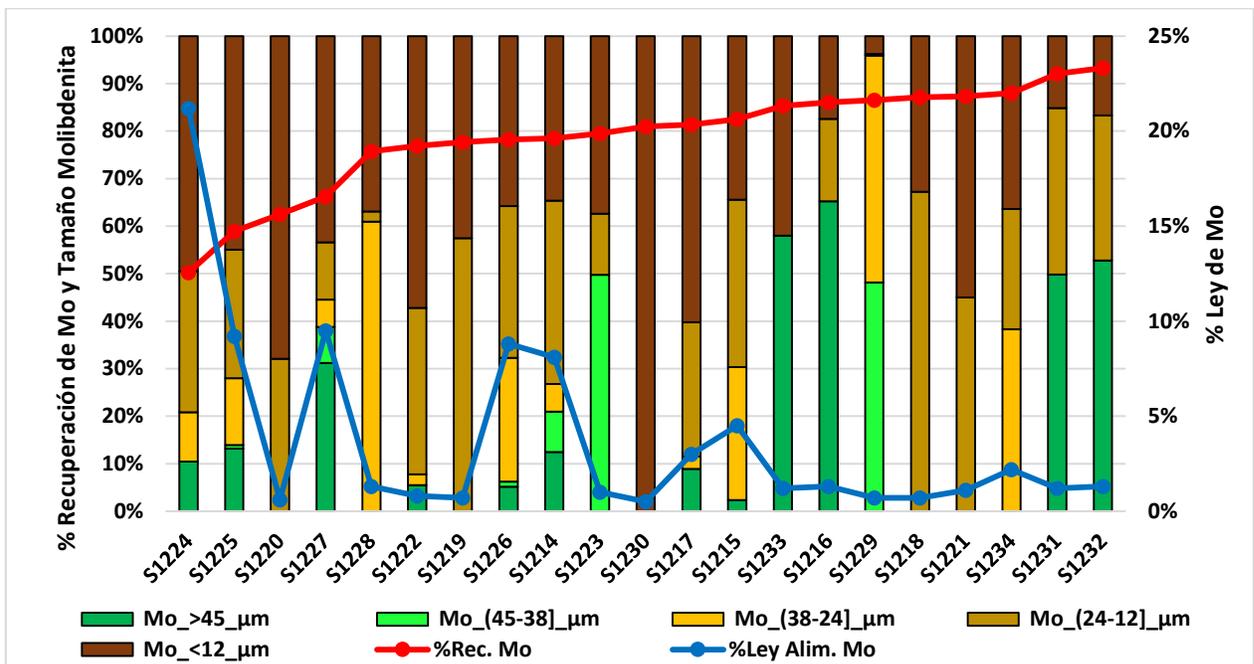


Gráfico 4.13: Tamaño de Molibdenita relativo vs Recuperación y Ley de Mo

Debido a que el tamaño de la especie mineral expuesto en los gráficos no considera si los cristales de Molibdenita se encuentran liberados u ocluidos dentro de la partícula, es necesario representar en un gráfico el tamaño de los cristales los cuales se encuentran liberados dentro de la muestra. Éstos fueron clasificados en cristales libres de largo >12 μm y cristales libres de largo <12 μm, ya que en la práctica éstos últimos presentan una menor probabilidad de flotar de manera independiente en el ensayo de Flotación Rougher.

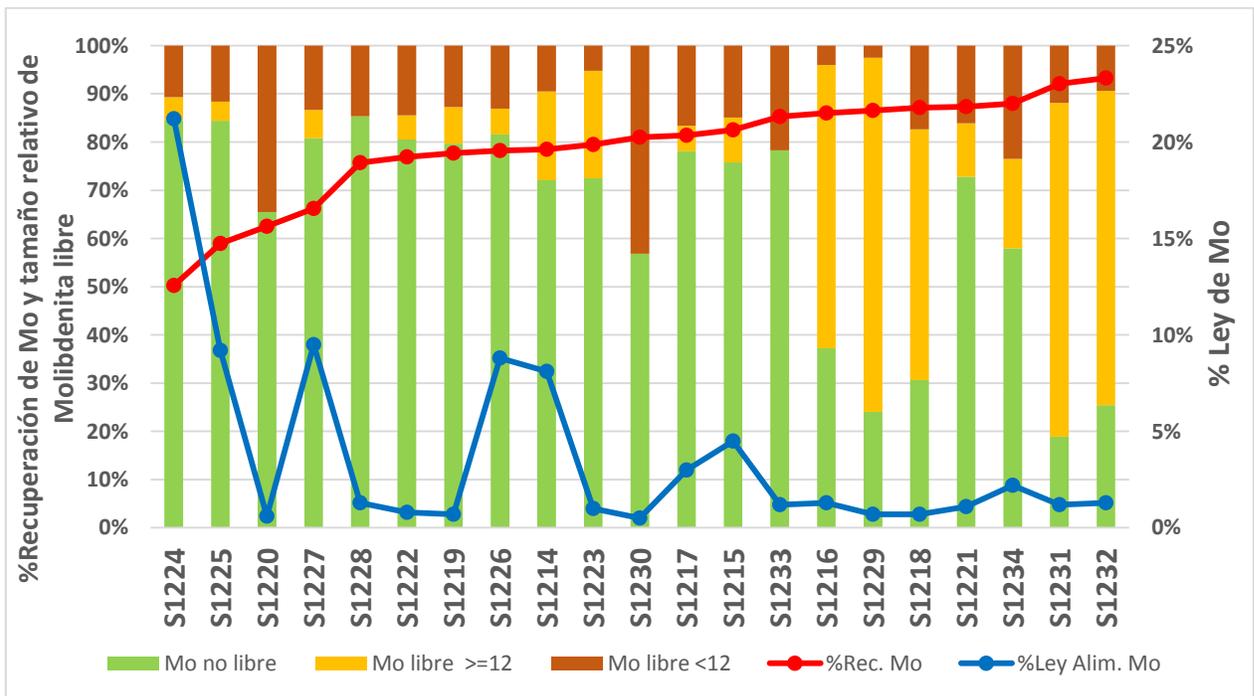


Gráfico 4.14: Tamaño de Molibdenita libre relativo vs Recuperación y Ley de Mo

Es sabido que el proceso de molienda y flotación pueden verse afectados por la presencia de minerales finos como filosilicatos y arcillas, independiente si éstos se encuentran asociados a los minerales de mena. En el proceso de molienda los minerales finos se adhieren a otras partículas, formando partículas complejas de varios minerales y disminuyendo el grado de liberación de los minerales de mena y aumentando la densidad de las partículas, lo que posteriormente dificulta la adherencia de las partículas a las burbujas en proceso de flotación. En el ensayo de flotación, las partículas finas se adhieren a la superficie de las burbujas ocupando espacio en la superficie e impidiendo que se adhieran minerales de mena, disminuyendo la recuperación.

Las arcillas son las principales causantes de estos problemas, debido a su pequeño tamaño, sin embargo en El Teniente no se encuentran altos porcentajes de arcilla en la roca, y los sectores supérgenos, donde estos minerales eran más abundantes, ya fueron explotados. Por lo tanto, en los resultados obtenidos del laboratorio se estudiara únicamente la influencia de la presencia de los filosilicatos en la roca. Se estudiaron únicamente las 20 muestras de los tramos de sondaje que se encuentran mapeados y que presentan datos de mineralogía QEMSCAN con el propósito de tener la mayor cantidad de información disponible para interpretar los resultados.

En primera instancia se compara la recuperación de Mo con el porcentaje del total de filosilicatos presentes en la muestra, los que abarcan minerales de Biotita, Muscovita/Sericita, clorita y arcillas. Las muestras se clasifican a su vez por el sector productivo donde fueron extraídas, para facilitar su estudio.

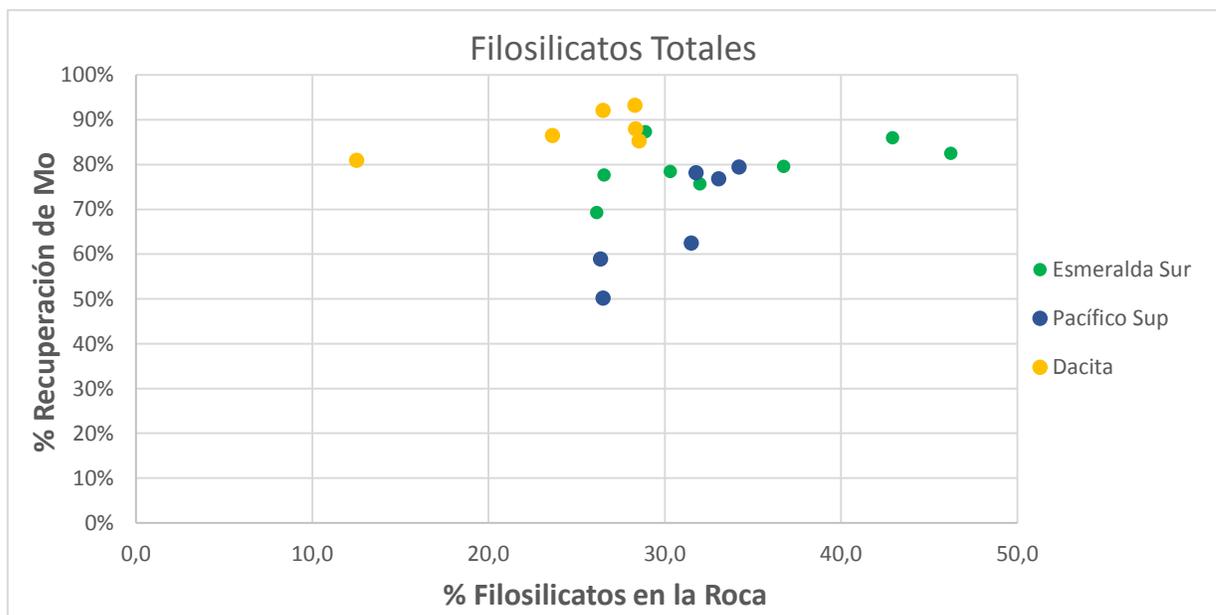


Gráfico 4.15: Recuperación de Mo vs % Filosilicatos en la muestra

Para observar el comportamiento individual de cada filosilicato presente en las muestras, se compara la distribución de la recuperación de Mo con la el porcentaje de Biotita y Muscovita/Sericita en las muestras de manera independiente. Se estudian únicamente estos minerales micáceos puesto a que son notablemente más abundantes en las muestras que los demás filosilicatos.

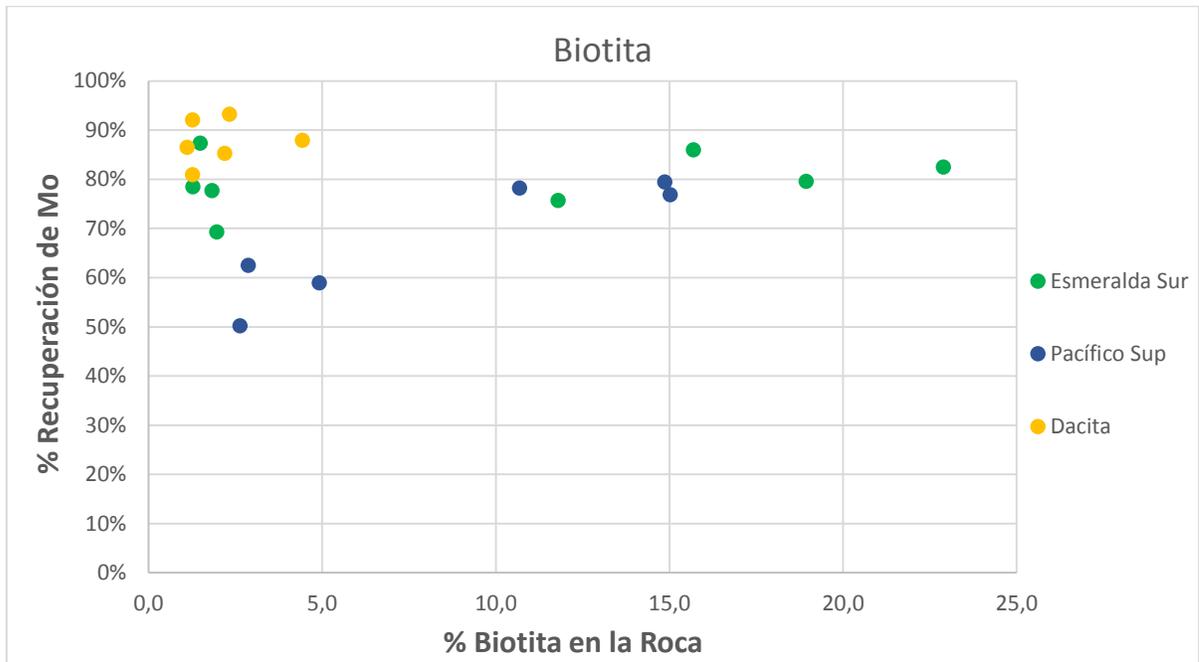


Gráfico 4.16: Recuperación de Mo vs % Biotita en la muestra

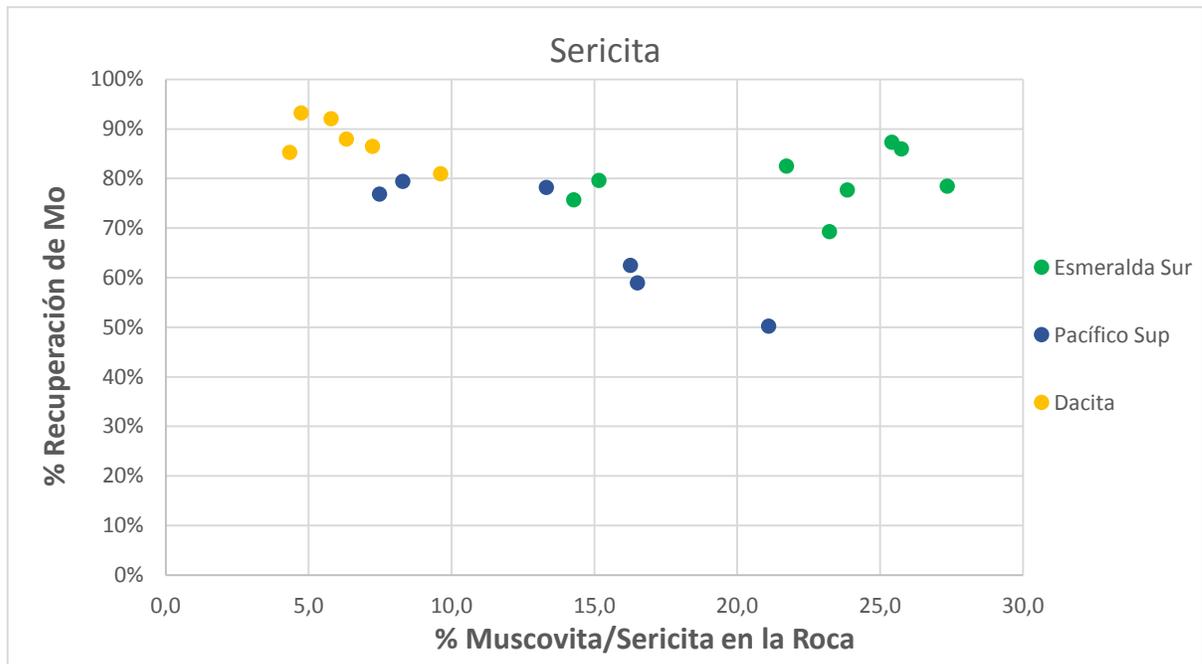


Gráfico 4.17: Recuperación de Mo vs % Muscovita/Sericita en la muestra

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las distribuciones de probabilidad realizadas podemos comprobar que tanto la ley de Cobre y de Molibdeno en el yacimiento El Teniente presentan una distribución asimétrica, con una Ley media de 0,86 y 0,02 respectivamente. Del Gráfico 4.2 se evidencia que la frecuencia de muestras disminuye de manera exponencial a medida que aumenta la Ley de Mo, además muestra como el 10% de las muestras presenta una Ley de Mo superior al 0,05% lo cual se considera alto y un 2% muestra leyes superiores al 0,1%. Al observar el Gráfico 4.3 se ve que no existe una relación directa en el yacimiento entre la mineralización de Cu y la mineralización de Mo.

5.1 LEY DE MO VS RECUPERACIÓN DE MO

Se observa en la Tabla 4.4 que las recuperaciones más bajas de Molibdeno suceden cuando la litología de la roca corresponde al Complejo de Brechas Braden, siendo la recuperación media menor al 50%. De los intrusivos félsicos, la Tonalita Sewell presenta la recuperación media más baja con 74%. La Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico tiene una recuperación media de 71%, siendo la más baja de las Brechas Ígneas. Por último la Brechas Hidrotermales con la menor recuperación son las Brechas de Turmalina con un 66% de recuperación de Mo. En tanto las recuperaciones medias más altas ocurren en las muestras de roca del Pórfido Diorítico y las Brechas de Cuarzo con un 82 y 85% respectivamente. Otra observación que puede realizarse respecto a la recuperación de Molibdeno es que la mayor varianza de los registros se encuentra en las muestras de PDA y CMET, estas litologías presentan a su vez los valores mínimos y máximos de la Recuperación Rougher de Molibdeno, lo que se evidencia en la Tabla 4.5 y el Gráfico 4.4. También se puede observar en la Tabla 4.4 que las leyes de Molibdeno más altas se encuentran en las Litologías de Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (0.075%), Brechas de Cuarzo (0.047%) y Brechas de Turmalina (0.041%). Mientras que las leyes más bajas se encuentran en las unidades intrusivas de Tonalita (0,01%) y Pórfido Dacítico (0,014%). De la Tabla 4.6 y el Gráfico 4.5 se observa que los valores máximos de las Leyes de molibdeno se aprecian en el Complejo Máfico El Teniente, llegando a leyes de 0,44% de Mo, le sigue el Pórfido Diorítico con una ley máxima de 0,15% de Mo.

Del Gráfico 4.6 el cual compara la distribución de los datos de Ley de Mo con los datos de recuperación de Mo, se puede ver una leve relación entre ambos parámetros, en donde se realizó un ajuste exponencial para encontrar el modelo con mejor coeficiente R^2 , el cual es de 0,39. Del mismo gráfico también se observa que la varianza de los datos de Recuperación de Mo va disminuyendo a medida que aumenta la Ley de Mo, lo que implica que para leyes más altas, la curva logarítmica calculada en el ajuste representa de mejor manera los datos.

De la Tabla 4.7 se ve que el CMET abarca el 71% de las muestras consideradas para el modelo y al observar el Gráfico 4.7 se aprecia que el ajuste logarítmico para las muestras de CMET presenta muchas semejanzas con el ajuste logarítmico de todo el universo de muestras y también presenta un coeficiente R^2 similar.

Al segregar las muestras por litología y crear modelos de curvas de la distribución de los datos nos encontramos que las muestras de Tonalita y Brecha de Anhidrita son las que presentan la peor correlación entre la Ley de Mo y la Recuperación Rougher de Mo. Mientras que para las muestras de PDI, PDA y BXIPDA, los ajustes realizados presentan un R^2 superior a 0,6. Del Gráfico 4.7 podemos observar que las muestras de Tonalita presentan los valores de recuperación más bajos a medida que aumenta la Ley. A su vez observamos que el Pórfido Dacítico y la Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico presentan modelos logarítmicos donde la recuperación de Mo aumenta considerablemente conforme aumenta la Ley de Mo. De manera intermedia entre los 2 casos anteriores y con ajustes logarítmicos similares se encuentran los modelos realizados para las muestras de roca con litología de CMET y las de Pórfido Diorítico.

5.2 FACTOR K VS RECUPERACIÓN DE MO

Del Gráfico 4.8 se puede apreciar la existencia de una leve correlación entre el Factor K de Molibdeno y la Recuperación Rougher de Molibdeno, siendo una curva exponencial el mejor ajuste que modela esta correlación. En la Tabla 4.8 se verifica que este ajuste mejora al segregar las muestras en base a su Litología con excepción de las Brechas de Anhidrita y del Pórfido Diorítico. Sin embargo al observar en el Anexo B el Gráfico 9.9 se encuentra una clara dependencia entre ambos parámetros geometalúrgicos (el Factor K y la Recuperación Rougher) en las muestras de PDI, aunque ésta no presente un coeficiente R^2 alto. De las litologías que presentan un mejor factor de correlación y por tanto un mejor ajuste exponencial se encuentra las muestras de Tonalita con un coeficiente de 0,78 del ajuste calculado, el Pórfido Dacítico también presenta modelo bien representativo con un factor R^2 del 0,61.

Las muestras de roca del Complejo Máfico El Teniente corresponden al 70% del total de las muestras que presentan datos de Molibdeno no sulfurado y de ensayos de flotación rougher. También presentan un coeficiente de correlación cercano al total de las muestras y una mayor dispersión de los datos que el resto de las litologías.

En el Gráfico 4.9 donde se puede apreciar la comparación entre las diferentes curvas podemos distinguir 3 familias de curvas, la primera corresponde a las muestras de CMET, Brechas Hidrotermales y Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico, la segunda corresponde a los Pórfidos Dacítico y Diorítico, la tercera familia de curvas pertenece a la Tonalita y las Brechas Ígneas de Tonalita y Pórfido Diorítico. De este gráfico se observa que las muestras de roca pertenecientes a la Tonalita Sewell presentan los valores de recuperación más bajos, llegando a valores de 37%. Al mismo tiempo se ve que el CMET en promedio tiene las recuperaciones más altas de Molibdeno. Finalmente las curvas de los Pórfidos Dacítico y Diorítico muestran que la recuperación de Molibdeno en función del Factor K es mayor que la registrada en las muestras de Tonalita y menor que la de las muestras del CMET, para un mismo Factor K. No obstante, las muestras de Pórfido Dacítico presentan la mayor Recuperación Rougher de Molibdeno cuando el Factor K es menor al 13%.

5.3 CORRELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS

Al aplicar el cálculo del Coeficiente de Correlación de Pearson entre todos los parámetros geoquímicos, geometalúrgicos y mineralógicos de interés, se pueden realizar diversas observaciones. En la Tabla 4.9 podemos apreciar que para 1254 muestras registradas en la base de datos, la única correlación negativa importante encontrada ocurre entre el Factor K de Mo y la Recuperación de Mo la cual es de -0,654, lo cual concuerda con lo observado en el Gráfico 4.8. Correlaciones positivas importantes solo se encuentran 3 y corresponden a la relación existente entre la Ley de Mo y el porcentaje de Mo en las muestras de Concentrado, el porcentaje de Mo en las muestras de Relave y el Porcentaje de Molibdenita en las muestras de Cabeza.

Al analizar las correlaciones logarítmicas detalladas en la Tabla 4.10 podemos ver que aparecen nuevas correlaciones de importancia como la existente entre la Recuperación de Mo y el porcentaje de Mo en las muestras de Concentrado. También es importante destacar, a pesar de no ser un coeficiente muy elevado, la correlación de 0,457 existente entre el porcentaje de Molibdenita en la roca y el porcentaje de Mo en las muestras de relave. A la vez aparecen importantes correlaciones logarítmicas negativas, las principales se dan entre el Factor K de Mo y los siguientes parámetros, %Cu_Cab, %Mo_Cab, %Rec_Mo, %Mo_Conc, %Mo_Rel; todas superiores a -0,5 siendo el más importante el existente entre el Factor K y el %Mo_Cab, el cual es de -0.82.

Al correlacionar los parámetros geometalúrgicos de mayor interés con la mineralogía se observa en la Tabla 4.11 que existe una correlación triple entre la Ley de Mo, el porcentaje de Molibdenita y el porcentaje de Powellita en la roca, con un factor de correlación lineal mayor al 0,8. También se puede visualizar una correlación de 0,571 entre la Ley de Mo y el % de calcita en la roca. Las únicas otras correlaciones importantes que se pueden apreciar son la correlación existente entre el porcentaje de Molibdeno no sulfurado y el de Actinolita y Tremolita presentes en la roca. La Tabla 4.13 muestra los Coeficientes de Correlación de Pearson entre los parámetros geometalúrgicos de interés y los componentes geoquímicos de la roca. De esta tabla destacan las correlaciones positivas entre el %Mo_Cab y los valores de %Re y %CO₂ con un coeficiente de 0,673 y 0,862 respectivamente. También destaca la correlación lineal positiva existente entre el %Rec_Mo_Ro y el %Re de 0,733 y la correlación negativa entre el %Rec_Mo_Ro y el %Mn de -0,628.

5.4 CORRELACIONES POR LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN

Al analizar los resultados de las 728 muestras que presentan datos geometalúrgicos y de mapeo de alteración nos encontramos en la Tabla 4.14 no se aprecia ninguna correlación importante entre estos parámetros, siendo el factor más destacado el de 0,212 entre el factor K y la Alteración HP. Al ver la Tabla 4.15 de correlaciones logarítmicas vemos que la tendencia se mantiene, con excepción de algunos coeficientes de mayor importancia que aparecen en relación a la Alteración Pre TM. Sin embargo debido a que estos coeficientes no son mayores a 0,45 y que la alteración PreTM se encuentra en proporciones sumamente bajas en el yacimiento, no es relevante destacar estas correlaciones.

En el Gráfico 4.10 podemos observar los porcentajes de alteración por litología de acuerdo a las muestras de la base de datos. Se observa que la Alteración TM domina sobre todo el Yacimiento El Teniente en todas las litologías, abarcando más del 70% en promedio de toda la roca en el yacimiento. La excepción a este dominio de alteración TM se encuentra en el Complejo de Brechas Braden donde el 100% de la roca se encuentra bajo una alteración HT. En los cuerpos intrusivos y Brechas Ígneas se aprecia un dominio de la alteración HP por sobre la HT, a su vez en las Brechas Hidrotermales se aprecia un dominio HT por sobre la HT, mientras que las muestras de CMET reflejadas en el gráfico indican que la alteración HT y la alteración HP se presentan en similares proporciones.

Debido a que nuevamente se realizó una segregación de las muestras por litología de manera de encontrar mejores correlaciones entre los parámetros, es necesario analizar los resultados de las correlaciones realizadas por litología. En general las correlaciones destacadas lineales y logarítmicas entre los parámetros geometalúrgicos principales se mantuvieron o aumentaron una vez que se realizó la segregación de las muestras por litología. Por otra parte, aparecen correlaciones lineales y logarítmicas destacables entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración de la roca.

De la Tabla 4.17 se observa que para las muestras pertenecientes al Complejo Máfico El Teniente, no existen correlaciones importantes entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración. Tendencia que se mantiene al observar las correlaciones logarítmicas en Anexos en la Tabla 9.6, salvo por una leve correlación positiva de 0,52 entre la alteración Pre TM y el Factor K, la cual cabe en la posibilidad de ser falsa, puesto a la baja cantidad de alteración Pre TM registrada en la base de datos.

En la Tabla 4.18 se observan las correlaciones lineales realizadas para las muestras de Tonalita, en donde destaca una correlación positiva entre la Ley de Mo y el porcentaje alteración TM y HT presente en la roca, y una correlación negativa importante (mayor a -0.6) con el porcentaje de alteración HP. También aunque el factor de correlación lineal no sea alto se resalta el hecho de que el Factor K presenta una correlación positiva mayor a 0.4 con el f(HP) y una correlación negativa de -0.453 con el f(HT), contrario a lo que sucede con la recuperación que presenta una leve correlación positiva con el f(HT) y negativa con el f(HP). Al observar las correlaciones logarítmicas en anexos en la Tabla 9.7 entre los mismos parámetros se evidencia que se mantienen o acentúan las mismas tendencias de los coeficientes de correlación lineales.

Para las muestras con litología de Pórfido Dacítico se puede ver en la Tabla 4.19 que existe una importante relación lineal entre el Factor K y el grado de alteración, siendo de -0.766 para el %TM y de 0,778 para el %HP, esto se ve reflejado de manera inversa para las correlaciones entre la recuperación del Molibdeno y la alteración de la roca.

Una ligera correlación positiva entre la alteración HP y la ley de Mo se observa en la Tabla 4.20 que señala las correlaciones lineales calculadas para las muestras de Pórfido Diorítico. En Anexos, en la Tabla 9.9 se puede apreciar una correlación logarítmica negativa destacada entre la recuperación de Mo y la alteración HT (-0,542), y entre el Factor K de Mo y el grado de alteración TM (-0,589).

Para las muestras de BXIPDI se ve una notoria correlación negativa entre la alteración HP y la recuperación de Mo, además éste último parámetro presenta una correlación positiva superior a 0.6 tanto con el %TM como con el f(HT). La correlación positiva que existe con el factor f(HT) probablemente se asocia a la correlación negativa de -0.843 ya mencionada entre el %HP y el %Rec_Mo_Ro. Las correlaciones logarítmicas de la Tabla 9.10 en anexos señalan las mismas tendencias de las correlaciones lineales observadas en la Tabla 4.21.

En la Tabla 4.22 que indica los resultados para las muestras correspondientes a Brecha de Anhidrita se puede observar una importante correlación positiva de 0,944 entre el porcentaje de Molibdeno no sulfurado y el %HT, y una correlación negativa destacable entre el %MoNS y el %TM la cual es -0,852. Al estudiar las correlaciones logarítmicas para esta litología se aprecia que las relaciones entre los parámetros anteriores se mantienen y aparece una leve correlación positiva entre el Factor K y el %HT. Estos resultados encontrados en las muestras de BXANH son de gran importancia para poder caracterizar el Molibdeno no sulfurado presente en todo el yacimiento.

Al recopilar todos los datos del análisis por litología se encuentran fenómenos en común para las correlaciones de cada litología. Por ejemplo se mantiene la tendencia general que existe una correlación positiva entre la recuperación de Mo y la Ley de Mo, y una correlación negativa entre la recuperación de Mo y el Factor K. Esto puede observarse en la síntesis de los datos expuesta en la Tabla 5.1

Tabla 5.1: Recopilación de Correlaciones lineales entre variables geometalúrgicas para las diferentes litologías

Litología	%Rec_Mo/ %Mo_Cab	%Rec_Mo/ Factor K
CMET	0,419	-0,603
TO	0,610	-0,919
PDA	0,781	-0,866
PDI	0,355	-0,753
BXANH	0,463	-0,679
BXIPDI	0,148	0,006

A su vez en el análisis se obtiene que para las muestras de TO, PDA y BXIPDI se presenta una correlación negativa entre el %Rec_Mo_Ro y el %HP o f(HP). Se encuentran otras correlaciones comunes entre estas litologías como una correlación positiva entre la recuperación y el %HT o f(HT). En la Tabla 5.2 puede observarse la recopilación de estos análisis.

Tabla 5.2: Correlaciones entre la Recuperación de Mo y de alteración para las diferentes litologías

Alteración	CMET	TO	PDA	PDI	BXANH	BXIPDI
	%Rec_Mo	%Rec_Mo	%Rec_Mo	%Rec_Mo	%Rec_Mo	%Rec_Mo
%TM	0,154	-0,100	0,606	-0,061	0,278	0,651
%HP	-0,199	-0,276	-0,608	0,262	-0,052	-0,843
%HT	-0,060	0,332	0,400	-0,198	-0,248	0,097
f(HP)	-0,193	-0,438	-0,287	0,196	-0,068	-0,640
f(HT)	0,193	0,438	0,287	-0,196	0,068	0,640

5.5 SECTORIZACIÓN DE MUESTRAS

5.5.1 Segregación por ubicación del Complejo Máfico El Teniente

Para las diferentes agrupaciones a las cuales se les aplicaron correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos y geológicos, se mantienen en general las tendencias para los Coeficientes de Correlación de Pearson entre los parámetros geometalúrgicos dispuestos en la Tabla 4.17. Para algunas agrupaciones se pierde la correlación positiva existente entre la Ley del Mo y el porcentaje de Molibdenita presente en la roca, por ejemplo en las muestras cercanas al PDA, esto es debido a que al realizar la segregación de las muestras existen agrupaciones que presentan muy bajos valores del %Molibdenita en los datos, sin embargo en la mayoría de las agrupaciones esta correlación todavía se puede apreciar claramente. Otras tendencias se acentúan para cada una de las agrupaciones, por ejemplo la correlación positiva que existe entre la recuperación de Mo y la Ley de Mo, o la correlación negativa entre la recuperación de Mo y el Factor K, lo que se puede apreciar según la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Recopilación de Correlaciones lineales entre variables geometalúrgicas para las agrupaciones de CMET

Agrupación CMET	%Rec_Mo_Ro/ %Mo_Cab	%Rec_Mo_Ro/ Factor K
/PDA	0,354	-0,811
/PDI	0,657	-0,844
/TO	0,482	-0,838
/CBB	0,492	-0,523
/RS	0,685	-

Otra tendencia importante que podemos observar es que para la mayoría de las agrupaciones de las muestras de CMET al analizar el %Mo_Cab se evidencia una leve correlación positiva con el f(HT) y una correlación negativa con el f(HP), como se indica en la Tabla 5.4. En las muestras cercanas a la Tonalita es donde se observan los mejores coeficientes, mientras que en las muestras cercanas a la Brecha Braden y las pertenecientes al Rajo Sur no se aprecian las correlaciones de manera evidente.

Tabla 5.4: Recopilación de Correlaciones lineales entre la Ley de Mo y la alteración para las agrupaciones de CMET

Alteración	Agrupación CMET				
	/PDA	/PDI	/TO	/CBB	/RS
	%Mo_Cab	%Mo_Cab	%Mo_Cab	%Mo_Cab	%Mo_Cab
%TM	0,106	0,030	-0,275	-0,072	-0,130
%HP	-0,116	-0,109	-0,258	-0,029	0,277
%HT	-0,012	0,143	0,496	0,090	-0,075
f(HP)	-0,328	-0,314	-0,586	-0,139	0,114
f(HT)	0,328	0,314	0,586	0,139	-0,114

Al comparar las correlaciones de Recuperación Rougher de Molibdeno y del Factor K con los grados de alteración de las muestras de CMET también es posible encontrar criterios en común. Uno de los más relevantes es que para todas las agrupaciones de muestras de CMET, con excepción de las muestras cercanas al PDA, puede verse una leve correlación negativa entre la Recuperación de Molibdeno y el f(HP), y una correlación positiva entre la Recuperación de Molibdeno y el f(HT).

Tabla 5.5: Recopilación de correlaciones lineales entre los parámetros geometalúrgicos y la alteración para las agrupaciones de CMET

Agrupaciones CMET	Parámetros Geometalúrgicos	Grado de Alteración		Factor HP/HT	
		HP	HT	f(HP)	f(HT)
/PDA	Factor K	-0,077	-0,044	0,136	-0,136
	Rec Mo	0,016	-0,198	-0,084	0,084
/PDI	Factor K	0,052	-0,128	0,411	-0,411
	Rec Mo	-0,090	0,113	-0,350	0,350
/TO	Factor K	0,162	-0,442	0,539	-0,539
	Rec Mo	-0,248	0,477	-0,537	0,537
/CBB	Factor K	-0,188	0,025	-0,055	0,055
	Rec Mo	-0,328	-0,055	-0,409	0,409
/BBW	Factor K	-0,306	-0,021	-0,164	0,164
	Rec Mo	-0,315	-0,050	-0,430	0,430
/BBE	Factor K	0,075	-0,076	0,044	-0,044
	Rec Mo	-0,252	0,186	-0,101	0,101
/RS	Factor K	-	-	-	-
	Rec Mo	0,025	0,426	-0,348	0,348

5.5.2 Segregación por Límite HT_HP

En la Figura 4.15 se muestra indicado con color verde, el límite HT_HP, el cual marca la transición entre una zona geotécnica (celeste) con regular hundibilidad y fragmentación y una calidad geotécnica buena, a una zona geotécnica (rojo) con una muy buena hundibilidad y fragmentación y una regular calidad geotécnica. Además se muestra la ubicación de las muestras que fueron clasificadas dentro de uno de los dos dominios hidrotermales.

Se confirma de la Tabla 4.30 que el límite HT_HP efectivamente marca un cambio de la influencia de los diferentes eventos hidrotermales, ya que se puede ver claramente un cambio drástico en la proporción del porcentaje de alteración Hidrotermal Principal e Hidrotermal tardía en la roca, al comparar las muestras pertenecientes al dominio HP y al dominio HT. También se aprecia que no se presenta un cambio significativo en el porcentaje de la alteración tardimagmática el cual es de 82% aproximadamente para ambos dominios.

Al comparar los promedios de los parámetros geometalúrgicos para ambos dominios para todas las muestras en la Tabla 4.31, se observa que presentan similares características, con una leve mayor ley y recuperación de Mo para el dominio HT. Pero como se puede apreciar de la Tabla 4.32, Tabla 4.33 y Tabla 4.34, una vez que se comparan los resultados por litología se observa una evidente distinción entre un dominio y otro. Tanto para las muestras de CMET y de Tonalita la recuperación de Mo es más de un 8% mayor en las muestras pertenecientes del dominio HT. La Ley de Mo promedio también es mayor para las muestras del dominio HT, esta diferencia de la Ley es más significativa en las muestras de Tonalita donde para el dominio HT la Ley promedio de Mo es de 0,038 y para el dominio HP es de 0,015. No se aprecian diferencias significativas entre los dominios hidrotermales para las muestras de PDI, presentando los valores más altos de recuperación (84%) y ley (0.04%) de Molibdeno para ambos dominios.

5.5.3 Segregación por Zonas Geotécnicas

Como puede observarse en la Tabla 4.37, la Ley de Mo para cada Zona Geotécnica es similar, con valores que rondan el 0,026%. La única excepción se aprecia en la zona secundaria donde la Ley de Mo es particularmente baja con valores de 0.009% promedio, en la zona secundaria se observan también, bajos valores del porcentaje de recuperación y altos valores del Factor K, siendo éstos últimos valores superiores al 25%. A su vez, a excepción de la zona geotécnica primaria 1 (Pipa) y la zona secundaria, los valores de %Rec_Mo_Ro son relativamente similares y superiores al 76%. La zona primaria 1 además presenta mayores valores promedio de MoNS de 0.004%.

De la Tabla 4.38 se desprenden 3 observaciones relevantes. En primer lugar no se aprecian correlaciones relevantes entre la Ley de Mo y la Recuperación de Mo para ninguna zona geotécnica. Segundo, la recuperación presenta una correlación negativa importante con el %MoNS para las muestras de la zona primaria 1, es decir las muestras de la Pipa Braden. Por último se observa una fuerte influencia del Factor K sobre la recuperación de Mo para las zonas primarias 4, 5 y para la zona secundaria.

5.6 CARACTERIZACIÓN DE LA MOLIBDENITA

5.6.1 En muestras de roca

En base a las descripciones realizadas en las muestras de roca y las observaciones las vetillas en los tramos de sondaje, es posible realizar un análisis de que abarca la información de la ocurrencia y mineralización de la molibdenita en base a su abundancia y tipo de alteración en la que ésta se encuentra.

- 1. En vetillas Tardimagmáticas:** Estas vetillas son una de las principales fuentes de mineralización de Molibdenita en el yacimiento. Si la Molibdenita se encuentra de manera abundante en vetillas TM, ésta suele aparecer en cúmulos lentiformes en vetillas de Cuarzo y Anhidrita, sutura de vetillas de Cuarzo y Anhidrita, y rara vez en rosetas mostrando su hábito de láminas finas hexagonal. De manera menos abundante la Molibdenita se suele dar en cúmulos asociada a Calcopirita y Bornita, y en sutura de vetillas de Cuarzo. Si la Molibdenita es escasa en las vetillas Tardimagmáticas, normalmente se encuentra diseminada en las vetillas o en la roca asociada a Calcopirita y Bornita.
- 2. En vetillas Hidrotermal Principales:** La Molibdenita se encuentra de manera escasa en esta alteración y solo asociada a Calcopirita masiva en las vetillas, su estilo de mineralización en estas vetillas es en cúmulos lentiformes.
- 3. En vetillas Hidrotermal Tardías:** La otra gran fuente de Molibdenita en el yacimiento, estas vetillas suelen tener alto contenido de Molibdenita asociada frecuentemente a Anhidrita y un halo sericítico. Si la Molibdenita se encuentra de manera abundante en esta alteración, suele aparecer de manera diseminada fina y el contenido de vetillas aumenta, también puede aparecer diseminada en grandes cantidades en la matriz de brechas hidrotermales de Cuarzo, Anhidrita, Sulfuros o Turmalina, o en sutura de vetillas HT asociada a Anhidrita y en menor frecuencia a Yeso y Carbonatos. Si la Molibdenita se encuentra menos abundante, ésta se encuentra de manera diseminada fina en asociación con calcopirita. Si la Molibdenita se encuentra en trazas en la roca con alteración HT, ésta suele encontrarse de forma diseminada fina o en patina rellenando vetillas y fracturas, pero no en grandes cantidades, también pueden aparecer pequeños cúmulos de Molibdenita asociado a Yeso, Anhidrita, Cuarzo-Sericita y Carbonatos.

5.6.2 En mineralogía óptica

El mismo análisis realizado para la caracterización macroscópica de la Molibdenita, en muestras de roca, se realizó para la caracterización en mineralogía óptica. En los cortes descritos se reconoce que ciertos estilos y asociaciones se encuentran particularmente asociados a una alteración determinada. Por lo general no se encontraron diferencias significativas en la ocurrencia, estilo de mineralización o asociaciones minerales de la Molibdenita entre las muestras de diferentes litologías. No obstante si se pueden distinguir variaciones importantes dependiendo de la etapa de alteración en la que ocurrió la mineralización de Molibdenita. De las observaciones realizadas para todos los eventos de alteración los cristales de Molibdenita presentan forma laminar y elongada. Sin embargo su tamaño varía dependiendo del estilo de mineralización y de la alteración en la que la Molibdenita creció.

- 1. En vetillas Tardímagmáticas:** El tamaño de los cristales de Molibdenita encontrados en las vetillas TM es muy variable, se encuentran cristales con un largo que va desde los 40 μm a los 2500 μm , además el tamaño de los cristales no es totalmente dependiente del estilo de mineralización, asociación mineral, ni de la abundancia de Molibdenita en la muestra. El estilo de ocurrencia de la Molibdenita es frecuente encontrar suturas de cristales finos, sutura cristalina, cúmulos grandes y cristales diseminados fuera de la vetilla. También pueden observarse de manera más escasa cristales grandes aislados, bordes finos de vetillas, o cristales anhedrales diseminados o en asociación con sulfuros. La frecuencia de mineralización de la Molibdenita es alta y se encuentra preferentemente en el CMET, intrusivos félsicos y brechas ígneas. Principalmente se encuentra asociada a minerales de ganga como cuarzo y sericita y menor medida a sulfuros de cobre como bornita y calcopirita.
- 2. En vetillas Hidrotermales Principales:** La mineralización de Molibdenita es de baja frecuencia y siempre asociado a la mineralización de calcopirita masiva. La Molibdenita se suele encontrar formando pequeños cúmulos cuyos cristales se encuentran en forma radial o sin orientación preferente, también pueden llegar a observarse cúmulos lentiformes pequeños. La calcopirita se encuentra masiva asociada en los bordes de los cristales de Molibdenita rodeando los cúmulos.
- 3. En vetillas Hidrotermales Tardías:** La Molibdenita presenta un significativo cambio en su tamaño y estilo de mineralización, generalmente se encuentran cristales muy finos y delgados con un largo menor a los 75 μm , el cual varía dependiendo del estilo de mineralización. Habitualmente los cristales se encuentran de tamaño muy fino (<10 μm), rellenando vetillas o en la matriz de brechas hidrotermales, también pueden encontrarse en el halo de las vetillas y rellenando espacios intergranulares en donde se observan cristales de un mayor tamaño. Las asociaciones minerales que se encuentran con la Molibdenita son principalmente con sulfatos como Anhidrita y Yeso, y en ocasiones se ven asociados a sericita, rara vez se observan asociados a otros silicatos o sulfuros.

5.6.3 En mineralogía QEMSCAN

Al comparar los datos obtenidos luego de los ensayos químicos y de flotación de las 20 muestras, no se puede distinguir una relación entre la Ley de Mo y la recuperación de Mo. Lo que indica que otros factores deben marcar una influencia importante entre estos 2 parámetros, como por ejemplo la litología y alteración de la roca, ubicación dentro del yacimiento, etc. Estos factores influyen de manera directa en la distribución y la ocurrencia de la Molibdenita lo que marca el comportamiento del Mo en los resultados de las muestras.

Se observa en el Gráfico 4.11 que las muestras que presentan los valores de recuperación más altos también muestran los mayores porcentajes de Molibdenita libre en la roca. A su vez, como tendencia general a medida que aumenta la cantidad de Molibdenita asociada a partículas complejas o a minerales pesados como la pirita, y que disminuye la Molibdenita libre en la muestra, los valores de recuperación de Mo tienden a descender.

Al estudiar el Gráfico 4.12, se evidencia que la mayoría de las muestra se comportan bajo una misma directriz, donde la Recuperación de Mo es mayor si el porcentaje de Molibdenita libre es más elevado, y disminuye a medida que aumenta el porcentaje de Molibdenita ocluida.

No se distingue una tendencia clara al observar los resultados de tamaño de los cristales de Molibdenita en relación a la recuperación de Mo en el Gráfico 4.13. Sin embargo en el Gráfico 4.14 se evidencia que la mayoría de las muestras con altos porcentajes de recuperación presentan altos porcentajes de cristales de Molibdenita libres de tamaño mayor a 12 μm . Estas muestras también presentan los mayores porcentajes de cristales de Molibdenita de tamaño mayor a 45 μm según el mismo gráfico. También se observa que por lo habitual, las muestras con menor recuperación presentan una alta cantidad de cristales de Molibdenita ocluidos y también aumenta la proporción de cristales ultra finos (<12 μm).

Al analizar el Gráfico 4.15, no se puede observar ninguna relación entre el porcentaje de filosilicatos presente en la roca con el porcentaje de recuperación de Mo. Si se analizan la influencia de los minerales estudiados de manera independiente en el Gráfico 4.16 y Gráfico 4.17 se evidencia que el comportamiento de la Biotita y la Sericita es muy diferente, a pesar de que ambos minerales corresponden al grupo de los filosilicatos y presentan porcentajes similares en las muestras. Tampoco puede apreciarse una relación con la recuperación de Mo para ninguno de los 2 minerales, no obstante, al excluir las muestras correspondientes al sector Esmeralda Sur se aprecia que en el Gráfico 4.17 aparece una tendencia de la recuperación de Mo a disminuir a medida que aumenta la cantidad de Muscovita/Sericita en la roca.

6 DISCUSIÓN

6.1 PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS QUE CONTROLAN LA RECUPERACIÓN DE MO

En base a los primeros análisis de los estudios realizados se determinó que existen 2 parámetros geometalúrgicos que presentan una fuerte relación con la recuperación de Mo en el Yacimiento:

1. El primero es la Ley de Mo presenta una relación Logarítmica positiva con la recuperación de Mo, se destaca también el hecho de que esta relación se hace más representativa a medida que aumenta la Ley. En el Gráfico 4.6 se aprecia una disminución de la varianza de los datos de recuperación de Mo a medida que la Ley aumenta. Esta disminución de la varianza puede deberse al hecho que a leyes de Mo muy bajas los datos se encuentran muy cercanos al límite de detección del laboratorio, lo que traería inconsistencias en los datos. La explicación de esta relación radica principalmente en el proceso de flotación, como la Molibdenita es el principal aporte de Mo en el yacimiento, al haber mayor Ley de Mo indica que existe mayor contenido de Molibdenita en la roca, los cristales tenderán a presentar un mayor tamaño y ser más abundantes, disminuyendo la probabilidad que no floten producto de que se encuentran ocluidos o sean arrastrados por otros minerales.
2. El segundo es el Factor K, es decir la proporción de Molibdeno no soluble (MoNS) en el yacimiento en relación al total de Mo. Este parámetro presenta una relación negativa exponencial con la recuperación de Mo como se aprecia en el Gráfico 4.8, donde puede verse una zona de influencia entre ambos parámetros. Esta relación negativa coincide con lo esperado por la teoría ya que en el proceso de flotación el MoNS no tiende a flotar a no ser que sea por arrastre debido a otras partículas, por lo que al aumentar la proporción de estos minerales no solubles con contenido de Molibdeno, la recuperación de Mo debería disminuir. Es necesario realizar una caracterización del MoNS, identificar los minerales que se catalogan dentro de esta categoría y dónde se encuentran en el yacimiento.

Para ambos casos las relaciones se comportan de manera diferente dependiendo de la litología de las muestras estudiadas, en general las relaciones mejoran al estudiar las muestras de cada litología por separado. Sin embargo existen excepciones como las muestras de Brecha de Anhidrita, para la cual el factor R^2 es muy bajo para ambos casos, la explicación de este hecho puede deberse a 2 razones. La primera es que las muestras de Brecha de Anhidrita están distribuidas en varios sectores del yacimiento y no pertenecen a una sola brecha, por ende sus características geometalúrgicas pudieran verse influenciadas por otros parámetros geológicos. La segunda es la posibilidad que las Brechas de Anhidritas sean una litología en donde la recuperación de Molibdeno no se comporte de manera habitual y no sea controlada ni por la Ley de Mo, ni por el Factor K. Debido a que no se dispone de muestras suficientes con datos geoquímicos y geometalúrgicos, no se puede comprobar cuál de las 2 explicaciones resulta ser la más correcta.

Otro caso particular se encuentra en las muestras de Tonalita donde si bien no se encuentra la existencia de un control sobre la recuperación de Mo por parte de la Ley, si existe un control importante de parte del Factor K con un coeficiente de R^2 de 0,79. Puesto que las muestras de Tonalita presentan las leyes de Mo más bajas, no existe un gran rango de datos como para observar una relación entre la recuperación de Mo y la Ley de Mo, como se puede ver en el Gráfico 4.7. Bajo este mismo argumento se explicaría que las muestras de Tonalita presentan los valores de recuperación de Mo más bajos de los intrusivos del yacimiento. La explicación de que la Tonalita presente la más baja Ley de Mo en el yacimiento es debido a que su emplazamiento corresponde al primer evento Intrusivo félsico y uno de los primeros eventos tardimagmáticos en el yacimiento en donde no hubo una mineralización importante tanto de Cu como de Mo.

En cuanto a los otros cuerpos intrusivos félsicos, se aprecia de la Tabla 4.7 y Tabla 4.8 que las muestras que corresponden al Pórfido Dacítico presentan que su recuperación de Mo se encuentra fuertemente controlada tanto por la Ley de Mo como por el Factor K y se ajustan de manera precisa a los modelos planteados en el Gráfico 4.7 y el Gráfico 4.9. Por otro lado las muestras de litología Pórfido Diorítico como ya se mencionó tienen el contenido más alto de Mo entre los cuerpos intrusivos, y según la Tabla 4.7 la recuperación y la Ley de Mo tienen una correlación destacable, sin embargo en base a la Tabla 4.8 no sucede lo mismo con la correlación entre la recuperación y el Factor K. La explicación más probable de esto es que los valores de Recuperación de Mo en las muestras de PDI son los más altos de los cuerpos intrusivos y la varianza de estos datos es considerablemente menor a la varianza de los datos del Factor K, por lo que lo más probable es que exista un control del Factor K sobre la recuperación en las muestras de PDI que pudiera apreciarse en el anexo en el Gráfico 9.9. Las altas leyes encontradas en estas muestras se explican por los fluidos tardimagmáticos altamente mineralizados tanto con Cu como Mo en todos los Pórfidos Dioríticos, caso distinto sucede con el Pórfido Dacítico donde los fluidos que circularon luego de su intrusión presentan un mayor contenido de Cu pero un mucho menor contenido de Mo, lo que se refleja en la Ley promedio de Cu y Mo de ambas litologías. Existe una alta probabilidad que existan otros controles geológicos sobre la Recuperación de Mo en los Pórfidos Dioríticos, debido a que éstos se emplazaron en una franja NS en el sector Noreste del yacimiento, por lo tanto algunos se encuentran más cercanos a la Brecha Braden mientras otros tienen una mayor influencia de la Tonalita o del PDA, por lo que las condiciones que afectaron a la roca a lo largo de la formación del yacimiento varían dependiendo de su ubicación.

Para las muestras que corresponden al Complejo Máfico El Teniente, la estadística realizada presenta el mismo problema que se observa cuando se estudia todo el universo de muestras. Las muestras de CMET corresponden al 70% del total de muestras y se distribuyen por todo el yacimiento, lo que indica que en diferentes sectores del CMET existen diversos parámetros geológicos que pueden estar influyendo en los resultados de las muestras, éstos pueden ser alteración de la roca, su cercanía con otras litologías del yacimiento, su grado de fracturamiento, su composición, su textura, entre otros. A esto se suma el hecho que existen 3 subtipos de litología dentro del CMET de acuerdo a su composición y textura. Éstos son gabro, diabasa y pórfido basáltico.

Podemos observar de la Tabla 4.4 que las litologías de BXIPDI y BXQZ son las que presentan las mayores leyes de Mo y a su vez presentan las mayores recuperaciones de Mo en el yacimiento, lo cual resulta muy beneficioso para la producción. Lo más probable es que la recuperación y la Ley de Mo estén fuertemente correlacionadas en estas litologías y por esto la recuperación de Mo sea tan alta, sin embargo no se poseen los datos suficientes en la base de datos para observar una relación entre estos parámetros en un gráfico de distribución, ni para hacer un modelo representativo de esta relación. La alta ley para estas litologías presenta un origen diferente, en las Brechas Ígneas de Pórfido Diorítico, la mineralización viene dada predominantemente por los fluidos tardimagmáticos provenientes de la intrusión de los Pórfidos Dioríticos los cuales presentan alta riqueza en Cu y Mo. En cambio las Brechas de Cuarzo tienen el origen de su mineralización dado por los fluidos hidrotermales tardíos asociados a la brecha marginal, los cuales presentan alta riqueza de Mo.

De la misma Tabla podemos si bien las muestras del Complejo de Brechas Braden presentan altas leyes de Mo (0,039%), su recuperación es baja (43%), lo que indica que existe una gran pérdida de Molibdeno en el proceso de flotación posiblemente debido a la gran cantidad de Molibdenita de tamaño muy fino en la roca, la cual sería no soluble. Pero si se observa las leyes y recuperación de Cu en la tabla se visualiza que son los valores más bajos del yacimiento, por lo que no existe una posibilidad real de que el Complejo de Brechas Braden sea explotado en grandes cantidades, produciendo grandes pérdidas de Cu y Mo.

6.2 CORRELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS

De acuerdo a las Tabla 4.9 y la Tabla 4.10, las correlaciones encontradas concuerdan con la teoría establecida y con los 2 parámetros geometalúrgicos que controlan la recuperación de Mo. De todas las correlaciones que aparecen en estas tablas, es importante destacar la correlación positiva existente entre el %Mo_Cab y el %Mo_Rel, la correlación logarítmica positiva que existe entre el %Molibdenita y el %Mo_Rel y la baja correlación lineal entre el %Molibdenita y el %Mo_cab. Si bien ésta última puede explicarse producto de que las muestras con mayores leyes de Mo no presentan estudios de flotación y por tanto los datos de las muestras de concentrado no presentan registros de altas leyes de Mo, haciendo más difícil observar una correlación. Las otras 2 correlaciones que involucran al %Mo_Rel son de mayor preocupación por las implicancias que éstas traen. La primera es que existe una cantidad de Mo proporcional a la ley de Mo de cabeza, la cual no se está recuperando durante el procesamiento del material, la segunda es que además existe un porcentaje importante de ese Molibdeno perdido que se encuentra en forma de Molibdenita, lo que quiere decir que producto de otros factores como el tamaño de las partículas o el grado de liberación, hay un porcentaje importante de Molibdenita el cual no está flotando. En cuanto a las correlaciones negativas encontradas en la Tabla 4.10 con el Factor K, todas se encuentran dentro de lo esperado ya que los parámetros se encuentran asociados de manera positiva al %Mo_Cab el cual presenta una fuerte correlación logarítmica negativa con el Factor K.

Al estudiar la mineralogía presentada en la Tabla 4.11 se concluye que la correlación triple encontrada entre la Ley de Mo, la Molibdenita y la Powellita presenta un gran sentido con la teoría la cual indica que la principal fuente de Molibdeno en el yacimiento es mediante su versión sulfurada, es decir la Molibdenita, y si bien la Powellita (CaMoO_4) se encuentra de manera más escasa en el yacimiento, su precipitación ocurre producto de la oxidación supérgena de la Molibdenita (MoS_2), por lo tanto se encuentra directamente relacionada con la Ley de Mo en los sectores donde ésta se encuentra. La correlación positiva de 0.507 entre el porcentaje de Mo y de Calcita en el yacimiento ocurre posiblemente debido a que tanto la Molibdenita como la calcita son minerales comunes en la roca afectada por un evento de alteración Hidrotermal Tardía.

Otra correlación importante observada es la encontrada entre el %MoNS y la actinolita y tremolita encontrada en el yacimiento. El MoNS corresponde a Molibdeno no sulfurado o no flotable, el cual ocurre habitualmente en forma de Molibdenita fina y Powellita, estos minerales son característicos de las etapas de alteración Hidrotermal Tardía y eventos supérgenos. A su vez los minerales de actinolita y tremolita son minerales característicos que se encuentran en el frente de avance de la alteración potásica, respecto de la alteración propilítica, es decir son minerales que dan inicio a alteraciones de menor temperatura o un metamorfismo de bajo grado. Esto implica si existen alteraciones de menor temperatura en el yacimiento que la tardimagmática, como la alteración Hidrotermal Tardía, debió haber precipitado previamente actinolita y tremolita al pasar de una alteración potásica a una propilítica con fluidos de menor temperatura. Es por estos argumentos que se explica que exista una correlación lineal positiva asociada al MoNS, la actinolita y la tremolita, ya que estos minerales precipitaron bajo las mismas condiciones.

La explicación de la correlación negativa entre caolinita y la recuperación de Molibdenita se debe a que la caolinita pertenece al grupo de las arcillas, las cuales floculan en el proceso de flotación y se pegan a las burbujas generadas debido a su pequeño tamaño. Por tanto, las arcillas ocupan espacio en la superficie de las burbujas, impidiendo que la Molibdenita se pegue a éstas y pueda flotar, por lo que disminuye la recuperación de Mo.

De la Tabla 4.12 vemos que la correlación existente entre la Calcita y el porcentaje de Mo se mantiene, tanto para las muestras de concentrado, como para las muestras de relave, esto puede implicar 2 acontecimientos. El primero es que no existe una relación concreta entre la Calcita presente en la roca y la Molibdenita. El segundo es que existan 2 clases de minerales de Mo asociados a la calcita, en los cuales 1 tipo es capaz de recuperarse en el proceso de flotación rougher, sin embargo el otro no presenta la capacidad de flotar en el proceso por razones desconocidas. También se observan correlaciones lineales entre el %Mo_Conc y los porcentajes de Anhidrita/Yeso, Tennantita/Enargita y Bornita, los 2 primeros probablemente relacionados a los eventos de alteración Hidrotermal Tardía y la última correlación se debe a los eventos de alteración Tardimagmática que presenta altas cantidades de Bornita y Molibdenita con alta capacidad de flotación en el proceso Rougher.

Se encontraron 2 correlaciones lineales positivas alusivas al %Re en la roca en la Tabla 4.13, el Renio es un elemento que presenta una fuerte afinidad con la Molibdenita y que solo se presenta estable en fases de alta temperatura, además su abundancia aumenta únicamente si existe una gran cantidad de sulfuros de Cu en relación a la cantidad de Molibdenita en el sistema. Por estas razones, las altas concentraciones de Renio se encontraran en vetillas Tardimagmáticas con alta cantidad de Sulfuros y alta presencia de Molibdenita, ya que la temperatura de estos eventos se encuentra entre los rangos de estabilidad del Renio y la alta cantidad de sulfuros aumenta las concentraciones de este elemento el cual tiene una alta compatibilidad con la Molibdenita.

6.3 CORRELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS Y LA ALTERACIÓN

Al observar la Tabla 4.14 es evidente que la alteración como parámetro geológico visto de manera aislada, no presenta un control general sobre las variables geometalúrgicas de interés en el yacimiento. Lo anterior tiene sentido al considerar que los datos obtenidos del yacimiento corresponden a muestras de roca con diversas características litológicas y geotécnicas, las cuales debieran ejercer también un control sobre las variables estudiadas. Para observar este control se realizó en un principio un estudio de alteración por litología en donde observamos en el Gráfico 4.10 que la alteración Tardimagmática predomina en todo el yacimiento con excepción del Complejo de Brechas Braden, además la alteración Hidrotermal Principal es predominante por sobre la alteración Hidrotermal Tardía en las rocas cuya litología corresponde a intrusivos y brechas ígnea, y la alteración HT se hace más presente que la alteración HP en las brechas hidrotermales del yacimiento. El dominio de la alteración TM en el yacimiento es consistente con lo estudiado, puesto a que esta alteración afectó a todo el yacimiento de manera pervasiva y tuvo su origen de los fluidos magmáticos ascendentes originados a partir de los intrusivos. El dominio HP sobre la alteración HT también concuerda con lo esperado según la teoría puesto a que su origen ocurre producto de fluidos hidrotermales los cuales avanzaron por las fracturas y planos de debilidad encontrados a través de los cuerpos intrusivos y las brechas ígneas. Por último la alteración HT según lo investigado es producto de la circulación de fluidos hidrotermales los cuales brechizaron las rocas del yacimiento y alteraron y redistribuyeron sus características texturales y mineralógicas formando las brechas hidrotermales encontradas, por ende es natural que su presencia aumente si la litología estudiada es una brecha hidrotermal.

Bajo el criterio de estudiar la alteración de las muestras por litología se aprecia en la Tabla 4.17 que para las muestras de CMET del yacimiento aún no se encuentra una correlación importante que indique si existe un control entre los eventos de alteración del yacimiento sobre sus variables geometalúrgicas. Esto es debido a que el Complejo Máfico El Teniente abarca el 70% de las muestras de la base de datos y el 70% del volumen total del yacimiento, lo que indica que dentro del existen diferentes tipos de roca las cuales presentan distintas asociaciones con otras litologías, dominios estructurales y características geotécnicas, los cuales pueden influir en el control sobre las variables geometalúrgicas estudiadas.

Para las muestras correspondientes a la Tonalita Sewell, la cual se presenta en la zona sureste del yacimiento, se analizaron la Tabla 4.18 donde se observaron distintas correlaciones. Se analiza que la Ley de Mo en las muestras presenta correlaciones positivas tanto con la alteración TM como con la HT, lo cual coincide con la teoría estudiada del yacimiento y con los resultados del mapeo de tramos de sondaje descritos, donde la mineralización de Molibdenita se concentra en las vetillas de alteración TM y HT, por ende es natural además que cuando el contenido de alteración HP aumente, la Molibdenita en la roca disminuya. De las mismas tablas se desprende la existencia de una afinidad del Factor K con la alteración HP, en desmedro de la alteración HT, la explicación de este fenómeno puede encontrarse en la fórmula del Factor K, ya que de acuerdo con la ecuación 1, el Factor K aumentará a medida que disminuya el %Mo en el sistema, lo cual ocurre si la alteración HP aumenta y la alteración HT disminuye. Con esto en consideración es posible que exista otro factor que afecte al MoNS y que provoque estas relaciones entre el Factor K y la alteración en la roca.

Se ve en la Tabla 4.19 que para las muestras del Pórfido Dacítico, las correlaciones encontradas en el Factor K son contrarias a las correlaciones de la Recuperación de Mo, lo cual hace sentido, producto de la fuerte correlación negativa (-0,866) existente entre ambos parámetros. La explicación para la correlación positiva existente entre el Factor K y la alteración HP es la misma encontrada para las muestras de Tonalita, es decir se asocia a la disminución del %Mo_Cab, sin descartar una posible contribución del %MoNS. A la vez se encuentra una correlación negativa entre el Factor K y la alteración TM, la cual también estaría ligada a un aumento de la Ley de Mo al aumentar la alteración TM. Por lo explicado anteriormente la recuperación de Mo, entonces presenta afinidad tanto por la alteración TM como la HT en las muestras de Pórfido Dacítico, ligado a un aumento de la Ley de Mo, donde la Molibdenita se encuentra en mayor cantidad en vetillas TM, y la disminución del Factor K los cuales se encuentran en directa relación con las alteraciones presentes en la roca.

Al analizar las correlaciones que pertenecen a las muestras de Pórfidos Dioríticos, vemos que ocurren correlaciones las cuales son una excepción a las tendencias observadas en los resultados de las muestras de las demás litologías estudiadas. Se observa una leve correlación positiva entre la Ley de Mo y el porcentaje de alteración HP. Al revisar los datos, esta relación puede explicarse un registro puntual donde el %Mo_Cab más alto de las muestras PDI, coincide con el valor más alto de alteración HP de un 95%, sin embargo al revisar la muestra correspondiente a estos datos se encuentra que el alto porcentaje de Molibdeno proviene de la Molibdenita precipitada dentro del 4% de alteración HT presente en la roca. Al eliminar este registro, la tendencia general de los datos encontrada es que la Ley de Mo disminuye a medida que aumenta la alteración HP de la roca. Esto se suma al hecho que los valores del %HP en la roca son relativamente bajos y no superan el 10% con la excepción de 4 datos puntuales. Otra de las correlaciones contradictorias con lo esperado, es la correlación logarítmica positiva entre el Factor K y el grado de alteración TM, donde esta relación se ve acentuada drásticamente debido, nuevamente a un caso puntual el cual corresponde a los datos de la misma muestra comentada anteriormente, por tanto los valores de esta muestra se explican debido a que en primer lugar la alteración TM es baja puesto que la alteración

hidrotermal es muy alta y segundo el Factor K es bajo puesto a que existe una alta Ley de Mo ligada a la Molibdenita presente en la alteración HT. Finalmente existe una correlación logarítmica negativa entre la Recuperación de Mo y la alteración HT, donde la explicación nuevamente se encuentra debido a la escasez de datos y a un caso puntual en una muestra donde la alteración HT abarca un 99% de la roca, mientras que la recuperación para esa muestra es 80%, la más baja de los datos registrados del PDI, a pesar de que sigue siendo un valor alto. Por lo general en la Tabla 2.1 Valores promedio de Ley y Recuperación Rougher de Cu y Mo para la litología respectiva. Podemos observar que las muestras de PDI presentan una alta Ley de Mo y una alta recuperación también por ende, caracterizar el control que presenta la alteración sobre los parámetros geometalúrgicos no resulta primordial, ya que habitualmente estos parámetros serán altos en esta litología.

Se distingue en el análisis de resultados de las muestras de Brechas Ígneas de Pórfido Diorítico, donde las correlaciones observadas coinciden con los resultados generales obtenidos para las muestras de los Intrusivos Félsicos. Se distinguen correlaciones lineales positivas entre la recuperación de Mo y la alteración TM, así como entre la recuperación de Mo y la alteración HT relativa a la alteración hidrotermal total (F(HT)). Además de la característica correlación negativa entre la alteración HP y el porcentaje de Recuperación Rougher de Mo. Lo anterior se explica por el origen que presentan las Brechas Ígneas, a partir de la Brechización de la roca producto del emplazamiento de los intrusivos félsicos. Vemos también que la BXIPDI presenta altos valores de Ley de Mo y Recuperación, por ende al igual que el PDI, su caracterización no presenta una importancia relevante.

Al observar los análisis de resultados de las muestras de Brechas de Anhidrita se observan diferentes tendencias a las generalmente observadas en los resultados de las muestras de Intrusivos y Brechas Ígneas. En primer lugar el porcentaje de alteración Hidrotermal Tardía aumenta considerablemente, también presentan valores de %Mo_Cab y %MoNS más altos que las demás muestras de otras litologías. Al haber un mayor porcentaje de Molibdeno no sulfurado se pueden observar correlaciones con los demás parámetros geometalúrgicos y geológicos, en particular se observa una correlación lineal importante entre el %MoNS_Cab y la alteración HT. Ya es establecido que una gran cantidad de mineralización de Molibdenita se concentra en la alteración HT, además que otros minerales de mena de Mo como la Powellita también se presentan en esta alteración. Por tanto la correlación encontrada implica que el %MoNS está directamente relacionado con la mineralización de mena de Mo en vetillas HT, lo que significa que el Molibdeno no sulfurado tiene su origen en minerales como la Powellita y la Wulfenita que presentan contenidos de Mo el cual no se encuentra en forma de sulfuros. Sin embargo debido a que el porcentaje de mineralización de estas especies es relativamente bajo de acuerdo con la base de datos, es necesario otra explicación para los elevados valores del %MoNS en las muestras de Brechas de Anhidrita. En base a las descripciones realizadas en las muestras de roca de BXANH y los cortes realizados se teoriza que existe un importante aporte de Molibdenita el cual presenta un estilo de mineralización fino, el cual es soluble en el ácido Clorhídrico del proceso de detección geoquímica del MoNS y no flota en el ensayo de flotación rougher, este tipo Molibdenita

entonces correspondería a parte del MoNS encontrado en las Brechas de Anhidrita. Al ser la alteración TM y la alteración HT las 2 alteraciones principales en las muestras de BXANH, es natural que exista una correlación negativa entre el %TM y el %MoNS, debido a que existe una correlación positiva entre la alteración HT y el Mo no sulfurado.

A modo de resumen, pueden recopilarse los estudios realizados sobre las correlaciones realizadas por su litología y se distinguen tendencias generales de todas las litologías con excepción del CMET.

1. Por lo general en las rocas intrusivas y brechas ígneas el aporte de Molibdeno en la roca proviene principalmente de la mineralización de Molibdenita en vetillas TM, donde la Ley y Recuperación de Mo están fuertemente ligadas a esta alteración y disminuyen en gran medida si aumenta la alteración HP. Esto se explica debido a que la alteración HP presenta altos contenidos de sericita fina la cual se adhiere a las partículas de Molibdenita y otros minerales en el proceso de Molienda, dificultando su flotación. Además los valores de MoNS en estas litologías son bajos por lo que el Factor K no presenta un gran control sobre la recuperación (con excepción de las muestras de Tonalita y algunas Brechas Ígneas) y por lo tanto la Ley de Mo se presenta como el mayor control sobre la Recuperación Rougher de Mo.
2. Las Brechas Hidrotermales presentan mayores contenidos de MoNS producto del aumento en el porcentaje de alteración HT en estas litologías, la cual aporta grandes concentraciones de Mo y puede presentarse en forma Powellita, Wulfenita o Molibdenita Fina, entre otras. Ya que se teoriza que las formas mencionadas son las que contribuyen Molibdeno no sulfurado al yacimiento. Este aumento en el %MoNS_Cab tiene como consecuencia un aumento en el Factor K de las muestras, el cual se presenta como un importante control sobre la recuperación de Mo en el yacimiento. Se realizaron correlaciones con muestras correspondientes a todas las brechas hidrotermales para confirmar esta hipótesis, llegando a la conclusión, de acuerdo a la Tabla 6.1, que el porcentaje de alteración HT es el principal factor de aporte del MoNS para las brechas hidrotermales y también presenta una correlación negativa importante con la Recuperación de Mo.

Tabla 6.1: Correlación entre el MoNS y la Rec_Mo_Ro con la alteración de Brechas Hidrotermales

	%MoNS_Cab	%Rec_Mo_Ro
TM	-0.476	0.444
HP	-0.192	-0.167
HT	0.509	-0.384

6.4 SECTORIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

6.4.1 Segregación por ubicación en el Complejo Máfico El Teniente

Al estudiar las correlaciones entre los parámetros geometalúrgicos, geoquímicos y geológicos de interés para las muestras de CMET, se aprecia de acuerdo con la Tabla 5.3, que independiente de la agrupación de muestras, la Ley de Mo y el Factor K siguen siendo 2 controles importantes sobre la recuperación de Mo en el yacimiento.

De la Tabla 5.4 se puede apreciar que la mayoría de las agrupaciones de CMET presenta una correlación lineal positiva entre el porcentaje de alteración Hidrotermal Tardía y el porcentaje de Mo en las muestras de Cabeza, lo cual implica una importante presencia de mineralización de Molibdenita en vetilla HT para las muestras de CMET, en conjunto con la mineralización ocurrida en la etapa Tardimagnética. Además se observa una clara correlación negativa entre la alteración HP relativa y la Ley de Mo, lo cual coincide con lo observado en los análisis de las correlaciones de las demás litologías y las descripciones de tramos de sondajes en donde la mineralización de Mo en la alteración HP es escasa.

En la Tabla 4.27: Correlaciones lineales entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET al oeste del CBB se observa una excepción respecto de las demás agrupación del CMET, donde las muestras pertenecientes al sector Suroeste del yacimiento, presentan una correlación positiva entre el porcentaje de Molibdeno no sulfurado en la roca y la alteración HT. Esta correlación podría explicar la baja recuperación de Mo existente en los sectores productivos al Suroeste de la Brecha Braden, específicamente en el sector Pacífico Superior, ya que como se aprecia en la tabla, la recuperación de esas zonas presenta una correlación negativa leve con el Factor K.

En conjunto con lo analizado, se observa una tendencia general para todas las agrupaciones del CMET, donde la Recuperación de Mo está directamente correlacionada con el $f(HT)$, y en caso contrario el Factor K se encuentra directamente correlacionado con el $f(HP)$, lo cual se encuentra reflejado en la Tabla 5.5. Ya fue analizado que la recuperación en las muestras de CMET se encuentra en una fuerte correlación negativa con el Factor K, por lo cual es natural que las correlaciones con las variables de alteración de estos parámetros geometalúrgicos se comporten de manera opuesta entre sí. Al mismo tiempo, se comprobó que para las muestras de CMET existe una importante mineralización de Mo asociada a la alteración HT. Al contrastar los resultados se llega a la conclusión que, a pesar de que existe un aumento de la mineralización de Mo, relacionada con el aumento de la alteración HT para las agrupaciones de las muestras del Complejo Máfico El Teniente, no existe un aumento considerable del MoNS, lo que indica que en el CMET, el Molibdeno encontrado en las vetillas y brechas Hidrotermales Tardías se encuentra principalmente en forma de Molibdenita de tamaño medio-grueso y no como Powellita, Wulfenita o Molibdenita fina. Esto implica un aumento de la Ley de Mo con la alteración HT y una disminución del Factor K, lo que explica la correlación negativa encontrada entre la alteración HT relativa y el Factor K y contrariamente, la correlación positiva entre la alteración HP relativa y el Factor K.

6.4.2 Segregación de Muestras por Límite HT/HP

En base a los análisis realizados de las muestras segregadas de acuerdo al Límite HT/HP el cual se muestra en la Figura 4.15, en primer lugar se confirmó la existencia de 2 diferentes volúmenes ubicados al este del yacimiento los cuales marcan una diferencia del dominio de alteración hidrotermal en la roca. A pesar de que estos dominios no fueron definidos en base al mapeo de alteración del yacimiento, sino que se delimitaron en base a la abundancia de vetillas, calidad geotécnica y litología, estos factores se relacionan directamente con la alteración del yacimiento. La litología del yacimiento marca los diferentes eventos de intrusión y circulación de fluidos de El Teniente, los cuales también marcan los diferentes eventos de alteración los cuales son más marcados a mayor cercanía con la fuente de los fluidos. A su vez el emplazamiento de intrusivos, brechas ígneas y brechas hidrotermales provoca la generación de vetillas en la roca las cuales aumentan su abundancia a menor distancia de estos cuerpos. Finalmente la alteración de la roca, abundancia de vetillas y litología presente son factores predominantes que definen la calidad geotécnica de la roca. Es por esto que es de esperar que el límite HT/HP marque efectivamente un dominio de alteración Hidrotermal Tardía y un dominio de alteración Hidrotermal Principal. Como se muestra en la Tabla 4.30, se observa que no existe un cambio significativo en la alteración Tardímagmática para las muestras de ambos Dominios, lo que es otro indicador para argumentar que la delimitación es correcta y solo marca una zona de influencia de las 2 alteraciones hidrotermales presentes en el yacimiento El Teniente.

Como se analizó de la Tabla 4.31, Tabla 4.32, Tabla 4.33 y Tabla 4.34, con excepción de las muestras de PDI, existe una mayor Ley y recuperación de Mo para las muestras pertenecientes dentro del Dominio HT en comparación a las muestras del Dominio HP. Este fenómeno podría explicarse con el hecho de que las muestras presentan una mayor Ley de Mo en el dominio HT ya que presentan una mayor influencia de la mineralización proveniente del Complejo de Brechas Braden y otras brechas hidrotermales, producto de la cercanía de las muestras con estas litologías, sin embargo las muestras del límite HP también se encuentran en cercanía con cuerpos altamente mineralizados con Molibdeno los PDI y BXIPDI, por lo cual esta explicación parece no ser la más importante. La Molibdenita en las brechas hidrotermales presenta un estilo de mineralización predominante diseminado fino, a diferencia de la Molibdenita cristalina encontrada en los cuerpos intrusivos y brechas ígneas, esta diferencia de estilos puede explicar que la Molibdenita de las Brechas Hidrotermales se dispersara con mayor facilidad, aumentando la Ley del Dominio HT, explicando así una mayor recuperación, no obstante en la Tabla 4.35 se ve que el Factor K presenta una influencia mucho mayor que la Ley de Mo sobre la recuperación de Mo en los ensayos Rougher para ambos dominios, a pesar que el %Mo_Cab igualmente tiene una correlación de 0.46 en el Dominio HT. Esto indica que la Ley de Mo no explica en su totalidad las diferencias de los datos entre ambos dominios y que la cantidad de MoNS en interacción con el Mo_Cab presente tiene una influencia importante en los resultados de recuperación de Mo. Bajo estos argumentos, se teoriza que el Límite HT/HP corresponde a un factor importante de segregación en el yacimiento con sus propias características geometalúrgicas, las cuales no pueden explicarse directamente bajo otros criterios.

6.4.3 Segregación por Zona Geotécnica

Según los estudios realizados a los datos obtenidos de las muestras segregadas según la zona geotécnica a la que pertenecen, se determinó que con excepción de la zona secundaria y la Pipa, las zonas geotécnicas no marcan una distinción característica de información relevante al Molibdeno del yacimiento, ya que estas zonas geotécnicas presentan valores similares de %Mo_Cab, %MoNS y %Rec_Mo_Ro. Esto indica que las Zonas geotécnicas en general presentan una influencia de mineralización de Mo similar de diferentes cuerpos intrusivos, brechas y vetas, y esta mineralización no se rige en base a su zona geotécnica.

Se debe prestar atención a la correlación negativa importante que aparece para las zonas geotécnicas primarias 4 y 5 entre el Factor K y la recuperación de Mo, esta correlación también ocurre en las muestras de la zona secundaria, lo que resulta un indicativo que la zona secundaria presenta un comportamiento particular que vale la pena considerar. Este comportamiento de los resultados, sumado a los valores promedio de la zona secundaria observados de la Tabla 4.37: Parámetros geometalúrgicos promedio de las zonas geotécnicas, demuestran que la zona secundaria efectivamente presenta un comportamiento diferente debido a que corresponde a la zona del yacimiento afectada por una alteración supérgena, lo que se ve reflejado en su mineralogía, mineralización y comportamiento geomecánico. Esto indica que gran parte del Molibdeno presente en la zona secundaria se encuentra en la forma de Molibdatos, los cuales no flotan en el proceso de recuperación, además la zona enriquecimiento supérgeno presenta una gran cantidad de arcillas las que floculan y ocupan espacio de la superficie de las burbujas en el proceso de flotación, bajando la recuperación.

Otra de las zonas geotécnicas que se comporta de manera diferente al resto es la zona primaria 1, en especial debido a la influencia que presentan los altos valores de MoNS sobre el Factor K y la Recuperación de Mo. Pero debido a que esta zona corresponde en esencia a Pipa Braden, lo cual puede comprobarse puesto que la litología de las muestras dentro de esta zona corresponde principalmente a la Brecha Braden, categorizar y caracterizar la Molibdenita presente en función a esta zona geotécnica, sería idéntico a lo realizado cuando se segregaron las muestras por litología.

6.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MOLIBDENITA EN EL YACIMIENTO

En base a los estudios realizados sobre las descripciones de los tramos de sondaje y las muestras de cortes de microscopio, se caracterizaron diferentes estilos de mineralización de la Molibdenita en las rocas del yacimiento El Teniente. Además se describieron las asociaciones minerales encontradas y las texturas de contacto de los minerales con la Molibdenita.

Según la clasificación de vetillas del estándar de geología de El Teniente se identificó el tipo de vetilla correspondiente a cada una de las vetillas estudiadas, como se puede observar en la Tabla 6.2. En esta tabla se evidencia que de los cortes mapeados se abarca la mayoría de los tipos vetillas con Molibdenita del yacimiento, la única vetilla que no fue observada fue la vetilla V15 que corresponde a una vetilla HT con alta

presencia de turmalina. El hecho de que se hayan observado la mayoría de los tipos de vetilla para realizar la caracterización de la Molibdenita a escala microscópica indica que el estudio realizado es representativo, y los estilos de mineralización y asociaciones minerales identificadas abarcan la mayoría de los casos que se encuentran en el yacimiento. De la misma manera a escala macroscópica se mapearon más de 100 tramos de sondajes, 70 de los cuales presentaron alta mineralización de Molibdenita. Estos tramos abarcan la mayoría de las litologías encontradas en el yacimiento y se estudiaron todos los tipos de alteración, por lo cual el estudio macroscópico también resultó ser representativo.

Tabla 6.2: Clasificación de vetillas estudiadas según el estándar de geología

Estándar de Geología		Cortes con vetillas estudiados					
Vetillas	Alteración						
V3	TM	PA0694@60(1)	PA0668@9(3)	PA0668@9(1)			
V4	TM	PA0672@9					
V5	TM	PA0699@9	PA0694@60(2)	PA0678@21	PA0668@9(2)	PA0649@3(2)	PA0649@3(1)
V7	TM	DDH2654@119	PA0641@60	PA0641@51			
V10-V11-V12	HP	DDH2544@19					
V13	HT	DDH1801@430	DDH1801@440	DDH1801@454	DDH2791@23		
V14	HT	PA0710@24.4	PA0694@60(2)	PA0722@2.06			
V15	HT						

Se identificaron 11 estilos de mineralización de Molibdenita a escala macroscópica y 14 a escala microscópica. En la Tabla 6.3 se realiza una comparativa entre ambos estudios con el objetivo de identificar si se observan los mismos estilos a ambas escalas o si existen estilos observados a escala microscópica los cuales no pueden apreciarse en las muestras de sondaje.

Tabla 6.3: Comparación entre estilos de mineralización macroscópicos y microscópicos

Estilos en muestras de roca	Estilos en microscopía óptica
Roseta	Cristal Aislado
Diseminada/Pequeños cúmulos	Cúmulos Grandes
En cúmulos	Cristales radiales
Cúmulos Lentiformes	Cúmulos de cristales desorientados
En Sutura	Sutura cristalina
Reutilizando vetilla	Sutura de cristales finos
Bordes/Reutilizada	Cúmulos lentiformes
Diseminada Fina	En bordes de vetilla
En Patina	Cristales diseminados
Halo	Cristales Anhedrales
Matriz de brecha	Relleno intergranular
	Halo de cristales finos
	Cristales muy finos diseminados en vetillas
	Matriz de Brecha

Como se puede visualizar en la tabla, únicamente 2 estilos de mineralización identificados a escala microscópica no se reconocieron a escala macroscópica. Por una parte los cristales anhedrales de Molibdenita son escasos y no pueden distinguirse a muestra de mano. El relleno intergranular en cambio es un estilo que, independiente de que solo se haya visto en un corte, se presenta en una escala muy pequeña para observarse a muestra de mano, en donde no pueden verse los espacios entre cristales o distinguir si presentan algún mineral de relleno.

Para comprender las condiciones y factores que contribuyen a que la Molibdenita precipite según un determinado estilo de mineralización, se realiza una recopilación de los estilos observados a ambas escalas y se analiza su formación. Se catalogan entonces 12 estilos de mineralización donde se identifica el tipo de alteración donde pueden encontrarse.

Cristales aislados: Formados producto de una alta tasa de crecimiento y baja tasa de nucleación, implica un enfriamiento lento del sistema posible únicamente en condiciones Tardimagmáticas y bajo contenido de Molibdeno, el cual se concentró en el cristal de Molibdenita. Se observa este estilo en la Figura 4.28.

Cúmulos de gran tamaño y cúmulos de cristales desorientados: Su origen se debe a una nucleación heterogénea donde el contenido de Molibdeno es abundante y la precipitación de los cristales ocurrió a una baja tasa de enfriamiento, lo que explica su gran tamaño. Esto solo pudo ser posible debido a la circulación de fluidos tardimagmáticos, la orientación de los cristales pudo deberse producto del flujo del fluido por las vetillas o de la nucleación heterogénea de los cristales. También pueden ocurrir de manera muy escasa a partir de fluidos hidrotermales principales de alta temperatura con alto contenido de sulfuros y Molibdeno, en donde los cristales de Molibdenita precipitan a partir de nucleación heterogénea formando cúmulos en asociación con la calcopirita. Este estilo se reconoce en la Figura 4.19, Figura 4.29 y Figura 4.31.

Sutura cristalina: Se produce debido al crecimiento heterogéneo del mineral de relleno principal de la vetilla, generalmente el cuarzo, donde los cristales prefieren crecer de las paredes de la vetilla al centro por lo tanto los demás minerales se precipitan en el medio, formándose así una sutura central, para que esto ocurra los minerales deben precipitar a alta temperatura y el enfriamiento debe ser lento para que se forme la sutura, por lo que solo ocurre en vetillas Tardimagmáticas. Una vez formada la sutura, si la tasa de crecimiento es alta, producto del lento enfriamiento, los cristales presentarán sus caras propias bien formadas y un gran tamaño. Se aprecia en la Figura 4.21 y Figura 4.32

Sutura de cristales finos: Ocurre cuando la tasa de enfriamiento en una vetilla tardimagmática es lenta para poder formar una sutura, pero no lo suficientemente lenta de manera que permita el crecimiento de cristales de Molibdenita euhedrales. Por ende se forma una sutura de Molibdenita de cristales delgados y sinuosos, con forma de cabello, éstos pueden precipitar en asociación con otros sulfuros (generalmente calcopirita). También puede producirse una sutura de cristales finos a partir de la reutilización de una vetilla tardimagmática por otra vetilla con un alto contenido de Molibdeno, donde la Molibdenita precipita a una tasa de enfriamiento medio. Se puede ver en la Figura 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.33

Cúmulos lentiformes: Se forman bajo las mismas condiciones que los cúmulos de gran tamaño de Molibdenita o las suturas. Si los cristales de los cúmulos se encuentran orientados en sentido de la veta o la sutura es discontinua de manera que la Molibdenita se concentra en ciertos sectores de la veta, se generan los cúmulos lentiformes. Es por esto que solo aparecen en vetillas TM como se observa en la Figura 4.20 y Figura 4.34.

Cristales radiales: Se producen a partir de la nucleación heterogénea de cristales de Molibdenita con forma laminar, donde prefieren crecer desde un extremo del cristal hacia afuera, dando la apariencia de un asterisco o una estrella. Este estilo de mineralización ha sido visto tanto en vetillas TM (Como se ve en la Figura 4.30), como en vetillas HT, donde el tamaño de los cristales depende de la tasa de enfriamiento. Se teoriza que este estilo de mineralización es el que produce el hábito de rosetas a escala macroscópica que se observan en la Figura 4.17, orientándose las láminas de Molibdenita en torno al centro formando una espiral.

Bordes de vetilla: Generalmente son producto de la reutilización de una vetilla previa la cual presentaba una sutura con Molibdenita. Esto tiende a ocurrir entre vetillas Tardimagmáticas, normalmente una V7 reutilizando una vetilla V5. Los bordes presentan cristales finos de Molibdenita los que también puede formarse producto de la nucleación heterogénea de estos cristales en las paredes de la vetilla precipitando el poco Molibdeno presente en el fluido tardimagmático. Se aprecia en la Figura 4.23 y Figura 4.35.

Cristales diseminados: Formados a partir de la nucleación homogénea de la Molibdenita, donde ésta precipitó por los espacios, fracturas y vetillas discontinuas de la roca, producto del paso de los fluidos tardimagmáticos e hidrotermales tardíos con bajo contenido de Molibdeno. Este estilo puede reconocerse a escala macroscópica en la Figura 4.18 y a escala microscópica en la Figura 4.36.

Relleno intergranular: Esta textura se formó producto de la superposición de una vetilla HT por sobre una vetilla TM, donde circularon fluidos hidrotermales mineralizados con presencia de Mo a través de la vetilla TM rellena de cristales de Cuarzo, precipitando la Molibdenita entre los espacios de los cristales como se observa en la Figura 4.38.

Halo: Ocurre en raras ocasiones donde los minerales donde se hospeda la vetilla Hidrotermal Tardía actúan como un agente reductor, lo que permite la precipitación de la escasa Molibdenita presente en el borde externo de la vetilla formando un halo. Los minerales reconocidos como agente reductor han sido la Bornita de una vetilla Tardimagmática V7 en la Figura 4.26, y el cuarzo, yeso y anhidrita de una Tonalita con alteración Hidrotermal Tardía en la Figura 4.39.

Vetillas de cristales muy finos: Éstas se forman en vetillas Hidrotermales Tardías las cuales presentan abundante contenido de Mo, en donde precipita la Molibdenita en un enfriamiento rápido provocado por la diferencia significativa de temperatura entre la vetilla y la roca donde se hospeda. Se forman entonces cristales de Molibdenita laminares finos de largo $<10\ \mu\text{m}$ los cuales se reconocen en la Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.40.

Matriz de Brecha: Bajo las mismas condiciones que las vetillas de Molibdenita fina, si las vetillas Hidrotermales tardías aumentan su frecuencia se forma un stockwork que eventualmente puede generar una brechización de la roca. La Molibdenita precipita en la matriz de la brecha hidrotermal en una alta tasa de enfriamiento lo que genera cristales finos de largo $<10\ \mu\text{m}$. Como se aprecia en la Figura 4.27 y Figura 4.41.

6.5.1 Caracterización del MoNS

En el estudio los análisis estadísticos realizados, uno de los parámetros más relevantes encontrados es el Molibdeno no sulfurado, que corresponde a los minerales en la roca con presencia de molibdeno los cuales no tienen la capacidad de flotar en el ensayo de flotación rougher y por tanto ese Molibdeno no es recuperado. Al expresar este parámetro en función del Molibdeno total en el yacimiento se obtiene el Factor K, en donde puede reconocerse con mayor facilidad la influencia e importancia que tiene el Molibdeno no sulfurado sobre la recuperación de Mo, como lo señala el Gráfico 4.8.

Si bien el Molibdeno no sulfurado se identifica en los ensayos geoquímicos, como el Molibdeno soluble en ácido clorhídrico, no se tiene claridad sobre qué minerales en el yacimiento presentan MoNS en cantidades relevantes. Para identificar estos minerales se realiza un catálogo de los minerales que existe en El Teniente con alta presencia de Molibdeno y su porcentaje de aporte de Mo, obtenido en base a los registros de los resultados de mineralogía QEMSCAN de las muestras de El Teniente, entregados por el laboratorio SGS.

- El mineral más relevante es la Molibdenita (MoS_2), el cual se encuentra de manera abundante en el yacimiento en los eventos de mineralización Tardimagmáticos e Hidrotermal Tardíos, presenta diversos estilos de mineralización los cuales fueron caracterizados y clasificados. Este mineral contiene aproximadamente el 98% del Molibdeno de El Teniente.
- Se encuentran también Molibdatos pertenecientes a los minerales sulfatos o sulfosales, los cuales presentan Molibdeno en su estructura. Estos minerales son la Powellita (CaMoO_4), la Scheelita-Powellita (Ca(W,Mo)O_4 , solución sólida, sustitución del Molibdeno por Wolframio) y la Wulfenita (PbMoO_4) y se originan a partir de la oxidación supérgena de la Molibdenita. Destaca la Powellita, donde se encuentra casi el 2% del Molibdeno presente actualmente en el yacimiento. Como se comentó anteriormente, se teoriza que gran parte del MoNS en El Teniente proviene de estos Molibdatos.
- Finalmente en el yacimiento, antiguamente se presentaban registros de un Molibdato hidratado de Hierro conocido como Ferromolibdita ($\text{Fe}^{3+}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) o $\text{Fe}^{3+}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Este mineral se encontraba de manera abundante en los sectores más someros del yacimiento, afectados en gran parte por una alteración supérgena y era visible a escala macroscópica a muestra de mano.

Como ya fue mencionado, el origen de los Molibdatos en el yacimiento se produce en el proceso de alteración supérgena debido a una oxidación de la Molibdenita, donde el Molibdeno aumenta su estado de oxidación. El Molibdeno en forma de Molibdato (MoO_4) no tiene la capacidad de flotar en el proceso de flotación rougher por lo cual no es recuperado de manera convencional en procesamiento del mineral. A esto se suma lo analizado en la Tabla 4.37 donde se observa que en la zona secundaria afectada por alteración supérgena, se encuentran los valores más altos del Factor K, además de una baja recuperación de Mo. Esto demuestra que los Molibdatos corresponden a una de las fuentes principales de MoNS en el yacimiento El Teniente.

Una vez identificados los minerales que presentan un aporte de Molibdeno al yacimiento, se evalúan los valores promedios del factor K en el yacimiento. Se disponen los valores promedio por litología para tener un mejor entendimiento y eliminar sesgos por distribución de los datos.

Tabla 6.4: Valores promedio del Factor K por litología

Litología	Factor K [%]
CMET	9.04
PDA	12.80
PDI	3.57
TO	8.75
BX HT	7.62
BX ígneas	9.45

Se observa según la Tabla 6.4 que el Factor K presenta valores que rondan entre el 7% y 10% en promedio, el cual es el porcentaje de aporte de Molibdeno no sulfurado al total de Molibdeno en el yacimiento. Al comparar estos datos con los aportes de Mo de cada mineral de acuerdo a la mineralogía QEMSCAN, no se encuentra un patrón en común. Esto revela que el Molibdeno no sulfurado que se encuentra en las sulfosales del yacimiento en forma de Molibdato, no es el único aporte de MoNS a la roca, sino que existe una importante fuente aun no identificada, la cual debe corresponder aproximadamente a un 6 a 8 % del Mo total.

Basándose en los resultados de la Tabla 4.37 en donde se destaca que además de la zona secundaria, la zona primaria 1, que corresponde a la Pipa Braden, también presenta una baja recuperación de Mo y un Factor K por sobre el promedio, a pesar de tener una alta ley promedio de Mo, indicando que existe un gran porcentaje de MoNS en la roca. Es conocido también, del Gráfico 4.10, que la alteración ampliamente predominante en la Brecha Braden es la alteración Hidrotermal Tardía. Cuando contrastamos estos análisis con la caracterización realizada de los estilos de mineralización y asociaciones minerales de la Molibdenita, se concluye que el MoNS que se observa en la Brecha Braden corresponde a una Molibdenita fina con un tamaño menor a 12 μm , donde de acuerdo a los estudios de flotación realizados, esta Molibdenita tiende a no flotar en el ensayo de flotación rougher. Sumado a esta Molibdenita fina, otra fuente del MoNS puede ser Molibdenita asociada a Anhidrita o yeso la cual se encuentra parcialmente ocluida y no resulta ser soluble en ácido clorhídrico, ni flotar en el estudio de recuperación.

Extendiendo estos análisis realizados al resto de las litologías del yacimiento, se asocia el Molibdeno no sulfurado a Molibdenita fina y asociada a Anhidrita, la cual no puede flotar en los ensayos de flotación rougher y la cual se encuentra en la alteración Hidrotermal Tardía, además de los Molibdatos cuyo origen se encuentra ligado a la alteración supérgena del yacimiento.

6.5.2 Recuperación de Mo vs caracterización de Molibdenita

Se estudian los análisis realizados a los gráficos que comparan la recuperación de Mo de las muestras vs la asociación mineral, el tamaño y el grado de liberación de los cristales de Molibdenita presentes en la muestra (Ver Gráfico 4.11, Gráfico 4.12, Gráfico 4.13 y Gráfico 4.14). Por lo general se evidencia que la recuperación aumenta si es que los cristales de Molibdenita presentan un alto grado de liberación y un gran tamaño. También la recuperación disminuye si los cristales se encuentran asociados a partículas complejas o minerales pesados como pirita y silicatos duros, presentan gran parte de su superficie ocluida y sus cristales libres son de tamaño fino ($<12 \mu\text{m}$). Sin embargo en los gráficos se observan muestras que presentan excepciones a las tendencias generales establecidas y cuyos casos pueden ser explicados de manera particular.

La muestra S1233 presenta un gran porcentaje de Molibdenita asociada a partículas complejas y con un bajo porcentaje de Molibdenita liberada sobre el 80%, sin embargo presenta una buena recuperación, debido a que un cristal asociado a estas partículas complejas es de gran tamaño, presenta un grado de liberación mayor al 50% y corresponde a más del 50% de la Molibdenita presente en la muestra, por lo que no presentó dificultades para flotar. Un caso similar sucede con la muestra 1226 donde gran cantidad de cristales de Molibdenita de tamaño medio-fino ($>12 / <24 \mu\text{m}$) se encuentran dentro de una partícula compleja asociados a diversos minerales, debido a la gran cantidad de Molibdenita presente, la partícula flota y el Mo es recuperado.

Otro caso particular es la muestra 1228, la cual presenta gran parte de la Molibdenita con un grado de liberación menor al 50% y un alto porcentaje de Molibdenita asociada a filosilicatos, sin embargo se observa que uno de los cristales de mayor tamaño de la muestra, si bien se presenta a mayoría de su superficie cubierta por minerales de cuarzo y sericita, el contenido de Molibdenita es predominante, por ende la partícula se adhiere a las burbujas y flota. Caso contrario se observa en la muestra 1220, que presenta un alto porcentaje de Molibdenita con una liberación mayor al 80%, sin embargo su recuperación no es alta, la explicación encontrada se debe a que según el Gráfico 4.14, la mayor parte de los cristales de Molibdenita libres (con un grado de liberación mayor al 90%) presentan un tamaño menor a los $12 \mu\text{m}$, por lo que aumenta la probabilidad de que estos cristales no se adhieran a las burbujas en el proceso de flotación.

Se analiza de manera individual la muestra 1230, cuya característica es que todos los cristales de Molibdenita de la muestra tienen un tamaño menor a $12 \mu\text{m}$. A pesar de este hecho, la recuperación de la muestra es mayor al 80%. Esto indica que partículas de Molibdenita de tamaño fino aún tienen la posibilidad de flotar, ya sea de manera independiente o arrastradas superficie por otros minerales.

En relación al contenido de los filosilicatos y su influencia sobre el comportamiento de la Molibdenita, se evalúa que los minerales de Biotita y de Sericita se comportan de manera muy dispar y por tanto no pueden ser estudiados como un conjunto. El motivo de este suceso principalmente es debido a que los cristales de biotita presentan un mayor tamaño y rara vez se encuentran partículas finas menores a $30 \mu\text{m}$ las que pudieran

adherirse a otras partículas durante la molienda o a la superficie de las burbujas para dificultar el proceso de flotación. Se estudia el caso del Gráfico 4.17, donde se observa una relación inversa entre la recuperación de Mo y el contenido de Sericita, con excepción de las muestras del sector productivo Esmeralda Sur. Al analizar la alteración de estas muestras, se ve que corresponden a muestras de Tonalita y Brecha Ígnea de Tonalita, presentan un gran porcentaje de alteración Tardimagnética, un bajo porcentaje de alteración Hidrotermal Tardía y además la Molibdenita se encuentra principalmente en vetillas TM. Lo que indica que los cristales Muscovita/sericita de estas muestras probablemente posean un mayor tamaño, dificultando su adherencia a otras partículas en la molienda, y que exista un mayor porcentaje de Molibdenita liberada y de cristales de mayor tamaño, aumentando la recuperación.

Si se contrastan los resultados de los ensayos de flotación y el análisis QEMSCAN, junto con la caracterización macroscópica y microscópica de la Molibdenita realizada, se pueden destacar diversos aspectos relevantes. En primer lugar el evento de alteración asociado a la mineralización de Molibdenita, influye directamente en el estilo de mineralización y asociación mineral de la Molibdenita presente en la roca del yacimiento, lo cual se ve reflejado en los resultados registrados en los reportes del microscopio QEMSCAN. De acuerdo con los resultados, la Molibdenita presente en alteración Tardimagnética presenta un mayor tamaño de Cristales y es más propensa a encontrarse asociada a silicatos duros como cuarzo. En cambio la Molibdenita que precipitó en un evento Hidrotermal Tardío tiene un menor tamaño de cristales y se encuentra asociada de manera más común a minerales de Anhidrita, Yeso y partículas complejas. El grado de liberación que presentan los cristales de Molibdenita tras el proceso de molienda es una variable cuyo comportamiento es más aleatorio, no obstante depende en cierta medida del tamaño y la asociación mineral del cristal, por ende la alteración de la roca influye de manera indirecta en el grado de liberación.

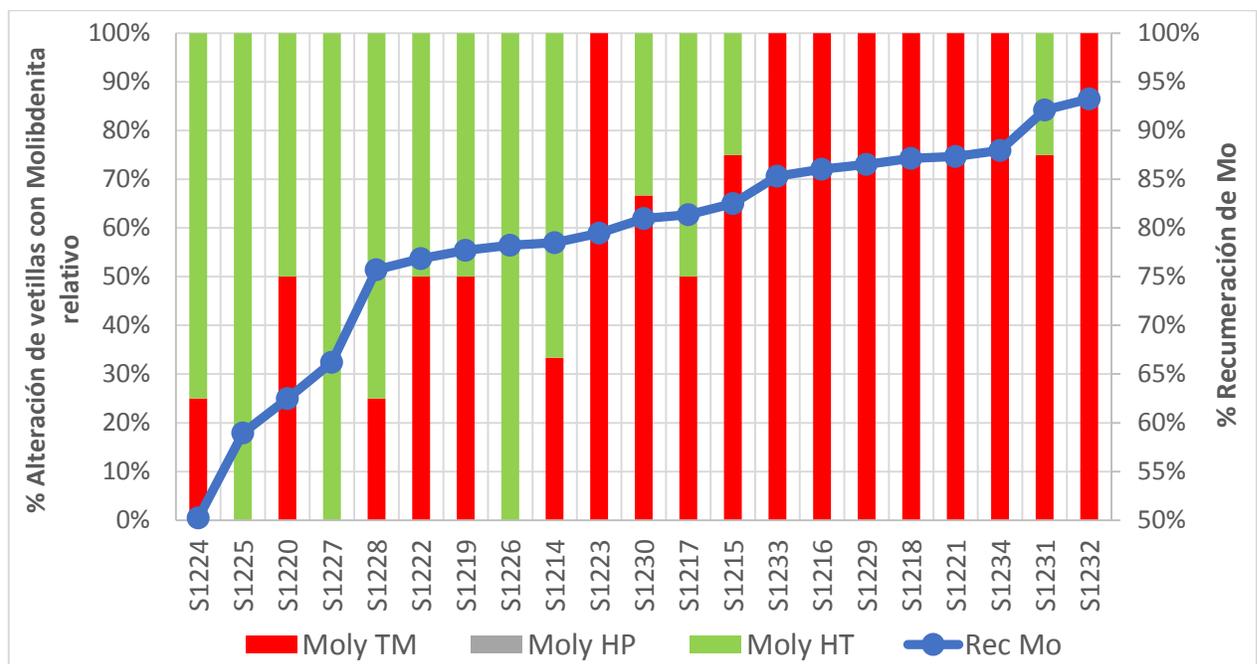


Gráfico 6.1: % Vetillas con contenido de Molibdenita según su alteración vs Recuperación de Mo

En base a estos análisis se desprende que la recuperación de Mo se encuentra fuertemente influenciada dependiendo del estilo de mineralización de la Molibdenita y en menor medida de la asociación mineral presente. Por ende la recuperación de Molibdeno presenta una dependencia del evento de alteración en el cual precipitó la Molibdenita. Esto se ve reflejado en el Gráfico 6.1, donde se aprecia que en la mayoría de las 20 muestras, donde la recuperación de Mo aumenta a medida que aumenta la proporción de Mo proveniente de un evento Tardimagmático y donde las muestras con baja recuperación presentan un mayor aporte de Molibdenita Hidrotermal Tardía.

También se compara la recuperación de Mo con el sector del yacimiento donde proviene la muestra, donde se destaca que las muestras de menor recuperación en su mayoría corresponden al sector productivo Pacífico Superior, al suroeste de la Brecha Braden. Este sector se caracteriza por presentar abundantes brechas hidrotermales en contacto con el Complejo Máfico El Teniente y la Brecha Braden, además las rocas presentan un alto porcentaje de alteración hidrotermal tardía. A su vez las muestras de mayor recuperación pertenecen mayoritariamente al sector Dacita, donde la Molibdenita es escasa y principalmente se encuentra en vetillas Tardimagmáticas asociadas a la intrusión del Pórfido dacítico, también se destaca la ausencia de sericita en este sector debido a la baja proporción de alteración HP y HT.

El comportamiento observado, donde al aumentar dentro de la muestra la Molibdenita en fracciones más finas existe una menor recuperación de Molibdeno es consistente con lo investigado por lo Raghavan et.al. 1974 y Zhou 2010, que establecen que para fracciones finas de Mo, a medida que disminuye el tamaño de los cristales existe una menor probabilidad que éstos se recuperen en el proceso de flotación.

Como observación general se destaca que los parámetros geometalúrgicos establecidos que ejercen un control sobre la recuperación de Mo, no corresponden a un criterio incondicional. Más bien son una consecuencia de la influencia de diversos factores geológicos, los cuales marcan las condiciones de mineralización de la Molibdenita. Estas condiciones son las principales responsables del comportamiento del Mo y de los minerales en interacción con éste en los procesos de Molienda y Flotación, lo que determina la recuperación de Molibdeno.

6.6 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS Y DEFINICIÓN DE ZONAS DE INFLUENCIA

Una vez encontrados los factores geológicos que presentan un control sobre la ocurrencia, distribución y estilo de mineralización del Molibdeno, y que por tanto ejercen un control sobre su recuperación. Y de determinar si este control se refleja en una influencia de la Ley de Molibdeno o del Factor K sobre la recuperación, junto con entregar explicación geológica para estos resultados. Se procede a recopilar y enlistar estos factores geológicos, junto con el detalle de su dominio sobre los parámetros geometalúrgicos y como éstos se correlacionan con la recuperación de Mo. Esto se realiza con el propósito de realizar un modelo geológico que indique la distribución y ocurrencia de la Molibdenita y de los demás minerales que presentan Molibdeno. Detallando su estilo de mineralización y asociación mineral, lo que permita predecir la recuperación de Molibdeno aproximada según los factores geometalúrgicos que presente la roca. La recopilación de los resultados se detalla a continuación.

Por factor litológico

- La Ley de Mo presenta una fuerte asociación con la recuperación de Mo en las muestras cuya litología corresponde a PDI, PDA, BXIPDA y muestras del CMET cercanas al PDI. El ajuste que mejor modela el comportamiento de la recuperación en función de la Ley es un ajuste logarítmico.
- El Factor K muestra una gran correlación negativa con la recuperación de Mo cuando la litología de la roca es TO, PDA y Brechas Ígneas. Siendo un ajuste exponencial la mejor aproximación a la comportamiento de los datos.
- Las diferentes agrupaciones de las muestras pertenecientes al CMET muestran que existe gran influencia del Factor K sobre la recuperación de Mo reflejada en una correlación negativa la cual también presenta un ajuste exponencial como el mejor modelo numérico que refleja el comportamiento de la recuperación de Mo en base al Factor K. Las excepciones a estos resultados son las agrupaciones de muestras cercanas a la Brecha Braden y las muestras pertenecientes al Rajo Sur.

Por factor de Alteración

- La recuperación de Mo se presenta bajo una gran influencia de la alteración TM y HP en las muestras de PDA y BXIPDI. El porcentaje de alteración TM muestra una correlación positiva importante con la recuperación, mientras que la alteración HP presenta una correlación negativa, las cuales parecen estar directamente ligadas a la presencia de Molibdenita en las vetillas de roca.
- En los Intrusivos Félsicos, el F(HT) que compara el porcentaje de alteración HT en relación a porcentaje total de alteración Hidrotermal, muestra una correlación positiva con la Ley de Mo, al contrario del factor F(HP) que muestra una correlación negativa con la Ley de Mo. A pesar que el valor absoluto del coeficiente de correlación no es mayor a 0.5, es un valor destacable que se reconoce en todos intrusivos félsicos
- En las muestras de CMET existe una mayor recuperación de Mo y un menor Factor K a medida que aumenta la alteración Hidrotermal Tardía en comparación a la alteración Hidrotermal Principal, es decir que la Recuperación de Mo presenta

destacadas correlaciones positivas con el F(HT), asociadas a las correlaciones negativas entre el Factor K y el F(HT). Caso contrario sucede con las correlaciones asociadas al F(HP). Las agrupaciones donde no se encuentran estas correlaciones destacadas son las muestras de CMET cercanas al PDA y las muestras del Rajo Sur.

- El porcentaje de Molibdeno no sulfurado en las muestras del Complejo Máfico El Teniente presenta una correlación positiva con la alteración HT en el sector Suroeste de la Brecha Braden.
- En las muestras que se encuentran dentro el Dominio HT, la recuperación de Mo presenta un fuerte control por parte de los parámetros geometalúrgicos estudiados, que se refleja en la correlación positiva moderada con la Ley de Mo y una fuerte correlación negativa con el Factor K. En el Dominio HP, no se aprecia una correlación importante entre la Ley de Mo y la Recuperación de Mo, no obstante, la correlación negativa es aún más grande entre el Factor K y la recuperación de Mo.
- El evento de alteración donde precipita la Molibdenita influye directamente en el estilo de mineralización y asociación mineral de la Molibdenita. Además controla las características cuantitativas de la Molibdenita, como el tamaño de los cristales y su grado de liberación.
- La recuperación de Molibdeno en el yacimiento presenta una dependencia de acuerdo al origen que este presenta. En la alteración TM el estilo de mineralización de la Molibdenita presenta cristales de gran tamaño, los cuales tienden a presentar una mejor recuperación. En la alteración HT los cristales de Molibdenita suelen ser más finos, se encuentran frecuentemente asociados a Anhidrita o a Sericita y su recuperación tiende a ser más baja.

Por Zona Geotécnica

- Fue señalado que la única zona geotécnica donde es importante incorporar un criterio geológico que establezca un sector de influencia sobre la recuperación de Mo es en la Zona de mena secundaria donde la Ley de Mo es severamente más baja que en el resto del yacimiento, y su recuperación presenta una fuerte correlación negativa con el Factor K.

6.6.1 Criterios Base para la construcción de UGM

A partir de la lista de zonas de influencia más importantes se determina el orden de relevancia de los criterios a utilizar para caracterizar la recuperación de Mo de los diferentes sectores del yacimiento. El orden de importancia de los criterios fue definido en función de los valores de las correlaciones y ajustes numéricos encontrados que modelan el comportamiento de la recuperación en función de los controles geológicos y geometalúrgicos. Estos criterios abarcan toda la extensión del yacimiento.

1. La zona geotécnica secundaria presenta bajas leyes de Mo, alto Factor K y una baja recuperación. La recuperación de Mo se encuentra ligada a los valores del Factor K mediante una correlación negativa.
2. El evento de alteración de origen de la Molibdenita influye directamente en la recuperación de Molibdeno. La Molibdenita con un origen Tardimagmático presenta una mejor recuperación que una Molibdenita que mineralizó en vetillas de un evento Hidrotermal Tardío.
3. La Brecha Braden, presenta una unidad conocida como Brecha Braden de Sericita tiene una alta Ley de Mo, un alto porcentaje de MoNS y una baja recuperación de Mo controlada mediante una fuerte correlación negativa con el Factor K.
4. Los intrusivos félsicos del yacimiento tienen controles particulares sobre la recuperación de Mo y sus modelos numéricos reflejan de manera precisa el comportamiento de la recuperación en base a estos controles. Se destacan la alta Ley y recuperación de Molibdeno en los pórfidos dioríticos y sus brechas ígneas asociadas, respecto de las demás litologías del yacimiento.

Tabla 6.5: Asociaciones de la Recuperación de Mo en los Intrusivos Félsicos

Intrusivo Félsico	Recuperación de Mo se asocia con	
	Ley de Mo	Factor K
Tonalita	✘	✔
Pórfido Dacítico	✔	✔
Pórfidos Dioríticos	✔	✘

5. Las Brechas ígneas, al igual que los intrusivos félsicos presentan controles particulares que se aplican a todas las rocas con la misma litología. La recuperación de Molibdeno se encuentra fuertemente ligada al Factor K y está modelada mediante un ajuste exponencial. Para el caso de la Brecha Ígnea de Pórfido Dacítico y Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico, además existe una relación entre la Ley de Mo y la recuperación de Mo la cual se modela mediante una regresión logarítmica.
6. Las Brechas Hidrotermales muestran un control del Factor K sobre la recuperación de Mo, el cual también se modela mediante un ajuste exponencial, de manera menos precisa que las Brechas Ígneas. La Brecha de Anhidrita es una excepción

a este comportamiento, donde el Factor K no presenta una relación con la Recuperación de Mo, sin embargo el porcentaje de MoNS en la BXANH tiene una fuerte correlación positiva con el porcentaje de alteración HT en la roca. Si la Ley de Mo es muy alta en la Brecha de Cuarzo (mayor a 0.03%), también la ley presenta un control importante sobre la recuperación, el cual no se encuentra modelado, debido a la escasez de datos, pero que presenta los mayores valores promedio de Ley de Mo y recuperación de Mo de todo el yacimiento.

7. Las rocas al este del yacimiento presentan una recuperación controlada por el límite HT/HP. En el sector del Dominio HT, tanto la Ley de Mo como el Factor K son parámetros trascendentes que controlan la recuperación de Mo. En cambio en el Dominio HP, únicamente el Factor K tiene un control sobre la recuperación de Mo que se refleja en una correlación negativa entre ambos parámetros.
8. La recuperación de Mo de las rocas del Complejo Máfico El Teniente, se encuentra correlacionada negativamente con el Factor K y su relación con la Ley de Mo en la roca es importante cuando la roca se encuentra cerca a los Pórfidos Dioríticos y al Complejo de Brechas Braden.
9. La alteración Hidrotermal Tardía se encuentra asociada positivamente a la Ley de Mo y negativamente al Factor K, al contrario de la alteración Hidrotermal Principal. Esto se refleja en un control moderado de la alteración hidrotermal sobre la recuperación de Mo, donde existe un aumento de la recuperación a medida que aumenta el porcentaje de alteración HT en la roca y una disminución de ésta a medida que aumenta el porcentaje de alteración HP.

7 CONCLUSIONES

La recuperación metalúrgica de un mineral de mena en el proceso de flotación de planta en la industria minera, es un parámetro que se ve afectado por diversos factores tales como, fallas del equipo, problemas en el proceso de molienda, errores operacionales del trabajador, diferentes valores de las variables utilizadas en el proceso según la planta, factores geomecánicos de la roca procesada, etc. Para realizar una mejor planificación minera en base a un parámetro tan variable como lo es la recuperación, se busca estimar la recuperación que se obtendrá a partir de la información del material extraído como sus parámetros geoquímicos, geometalúrgicos y su sector productivo dentro del yacimiento. En el yacimiento El Teniente, esta estimación se obtiene mediante la elaboración de modelos de recuperación construidos en base a datos obtenidos de ensayos de flotación rougher, los cuales entregan el valor de la recuperación de una muestra con la ventaja de mantener constantes las variables del proceso. Para aproximar el modelo a la realidad del yacimiento, se incorporan parámetros geológicos como la litología, y las unidades geometalúrgicas de cobre (UGM) diseñadas para la planificación de la extracción del mineral primario en la mina.

Para el caso del Molibdeno, la información de la recuperación de Mo registrada en los ensayos de flotación rougher es relativamente reciente, ya que antiguamente no era solicitada por la superintendencia de geometalurgia. Para optimizar la planificación minera en el proceso de recuperación de Mo, se elaboró en el 2017 un modelo de bloques en base a las unidades geometalúrgicas de cobre donde se muestra la distribución de los valores recuperación de Mo estimados en el yacimiento.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar la ocurrencia y distribución de los minerales con presencia de Molibdeno en el yacimiento (principalmente Molibdenita), en base al modelo de recuperación realizado. Éste fue planteado con el propósito de comprender los aspectos geológicos que influyen en los valores de recuperación de Mo. Para cumplir con este objetivo fue necesario desarrollar un sistema de bases de datos que permitiera trabajar la información disponible de manera ordenada. Éste consistió en la disposición de la información geometalúrgica, geoquímica y mineralógica de 1254 muestras, donde también fueron incorporados diversos criterios geológicos.

Se determinó que existen diversos factores geológicos que controlan el comportamiento del Molibdeno en el yacimiento e influyen en su recuperación. Éstos son la litología, el límite primario secundario, la alteración y las características mineralógicas de la Molibdenita. Este control puede ser caracterizado con la ayuda de 2 parámetros geoquímicos, la Ley de Mo y el factor K, cuya relación con la recuperación de Mo varía dependiendo de los criterios geológicos ya mencionados.

Se evaluaron diversas variables geoquímicas y mineralógicas, de las cuales se encontraron correlaciones relevantes entre éstas con parámetros geometalúrgicos asociados al Molibdeno. Sin embargo los 4 criterios ya mencionados presentan el mayor control sobre la recuperación de Mo y sobre otras posibles variables relacionadas con el comportamiento del Molibdeno.

7.1 FACTORES Y CRITERIOS GEOLÓGICOS

De los 4 factores geológicos determinados, la litología es el factor predominante ya que además de ejercer un control sobre la el comportamiento del Molibdeno y sus parámetros asociados (Ley y recuperación), también presenta una influencia sobre los demás criterios geológicos, con excepción del Límite Primario/Secundario. Esto se ve reflejado en los resultados estudiados, donde los valores de correlación entre los parámetros geometalúrgicos y geoquímicos de interés con de los demás factores geológicos, presentan aumentan al incorporar el criterio litológico al análisis.

7.1.1 Litología

El comportamiento del Mo en los intrusivos félsicos se encuentra representado de manera precisa, mediante una caracterización realizada en base a la relación existente entre la Ley de Molibdeno y el Factor K, con la recuperación. Se destaca que los pórfidos dioríticos presentan los valores más altos de mineralización y recuperación de Mo dentro de los intrusivos del yacimiento. Las muestras del Complejo Máfico El Teniente abarcan el 70% de los datos y éstas se encuentran repartidas por todo el yacimiento, es por esto que los modelos planteados para estimar la recuperación de Mo, en función de su la relación con los parámetros geometalúrgicos no presentan buenos coeficientes R^2 . No obstante al agrupar los distintos datos en función a su ubicación en el yacimiento y su cercanía con otras litologías, se obtienen mejores correlaciones y se mantiene la relación encontrada entre el Factor K, la Ley y la Recuperación de Molibdeno.

Debido a la escasez de datos, las brechas ígneas del yacimiento fueron evaluadas en conjunto, al igual que las brechas hidrotermales, al querer caracterizar el comportamiento del Mo se determinó que en ambas se encuentra una marcada correlación negativa entre el Factor K y la recuperación de Mo. Se destacan al igual que el PDI en los intrusivos, la Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico, la Brecha de Anhidrita y la Brecha de Cuarzo por presentar las leyes y recuperaciones de Mo más altas del yacimiento. En estas litologías el evento de alteración de procedencia del Molibdeno y las características mineralógicas de la Molibdenita presentan una mayor importancia en su influencia sobre la recuperación de Mo.

En general los modelos realizados para las diferentes litologías resultarían más precisos si hubiera una mayor cantidad de datos disponibles en la base de datos, en particular se requieren más datos de la cantidad de la concentración Molibdeno no sulfurado y recuperación de Mo en muestras de brechas ígneas e hidrotermales, para poder crear un modelo representativo de cada tipo de brecha.

7.1.2 Límite Primario/Secundario

Al agregar el factor geotécnico a la base de datos, es decir clasificar los datos de acuerdo a su zona geotécnica se pudo obtener 3 grandes conclusiones. Primero se comprobó la existencia de un límite hidrotermal al este del yacimiento que marca la transición entre un dominio de vetillas hidrotermales el cual disminuye a medida que aumenta la distancia con la Brecha Braden, pasando a un dominio de vetillas hidrotermales principales. Se encuentra que la Ley y recuperación de Mo es mayor

cuando la roca se encuentra dentro del dominio hidrotermal tardío y que la recuperación de Mo se asocia más con el Factor K dentro del dominio hidrotermal principal.

La segunda conclusión importante obtenida a partir de la zonación geotécnica fue las diferencias de los resultados que presentan las zonas correspondientes a la Pipa Braden en comparación al resto del yacimiento. El sector de la Pipa Braden presenta una alta Ley de Mo, un alto Factor K y una baja recuperación de Mo, debido al estilo de mineralización fino y en matriz de brecha de la Molibdenita.

Finalmente, la zona secundaria, correspondiente a la zona de alteración supérgena del yacimiento, presenta una baja Ley de Mo, un muy alto Factor K y una baja recuperación de Mo. Esto ocurre producto que existe una escasa mineralización de Molibdenita en esta zona, producto que el Molibdeno fue lixiviado y reprecipitado en forma de Molibdatos.

A partir del análisis de los resultados según la alteración y zona geotécnica del yacimiento, pudo realizarse una caracterización del Molibdeno no sulfurado, concluyéndose de que se trata de 2 clases de minerales. Uno de ellos corresponde a sulfosales clasificadas como Molibdatos (Powellita, Scheelita-Powellita, Ferromolibdita), los cuales fueron formados a partir del enriquecimiento supérgeno de Molibdeno en la zona secundaria. El otro corresponde a la mineralización de cristales de Molibdenita muy finos encontrados en brechas hidrotermales, principalmente en la Brecha Braden y vetillas HT al suroeste de la Brecha Braden.

7.1.3 Alteración y Características Mineralógicas

La alteración de la roca fue evaluada a través de los datos de mapeo de alteración de la base de datos de El Teniente, además de realizarse un mapeo de sondajes y descripción de vetillas, en donde se caracterizó el porcentaje del evento de alteración de procedencia del Molibdeno en la muestra y las características mineralógicas de la Molibdenita.

A partir de ese estudio, se comprobó la información manejada por la superintendencia de geología, que la Molibdenita en el yacimiento El Teniente precipitó principalmente en 2 de los 3 eventos de alteración principales del yacimiento. Primero en un evento temprano, conocido como Tardimagmático donde precipitó aproximadamente el 75% del Mo presente en el yacimiento en asociación con minerales de cuarzo, epidota, sericita y sulfuros de cobre. El segundo gran evento de mineralización de Molibdenita tuvo lugar en la etapa de alteración Hidrotermal Tardía, la cual consiste en una alteración fílica en donde precipitó alrededor del 25% del Mo encontrado en el yacimiento. Finalmente existe una baja precipitación, menor al 1% de Mo en el yacimiento en el evento Hidrotermal Principal, donde la Molibdenita se encuentra asociada principalmente a calcopirita.

Junto con identificar los eventos de alteración donde ocurre la Molibdenita, se definieron 12 estilos de mineralización de la Molibdenita y se clasificaron en conjunto con las asociaciones minerales de la Molibdenita, en función del evento de alteración del yacimiento en donde éstos fueron observados. Se concluye que la Molibdenita en el

yacimiento El Teniente presenta estilos de mineralización y asociaciones minerales propias de cada etapa de alteración, siendo la litología un factor secundario en la clasificación. Además el tamaño promedio de los cristales también varía en función de la alteración. Donde la alteración Tardimagmática se encuentran cristales de tamaño variado que pueden llegar hasta 1 cm de largo o mayor, en la alteración Hidrotermal Principal presenta cristales más pequeños, asociados con calcopirita con un largo no mayor a 2 mm, y finalmente en la alteración Hidrotermal Tardía, la Molibdenita se encuentra en pequeños cristales de un largo máximo de 100 μm , sin embargo generalmente se encuentra de forma diseminada muy fina o masiva con un tamaño promedio de cristales menor a los 15 μm .

Al sumar los resultados obtenidos de la caracterización mineralógica a escala macroscópica y microscópica de la Molibdenita, con los estudios de flotación y análisis de mineralogía QEMSCAN realizados se concluye que las características mineralógicas de la Molibdenita controlan de manera directa la posterior recuperación de Mo en el proceso de flotación. Además estas características mineralógicas están controladas por el evento de alteración donde proviene la Molibdenita, donde el mineral proveniente de eventos tardimagmáticos presenta características que favorecen una mejor recuperación.

Finalmente se entrega una explicación a la correlación negativa existente entre la alteración hidrotermal principal con la recuperación de Molibdeno, atribuyéndose a la presencia de sericita la cual se dificulta la flotación de Molibdenita al adherirse a los cristales de mineral de mena.

7.2 UNIDADES GEOMETALÚRGICAS

Finalmente mediante la determinación de los controles geológicos sobre el comportamiento del Molibdeno y haciendo uso de la relación entre la recuperación de Molibdeno, la Ley de Molibdeno y el Factor K dependiendo de la ubicación en el yacimiento, se definieron los criterios base para poder desarrollar Unidades Geometalúrgicas de Molibdeno.

Estos criterios permiten optimizar el Modelo de Recuperación de Molibdeno elaborado en el 2017, entregándole herramientas para otorgar un mayor carácter geológico al modelo. Se concluye a partir de estos criterios que:

- La alteración supérgena en la zona secundaria presenta resultados similares en todo el yacimiento, independiente de la litología involucrada.
- La litología es el factor geológico más dominante para definir los criterios, ya que los modelos realizados que estiman el comportamiento de la recuperación de Mo en base a las variables geometalúrgicas y las correlaciones encontradas son más precisos cuando se agrupan las muestras de acuerdo a su litología y en general la mayoría de los sectores del yacimiento se encuentra bien caracterizado dentro de los criterios, únicamente incorporando un factor litológico.
- La alteración influye directamente en las características mineralógicas que presenta la Molibdenita y como éstas controlan la recuperación de Mo. Este criterio resulta de utilidad para caracterizar sectores en el yacimiento cuya litología no

tiene un modelo de distribución de recuperación preciso, como en el Complejo Máfico El Teniente en el sector este del yacimiento, cuando existe una alta presencia de brechas ígneas o hidrotermales, y para caracterizar sectores que presenten una litología variada o fuertes diferencias marcadas por la alteración del yacimiento, como sucede en el sector al Suroeste de la Brecha Braden.

7.3 ACTUALIDAD Y PROYECCIONES FUTURAS

Actualmente en el yacimiento casi no se encuentran sectores con alteración supérgena, ya que ésta se encuentra en los sectores más someros del yacimiento y por tanto ese material ya ha sido extraído, con la excepción del Rajo Sur. Esto resulta beneficioso para el proceso de recuperación de Mo, puesto que las zonas de alteración supérgena en el yacimiento presentan los valores más bajos tanto de Ley como de recuperación de Molibdeno en el yacimiento.

Una situación similar sucede con la alteración hidrotermal en el yacimiento, a medida que aumenta la profundidad de la explotación del material, el porcentaje de alteración hidrotermal en la roca baja, ya que ésta se encuentra presente principalmente en las zonas superiores del pórfido cuprífero. Esto indicaría que en las producciones futuras de los niveles inferiores del yacimiento, se tendría un menor porcentaje de Molibdenita fina y de Molibdeno no sulfurado, la Molibdenita extraída sería principalmente proveniente de vetillas Tardimagmáticas, provenientes del emplazamiento de los intrusivos félsicos principalmente y su estilo de mineralización más predominante sería en cúmulos con cristales gran tamaño y en sutura cristalina en vetillas. Lo que implicaría un mayor tamaño de cristales y un mayor grado de liberación, por ende un aumento de la recuperación de Mo.

Esto se suma al hecho de un posible aumento en la Ley de Mo a medida que aumenta la profundidad, según lo indicado por Singer et.al. el 2008, que el enriquecimiento de Molibdeno en los yacimientos del tipo pórfido cuprífero aumenta con la profundidad del emplazamiento. No obstante se debe tomar en consideración una baja en el aporte de Molibdenita Hidrotermal al yacimiento lo que podría ocasionar una subsecuente disminución en la Ley.

7.4 RECOMENDACIONES FUTURAS

El objetivo de este trabajo fue realizar una caracterización geológica de la Molibdenita basado en el Modelo de recuperación del Molibdeno. En base a lo expuesto anteriormente se concluye que este objetivo fue cumplido de manera satisfactoria. No obstante, a continuación se exponen diversas recomendaciones que ayuden a profundizar en el desarrollo de este proyecto y que también puedan ser de utilidad para otros proyectos futuros.

La primera recomendación de este trabajo es incorporar los criterios base definidos en este informe al modelo de recuperación de Mo del yacimiento El Teniente, para así poder sentar las bases para desarrollar Unidades Geometalúrgicas de Molibdeno en el yacimiento.

También se recomienda realizar una caracterización detallada de los filosilicatos en el yacimiento según su evento de alteración correspondiente. Haciendo un énfasis en la descripción de los minerales de los halos de alteración de las vetillas. En conjunto se requiere solicitar al laboratorio SGS, la diferenciación de los filosilicatos en asociación con los minerales de mena en los reportes QEMSCAN. La causa de estos requerimientos es el comportamiento dispar que existe entre los diferentes filosilicatos del yacimiento (Biotita, Clorita, Muscovita/Sericita, etc.) y la falta de información sobre su interacción con los minerales de mena.

De manera de mejorar el estudio realizado se pueden desarrollar ensayos de flotación selectiva de muestras, para comparar muestras; por ejemplo, de una misma litología, ley o alteración pero de diferentes sectores del yacimiento. Extender la caracterización de la Molibdenita realizada y realizar un mapeo de origen del Molibdeno a más muestras para ampliar la representatividad del estudio. En particular aumentar el mapeo y muestreo de tramos con litología de brechas ígneas e hidrotermales, de manera de poder caracterizarlas de manera independiente, no solo por litología, sino también por ubicación en el yacimiento.

Aumentar el muestreo geoquímico y geometalúrgico de manera general en todo el yacimiento, lo que permitirá realizar estudios de correlaciones y modelamientos numéricos de forma más precisa y aumentará la representatividad de los modelos geometalúrgicos realizados en el futuro. Para profundizar la investigación de este proyecto es recomendable obtener una mayor cantidad de datos de recuperación de Mo y del porcentaje de Molibdeno no sulfurado con el menor límite de detección posible (idealmente 0.001), especialmente en muestras de brechas ígneas e hidrotermales para poder realizar modelos de distribución representativos para cada tipo de brecha de manera individual. Además se puede complementar el estudio de mineralogía en microscopía QEMSCAN, mediante el estudio de las colas y los concentrados de las muestras seleccionadas. De esta manera se pueden conocer los minerales que se encuentran asociados a la Molibdenita que no es recuperada luego del proceso de flotación.

Finalmente se recomienda realizar un modelo de alteración del yacimiento El Teniente. Este modelo resultará de utilidad para evaluar el comportamiento de los diferentes minerales de mena en los diversos sectores del yacimiento. Por lo tanto un modelo de alteración ayudará a sustentar los datos ya obtenidos en este proyecto y permitirá comprender de mejor manera los resultados encontrados en trabajos posteriores.

8 BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, L. 1960. Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. vol. 9.

Álvarez, L. 1990. Perfil de alteración y mineralización Supérgena en el yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 99 pp., Antofagasta.

Arévalo, A. y Floody, R. 1995. Modelo global de alteración y mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 158 pp., Rancagua.

Arredondo, C. 1994. Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brecha ubicados en el sector central este del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 99 pp., Santiago.

Aubouin, J., Borrello, A., Cecioni, G., Charrier, R., Chotin, P., Frutos, J., Thiele, R. and Vicente, J.-C., 1973. Esquisse paleogeographique et structurale des Andes meridionales: Revue de Geographic Physique et Geologic Dynamique, v. 15 N° 112, p. 11-72.

Burgos, L. 2002. Petrografía y geoquímica de la diabasa y diques basálticos que constituyen las “andesitas de la mina” en el yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 108 pp., Concepción.

Camus, E. 1975. Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock alteration. Economic Geology, Vol.70, N°8, pp. 1.341 - 1.372.

Cannell, J., 2004. El Teniente porphyry copper-molybdenum deposit, central Chile: Unpublished Ph.D. thesis, Hobart, Australia, University of Tasmania, 299 p.

Cannell, J., Cooke, D.R., Walshe, J.L., and Stein, H., 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit: Economic Geology, v. 100, p. 979–1003.

Charrier, R. 1981. Mesozoic and Cenozoic Stratigraphy of the central Argentinean-Chilean Andes (32°-35° S) and Chronology of their Tectonic Evolution. Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie. (3/4), pp. 344-355. Stuttgart.

Charrier, R. 1983. Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja El Teniente. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito), N° 929. Santiago.

Charrier, R. y Munizaga, F. 1979. Edades K-Ar en vulcanitas Cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile (34°15' latitud sur). Revista Geológica de Chile, N°7, pp. 41 - 51. Santiago.

Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Spichiger, S. y Zapata, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las Formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre los 33°50" y 35°, Cordillera Principal chilena. Actas del VII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, pp. 1.316 – 1.319, Concepción.

Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Mark, N., Zapatta, F., Mckenna, F., Novacek, N. 1996. New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35° S, Central Chile). Journal of South American Earth Sciences, vol. 9, p. 393-422.

Charrier, R., Farias, M., Maksaev, V. 2009. Evolución Tectónica, Paleogeográfica y Metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile Norte y Central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Revista de la Asociación Geológica Argentina, vol. 65, p. 5-35.

Cuadra, P. 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. Revista Geológica de Chile, N°27, pp. 3 - 26. 118.

Davidson, J. & Vicente, J. 1973. Características paleogeográficas & estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) & Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15" latitud S). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, vol. 5, pp. 11-55.

Falcón, M. & Rivera, O. 1998. Estudio geológico distrital de la División El Teniente de Codelco- Chile, escala 1:25.000. Vicepresidencia de exploraciones y asociaciones mineras, Corporación Nacional del Cobre Codelco-Chile (Inédito): 108 pp. Santiago.

Floody, R. 2000. Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden. Fase 1, Geología de Brechas Braden (GL-044/00). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 90 pp., Rancagua.

Fonseca, S. 2017. Modelo de recuperación de Molibdeno, Yacimiento El Teniente (IFG-026-2017). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología: 23 pp., Rancagua.

Garrido, A. 2017. Distribución de la Molibdenita y control geológico en el yacimiento (Informe N° 1-003-2017). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología: 28 pp., Rancagua.

Garrido, I. 1995. Proyecto geodinámico mina El Teniente. Geología estructural del distrito y mina El Teniente y situación geodinámica regional. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología (Inédito): Tomo 1, 61pp., Rancagua.

Giambiagi, L., Ramos, V.A., Godoy, E., Álvarez, P.P. y Orts, S. 2003. Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33° and 34° south latitude. Tectonics 22(4): 1041.

Godoy, E. 1993. Geología del área entre los ríos Claro del Maipo y Cachapoal. Proyecto Codelco-Chile y Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito): Vol. 1, 78 pp. Santiago.

Guzmán, C. 1975. Alteración y mineralización de los pórfidos dioríticos del sector central del yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología 145 pp., Santiago

Howell, F. & Molloy, J. 1960. Geology of the Braden Orebody, Chile. Economic Geology, Vol. 55, p. 863-905.

Kay, S., & Kurtz, A. 1995. Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente Region. Informe inédito, 180 p. Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 180 pp., Rancagua.

Klöhn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de investigaciones Geológicas, boletín N°8, 95 pp. Santiago.

Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R. & Farrar, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°S). Revista Geológica de Chile, Vol. 24, N°1, 75 – 90 pp. Santiago.

Letelier, M. 2017. Inventario anual de recursos 2016, yacimiento El Teniente (GRMD-SGL-INF-004/2017). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología: 28 pp., Rancagua.

Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zúñiga, P. y Floody, R. 2001. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the El Teniente porphyry copper deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica. Pucón, Chile, Extended Abstracts. pp. 469 - 499.

Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruíz, J. y Thiele, R. 2002. El Teniente porphyry copper deposit in the Chilean Andes: new geochronological timeframe and duration of hydrothermal activity. 2002 Denver Annual Meeting. Paper N°152-4, 1 pp.

Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R.; Ruíz, J. y Zentilli, M. 2004. New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from UPb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. Society of Economic Geologists, Special Publication 11, pp.15-54.

Millán, J. 2014. Modelo de zonación geotécnica para el macizo rocoso en El Teniente (INF-091-2014). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología: 28 pp., Rancagua.

Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, R., Ruíz, J., McWilliams, M. y Thiele, K. 2002. Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. 2002 Denver Annual Meeting. Paper N°152-5, 1 pp.

Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A. y Mestre, A. 1980. El pórfido cuprífero El Teniente. Codelco Chile, Departamento de Geología, División El Teniente, Superintendencia de Geología (Inédito). 66 pp., Rancagua.

Ossandón, G. 1974. Petrografía y alteración del pórfido dacítico, yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito). 189 pp., Santiago.

Raghavan S. y Land L. HSU. 1984. Factors affecting the flotation recovery of Molybdenite from porphyry copper ores. International Journal of Mineral Processing, v. 12, pp. 145-162.

Rivera, O y Cembrano, J. 2000. Modelo de formación de cuencas volcanotectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central & su relación con estructuras NNW-NW (33° 00"-34° 30"S). Actas IX Congreso Geológico Chileno. 31 de Julio - 4 de Agosto. Puerto Varas. Chile, v.1, p. 631-636.

Rivera, O. & Falcón, F. 2000. Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33°45"-34° 30" S). IX° Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, v.1, pp. 819-823.

Rocha, M. 2016. Estudio de los controles geológicos y mineralógicos de la recuperación de molibdeno en la mina Los Bronces. Trabajo Integrativo Final para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra: 51 pp., Concepción.

Rojas, E.; Molina, R. & Cavieres, P. 2001. Preundercut caving in El Teniente mine, Chile. En Hustrulid, W. R. & Bullok, R. (Eds.) Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies. Colorado, SME.

Singer, D.A., Berger, V.I., and Moring, B.C., 2008. Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models: USGS Open-File Report 2008-1155.

Skewes, M. 1999. Notas petrográficas sobre algunas brechas de El Teniente. Codelco Chile División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 34 pp., Rancagua.

Skewes, M. 2000. Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile. Codelco-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 94 pp., Rancagua.

Skewes, M. y Arévalo, A. 1997. Andesitas de la mina El Teniente. Actas del VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, pp. 1.162 - 1.164. Antofagasta.

Skewes, M. y Arévalo, A. 2000. El complejo de gabros y diabasas que hospeda a las brechas mineralizadas del depósito de cobre El Teniente, Chile Central. Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, pp. 380 - 384. Puerto Varas. 123

Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P. y Stern, C. H. 2002. The giant El Teniente breccia deposit: Hypogene copper distribution and emplacement. Society of Economic Geologist, Special Publication 9, Chapter 14, pp. 299 - 332.

Skewes, M. & Stern, Ch. 1995. Genesis of the Giant Late Miocene to Pliocene copper deposits of Central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. International Geology review, Vol. 37, p. 893-909.

Spencer, E., Wilkinson, J., Creaser, R. and Seguel J. 2015. The Distribution and Timing of Molybdenite Mineralization at the El Teniente Cu-Mo Porphyry Deposit, Chile: Economic Geology, v. 110, pp. 387-421.

Stern, C. H. y Skewes, M. 1997. Subduction of the Juan Fernández Ridge below Central Chile: effects on subduction geometry, rates of subduction erosion, arc migration and magma chemistry, and genesis of copper deposits. Actas del VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3, pp. 1.724 - 1.728. Antofagasta. Ph.D. Thesis, University of Tasmania (Inédito), 317 pp., Tasmania.

Thiele, R. 1980. Hoja Santiago. Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000. Nº 39, 51 pp. Santiago.

Thiele, R., Beccar, I., Levi, B., Nyström, J. O. y Vergara, M. 1990. Tertiary Andean Volcanism on Caldera-Graben Setting. In Symposium International de Geodynamique Andine, Resúmenes del Communications, pp: 309. Grenoble.

Valenzuela, R. 2003. Mineralización Sulfurada Hipógena de Cobre en el Sector Central del Yacimiento El Teniente VI región. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de La Tierra (Inédito): 118 pp. Concepción.

Villalobos, J. 1975. Alteración Hidrotermal en las Andesitas del Yacimiento El Teniente. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito). 125 pp., Santiago.

Vry, V.H., Wilkinson, J.J., Seguel, J., and Millán, J., 2010. Multistage intrusion brecciation and veining at El Teniente, Chile: Evolution of a nested porphyry system: Economic Geology, v. 105, p. 119–153.

Zanin, M., Ametov, I., Grano, S., Zhou, L., and Skinner, W. 2009. A Study of mechanisms affecting Molybdenite recovery in a bulk copper/molybdenum flotation circuit. International Journal of Mineral and Processing, v. 93, p 256-266.

Zhou, L. 2010. Molybdenite Flotation. Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy: Applied Science. University of South Australia, Ian Wark Research Institute, Arc Especial Research Center for Particle and Material Interfaces. 153 pp. Mawson Lakes, South Australia.

Zúñiga, P. 1982. Alteración y mineralización hipógenas en el sector oeste del Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 104 pp., Santiago.

9 ANEXOS

ANEXO A. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PRELIMINARES

En un principio para observar la distribución de los datos de Ley de Mo se realizó un ajuste normal en base a los datos de la Tabla 4.3.

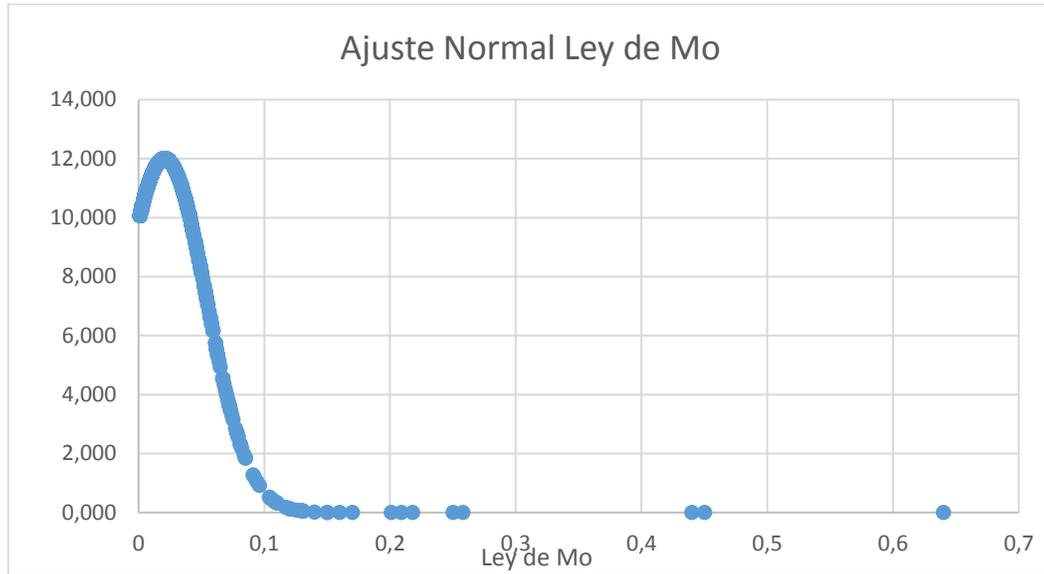


Gráfico 9.1: Densidad de probabilidad con distribución Normal para las Leyes de Mo

Del gráfico se aprecia la existencia de valores aberrantes los cuales pueden dificultar el ajuste y entorpecer la visualización de la función densidad de probabilidad, por ende se procedió a quitar los datos aberrantes. Luego de esto se procedió nuevamente a obtener los parámetros estadísticos para poder ajustar los datos a una distribución normal.

Tabla 9.1: Parámetros estadísticos de la Ley de Mo sin datos aberrantes

1er Cuartil	0.005
2ndo Cuartil	0.013
3er Cuartil	0.023
Media	0.017
Desviación estándar	0.015
Varianza	0.0002

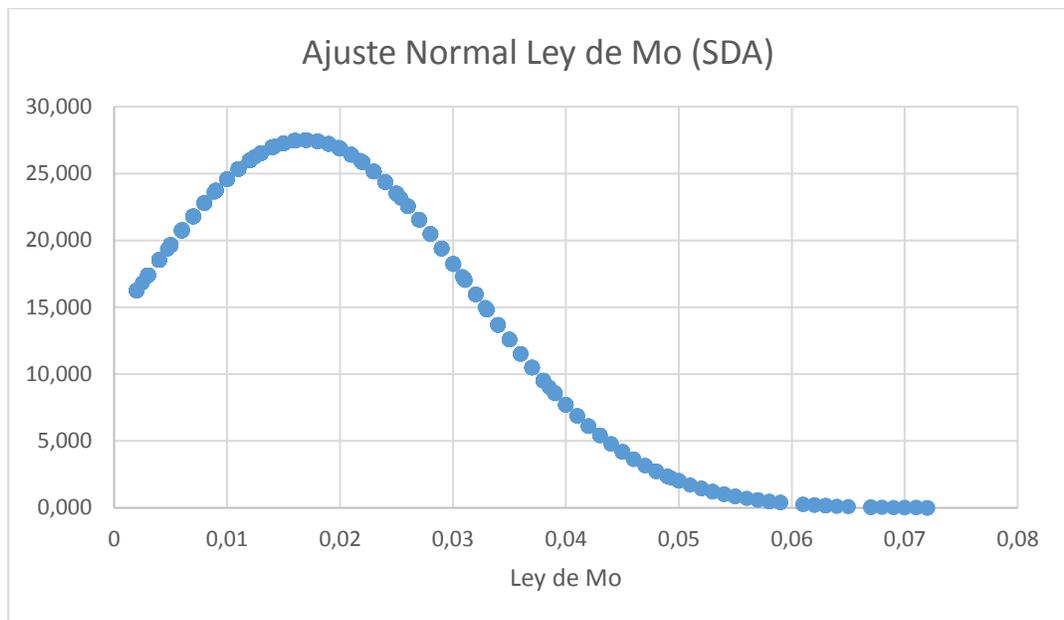


Gráfico 9.2: Ajuste Normal de distribución de las Leyes de Mo, sin datos aberrantes

Se observa que la media de los datos es muy pequeña comparada con los datos mayores al tercer cuartil y además que la desviación estándar de los datos es muy grande, por ende se determina que el mejor ajuste para desarrollar la función densidad de probabilidad de los datos de Leyes de Mo es una distribución Log-normal.

Posteriormente se procedió a realizar la función densidad de probabilidad con una distribución Log-normal para la Ley de Cobre de las 1549 muestras con la información requerida presentes en la base de datos. Se obtienen las variables estadísticas tanto para la Ley de Cu como para el Logaritmo Natural de la Ley que se observan en la Tabla 9.2 y posteriormente se procede a realizar el gráfico de distribución (Ver Gráfico 9.3Gráfico 4.1).

Tabla 9.2: Parámetros estadísticos para la Ley de Cu

Media Ley de Cu	0.858
Desviación Ley de Cu	0.477
Media Ln(Ley de Cu)	-0.299
Desviación Ln(Ley de Cu)	0.567

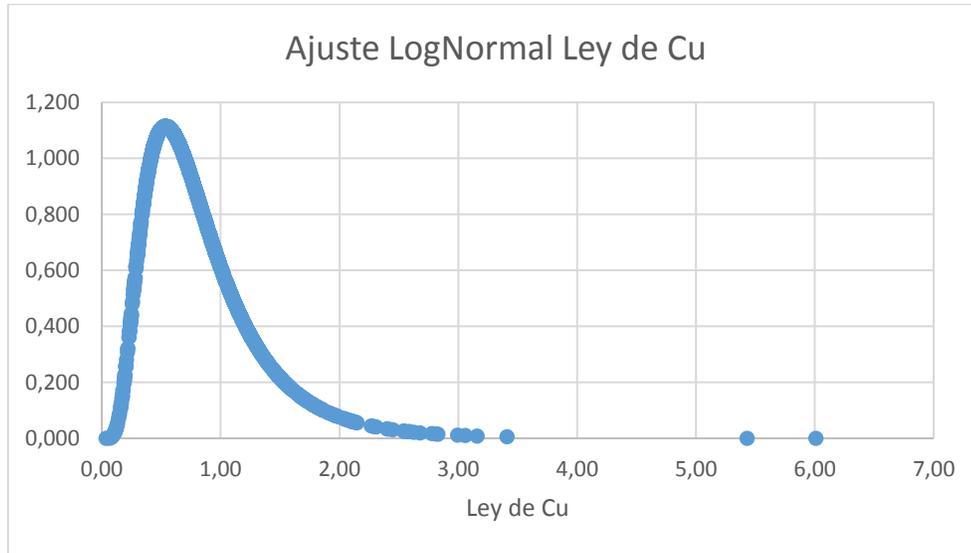


Gráfico 9.3: Densidad de probabilidad con distribución Log-Normal para las Leyes de Cu

Histograma de Ley de Cu

Al igual que en el Gráfico 4.2 se realizó un Histograma de la distribución de la Ley de Mo en el yacimiento, se realizó un histograma de la distribución de la Ley de Cu. Como los valores de las Leyes de Cobre son superiores, para realizar el histograma que se encuentra en el Gráfico 9.4 se consideraron datos con una Ley de Cobre menor al 3%, donde 5 muestras presentan valores más altos.

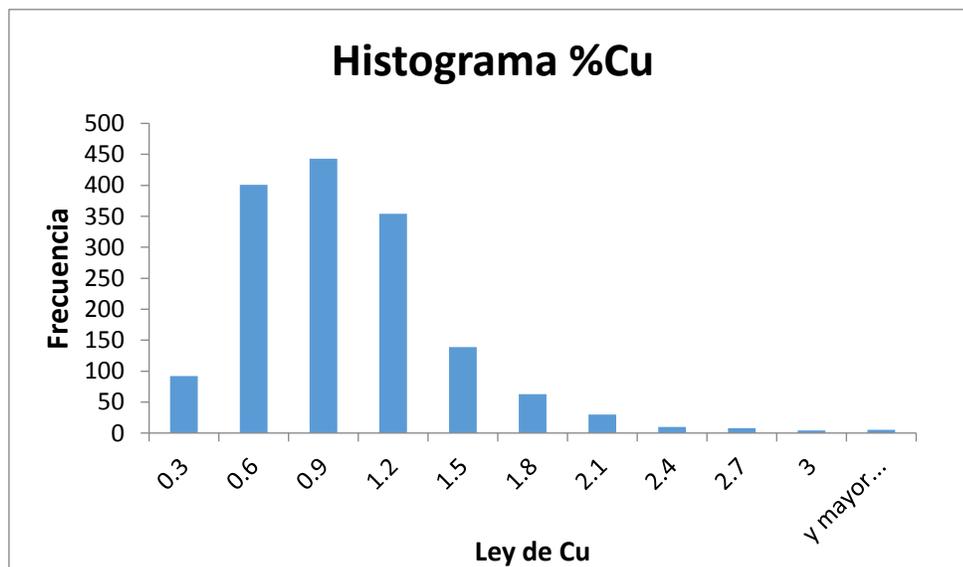


Gráfico 9.4: Histograma de Ley de Cu

Como puede observarse en el caso de la distribución de la Ley de Cu, se aprecia que el histograma de ley de Cu es diferente al de Mo del Gráfico 4.2, puede verse en el histograma del Gráfico 9.4 que la moda de la Ley de Cu se encuentra entre los 0.6% y 0.9% de Cu en las muestras.

De la misma manera que se evaluaron las muestras por litología en el Gráfico 4.4 y Gráfico 4.5, se evaluó la distribución de los datos de recuperación y Ley de Mo según el sector productivo al cual pertenecen las muestras.

Tabla 9.3: Parámetros estadísticos de la Recuperación de Mo por Sector Productivo

Sector	Diablo Regimiento	Esmeralda	Esmeralda Sur	Pacífico Superior	Recursos Norte	RENO	Rajo Sur
Valor mínimo	17.00	36.72	36.85	28.60	11.64	52.02	18.90
1er Cuartil	57.21	82.05	71.03	42.95	69.67	78.44	62.28
Mediana	75.63	85.97	80.15	61.25	79.04	82.19	75.10
3er Cuartil	81.56	89.47	84.13	68.08	86.97	87.15	81.88
Valor máximo	89.50	94.52	93.58	84.97	97.16	94.44	95.40
Media	68.56	84.34	76.32	56.80	75.75	81.35	70.29

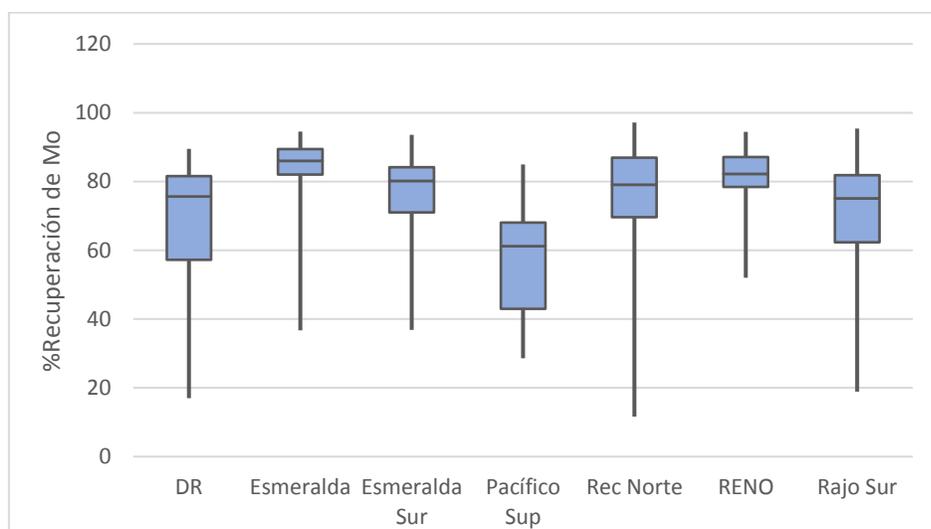


Gráfico 9.5: Diagrama Box Plot para la Recuperación de Mo por Sector Productivo

Tabla 9.4: Parámetros estadísticos de la Ley de Mo por Sector Productivo

Sector	Diablo Regimiento	Esmeralda	Esmeralda Sur	Pacífico Superior	Recursos Norte	RENO	Rajo Sur
Valor mínimo	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.003	0.001
1er Cuartil	0.007	0.018	0.012	0.005	0.005	0.015	0.002
Mediana	0.017	0.027	0.020	0.015	0.011	0.020	0.004
3er Cuartil	0.032	0.039	0.034	0.027	0.017	0.031	0.007
Valor máximo	0.218	0.250	0.450	0.258	0.117	0.440	0.150
Media	0.026	0.035	0.028	0.021	0.014	0.029	0.007

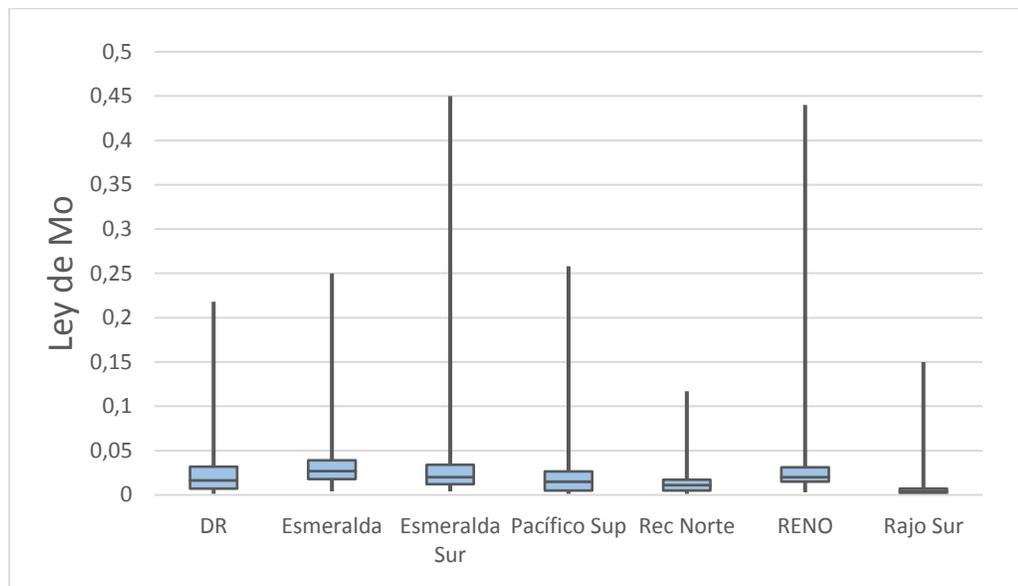


Gráfico 9.6: Diagrama Box Plot para la Ley de Mo por Sector Productivo

Al estudiar la distribución de las Leyes de Mo y la Recuperación de Mo en función de los Sectores Productivos del yacimiento, se ve que el sector Pacífico Superior presenta las recuperaciones más bajas con 56% de promedio como se puede observar en la Tabla 9.3: Parámetros estadísticos de la Recuperación de Mo por Sector Productivo y el Gráfico 9.5, de los mismos se distingue que el sector Reservas Norte (RENO) y el sector Esmeralda presentan las recuperaciones de Mo más altas, por sobre el 80%. En la Tabla 9.4 y el Gráfico 9.6 se muestra que todos los Sectores Productivos presentan Leyes medias de Mo similares las cuales oscilan entre los 0,21 y 0,35; con excepción del sector Rajo Sur y Recursos Norte con una Ley media de 0,7 y 0,14 respectivamente.

ANEXO B. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE RECUPERACIÓN DE MO VS FACTOR K POR LITOLOGÍA

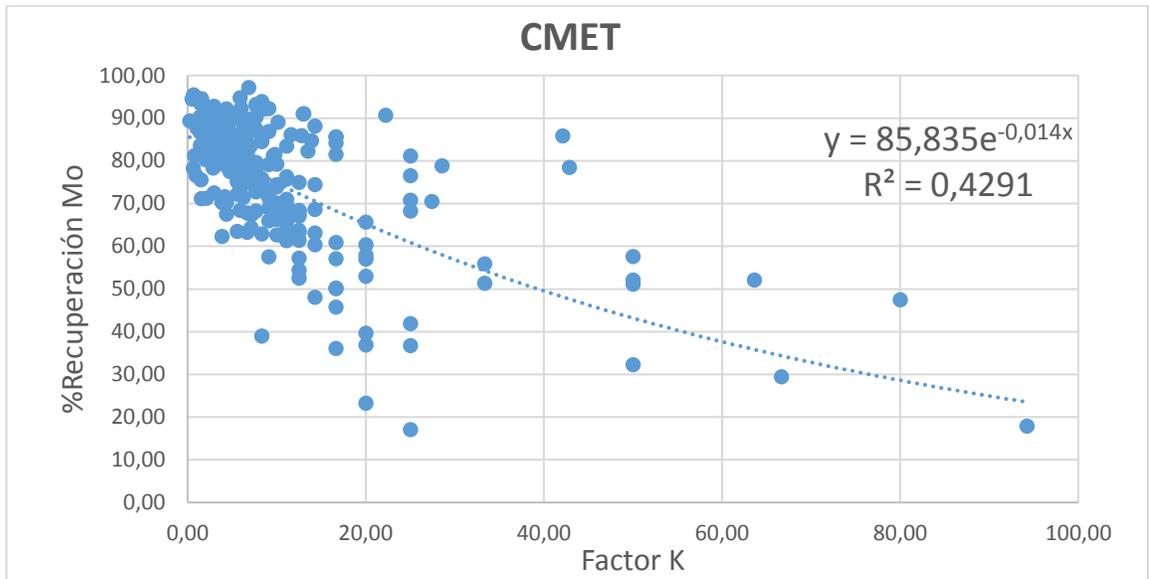


Gráfico 9.7: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del CMET

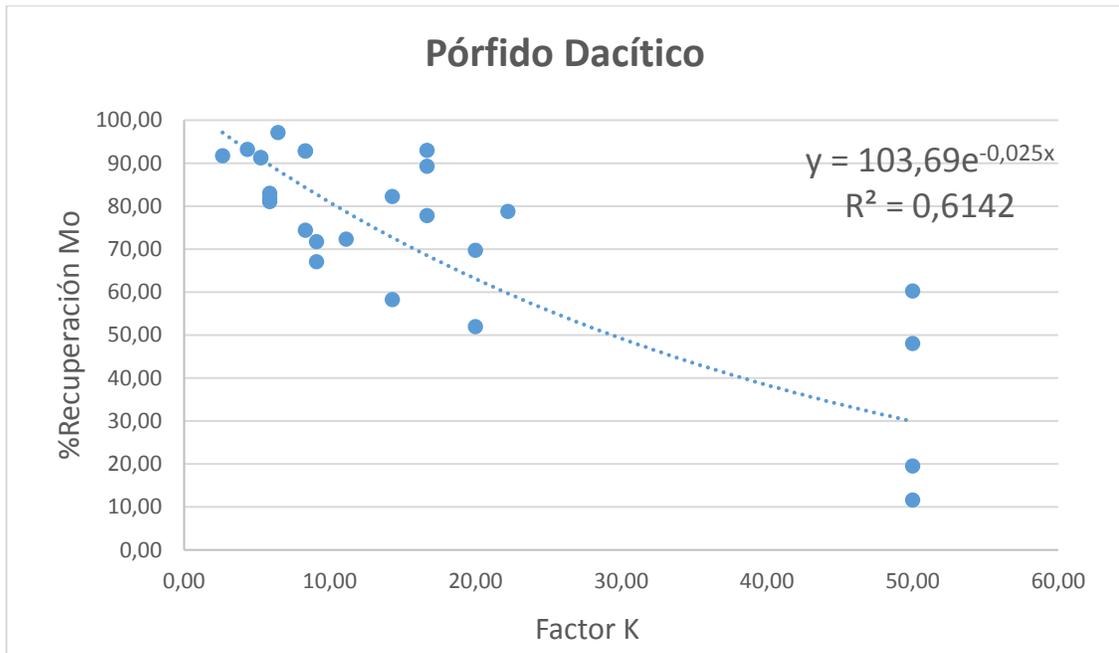


Gráfico 9.8: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del PDA

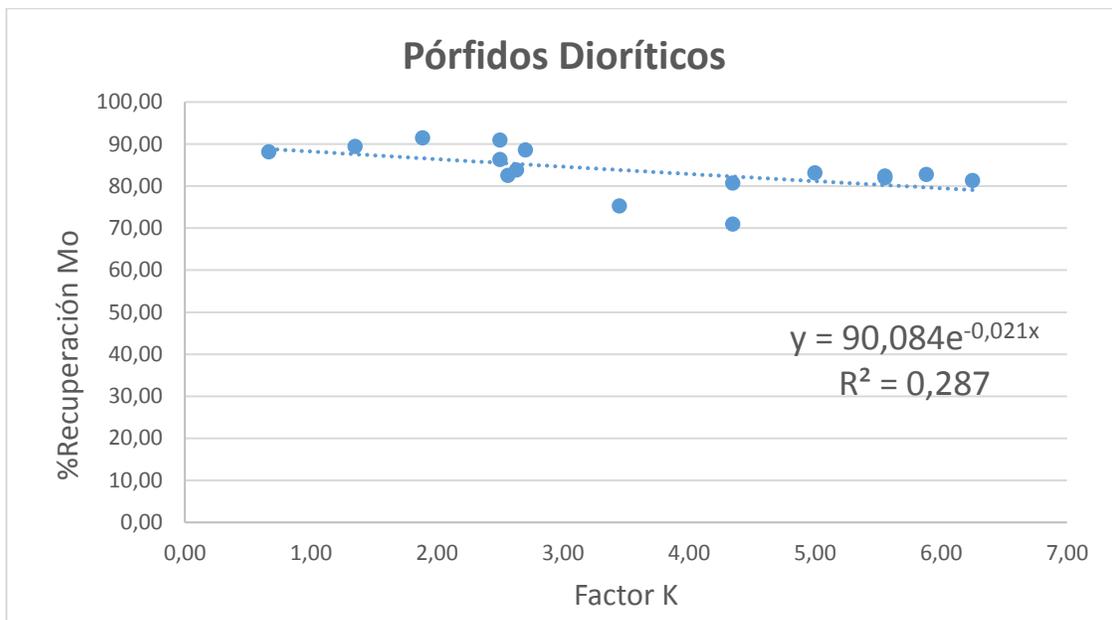


Gráfico 9.9: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del PDI

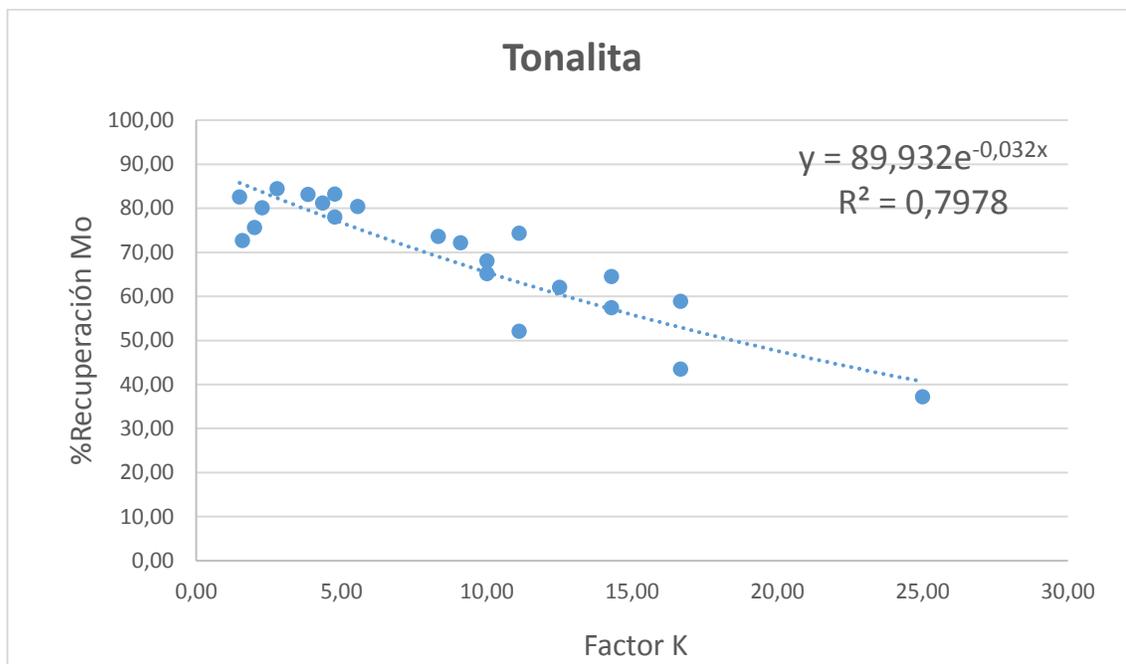


Gráfico 9.10: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las muestras de Tonalita

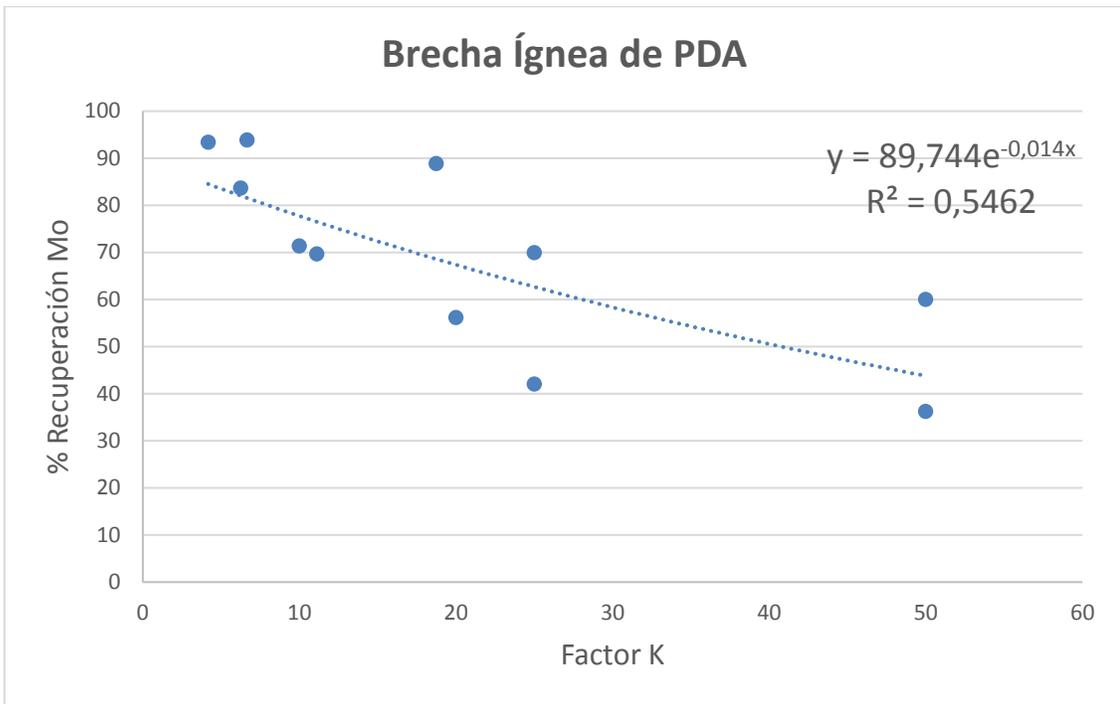


Gráfico 9.11: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del BXIPDA

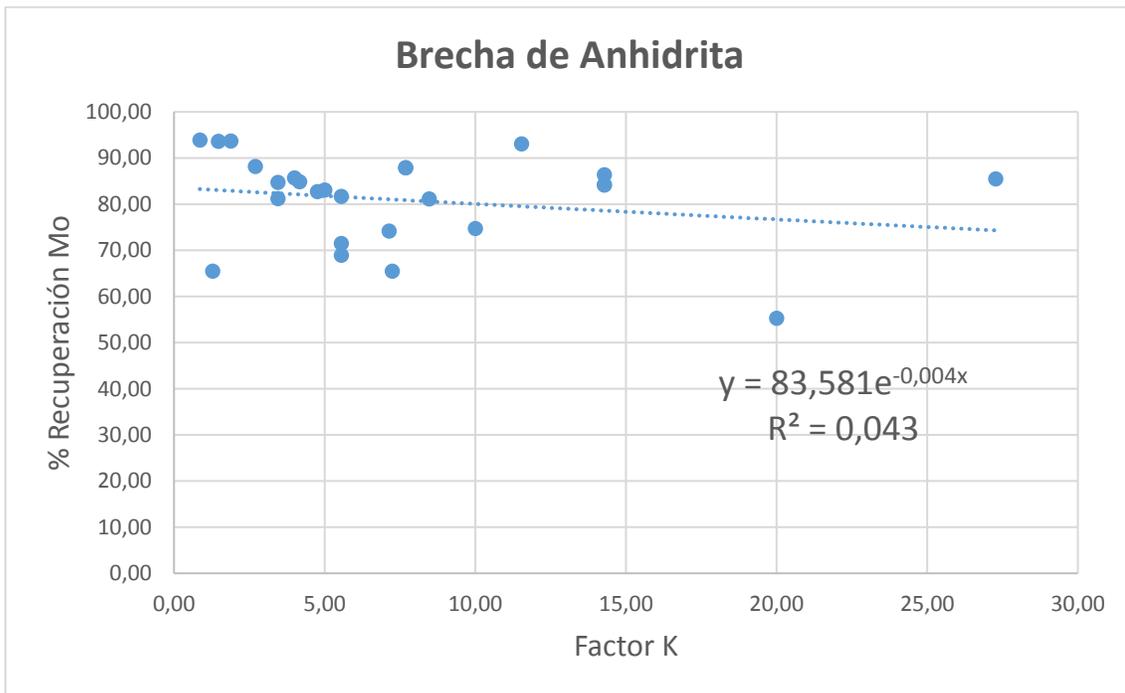


Gráfico 9.12: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para muestras del BXANH

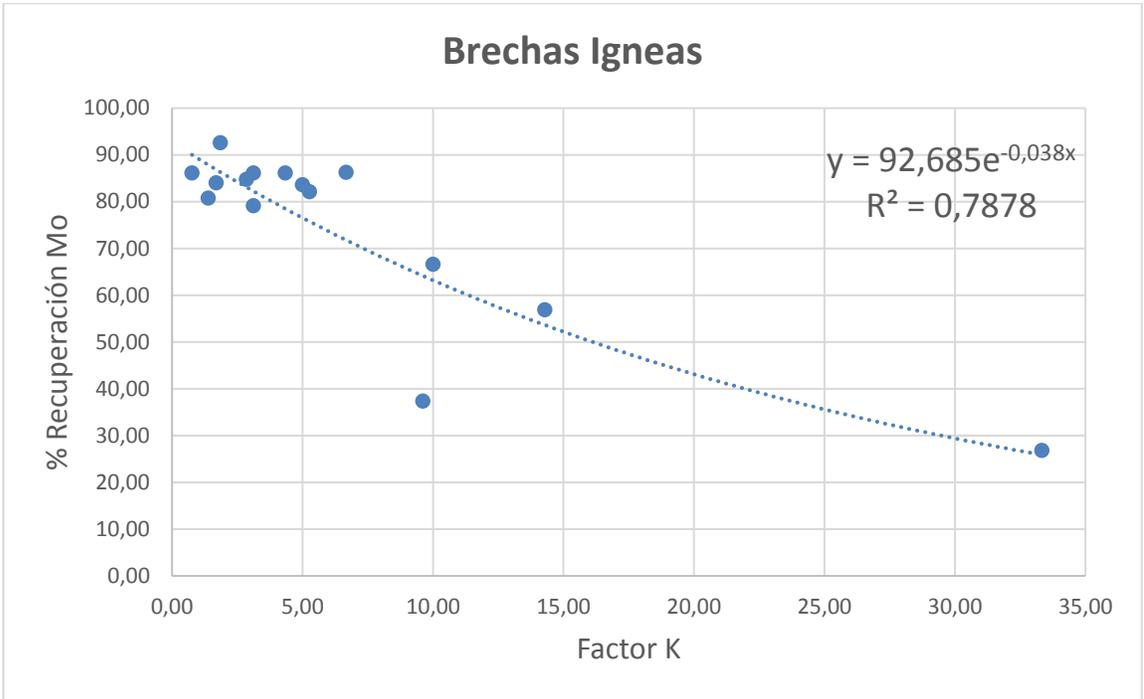


Gráfico 9.13: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las Brechas ígneas

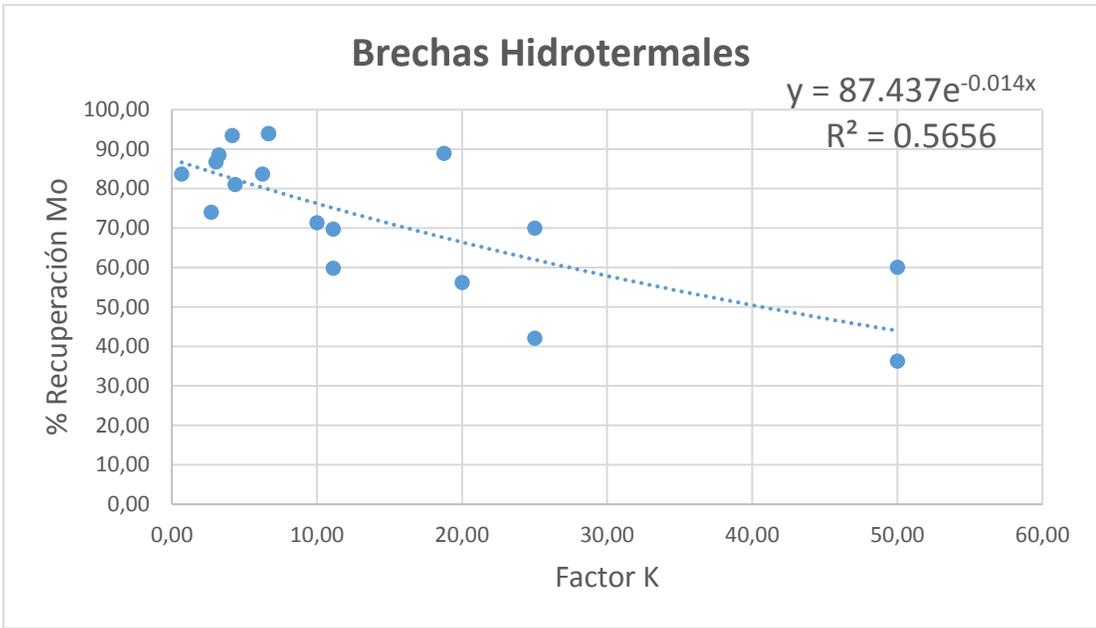


Gráfico 9.14: Recuperación de Mo vs Factor K con regresión exponencial para las Brechas de Turmalina, Cuarzo, Sulfuros y Sericita

ANEXO C. CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS GEOLÓGICOS Y GEOMETALÚRGICOS

Correlaciones logarítmicas de variables geometalúrgicas y la mineralogía

Para encontrar posibles correlaciones ocultas entre los parámetros estudiados, se aplicó un logaritmo para todos los datos, de forma de linealizar los Coeficientes de Pearson. Estas correlaciones Logarítmicas pueden observarse en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5: Correlaciones Logarítmicas entre la Mineralogía y los parámetros Geometalúrgicos principales

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(%Rec_Mo_Ro)	Ln(Molibdenita_%)
Ln(Cuarzo_%)	-0.359	-0.357	-0.137	-0.226
Ln(Plagioclasa_%)	0.119	0.061	0.155	0.049
Ln(Feldespato_K_%)	0.265	0.641	-0.009	0.029
Ln(Piroxeno_%)	-0.333	-0.666	-0.256	-0.150
Ln(Hornblenda)	0.402	-	-	0.142
Ln(Biotita_%)	0.381	0.121	0.203	0.277
Ln(Muscovita_Sericita_%)	-0.292	-0.515	-0.224	-0.188
Ln(Actinolita_%)	0.116	-	-	-0.128
Ln(Tremolita_%)	0.383	-	-	-0.134
Ln(Clorita_%)	-0.195	0.279	-0.127	-0.225
Ln(Epidota_%)	0.230	-0.509	-0.023	0.334
Ln(Arcillas_%)	-0.165	0.220	-0.368	-0.091
Ln(Caolinita_%)	-0.322	0.146	-0.314	-0.265
Ln(Ilmenita_%)	-0.073	-0.228	0.123	-0.053
Ln(Calcita_%)	0.442	-0.226	0.184	0.253
Ln(Anhidrita_Yeso_%)	0.407	0.429	0.303	0.275
Ln(Turmalina_%)	-0.109	0.705	-0.166	-0.277
Ln(Pirita_%)	-0.586	-0.496	-0.171	-0.399
Ln(Pirrotina_%)	-0.509	0.241	-0.195	-0.404
Ln(Tetraedrita_%)	-0.287	-0.024	-0.313	-0.218
Ln(Tennantita_Enargita_%)	-0.058	-0.136	-0.195	-0.053
Ln(Scheelita_%)	0.321	-	-	0.528
Ln(Powellita_%)	0.695	-	-	0.586
Ln(Calcopirita_%)	0.295	-0.128	0.287	0.374
Ln(Bornita_%)	0.297	-0.058	0.082	0.208
Ln(Calcosina_Digenita_%)	-0.001	-0.173	-0.115	0.091
Ln(Calcosina_Covelina_%)	-0.094	-0.243	-0.114	-0.180
Ln(Covelina_%)	-0.029	0.122	-0.151	-0.108

Al analizar estas correlaciones logarítmicas entre la mineralogía y las variables geometalúrgicas en la Tabla 9.5 se observa que las únicas correlaciones destacables que se presencian son entre el %MoNS y el % de Turmalina de 0,705, y entre el %MoNS y el % de Feldespato K de 0,641; también aparece una correlación negativa destacable de -0,666 entre el %MoNS y el % de Piroxeno en la roca.

La correlación logarítmica positiva encontrada entre el %MoNS y el % de Turmalina de 0,705 de la Tabla 9.5, puede explicarse debido a la gran cantidad de turmalina asociada a las Brechas Hidrotermales presentes en el yacimiento en las cuales aumenta la proporción de Molibdenita Fina no flotable. Las demás correlaciones logarítmicas encontradas referentes al MoNS y a los silicatos Feldespato Potásico y Piroxeno tienen la apariencia de ser falsas y aparecieron en los cálculos producto de la baja cantidad de Feldespato potásico y Piroxeno en El Teniente.

ANEXO D. CORRELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS Y LA ALTERACIÓN.

Correlaciones Logarítmicas

También se realizaron correlaciones logarítmicas de manera de poder comparar el comportamiento no lineal de los datos. Es importante destacar que al realizar correlaciones logarítmicas puede perderse cierta información, ya que los datos cuyo valor es 0 no pueden ser registrados como logaritmos.

Tabla 9.6: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de CMET

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	Ln(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	0.355	1.000		
Ln(Factor K)	-0.780	0.308	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.600	0.057	-0.622	1.000
Ln(%PreTM)	-0.014	0.377	0.522	-0.076
Ln(%TM)	0.033	-0.113	-0.029	0.067
Ln(%HP)	-0.165	-0.126	0.046	-0.200
Ln(%HT)	-0.098	0.250	0.103	-0.060
Ln[f(HP)]	-0.070	-0.195	0.150	-0.052
Ln[f(HT)]	0.179	0.241	-0.088	0.233

Tabla 9.7: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Tonalita

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	Ln(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	-	1.000		
Ln(Factor K)	-1.000	-	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.793	-	-0.793	1.000
Ln(%PreTM)	-	-	-	-
Ln(%TM)	-0.276	-	0.276	-0.153
Ln(%HP)	-0.370	-	0.370	-0.264
Ln(%HT)	0.494	-	-0.494	0.136
Ln[f(HP)]	-0.623	-	0.623	-0.385
Ln[f(HT)]	0.579	-	-0.579	0.255

Tabla 9.8: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido dacítico

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	LN(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	-	1.000		
Ln(Factor K)	-	-	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.768	-	-0.766	1.000
Ln(%PreTM)	-	-	-	-
Ln(%TM)	-0.135	-	0.212	-0.300
Ln(%HP)	-0.331	-	0.391	-0.395
Ln(%HT)	0.287	-	-0.342	0.610
Ln[f(HP)]	-0.158	-	0.249	-0.146
Ln[f(HT)]	0.039	-	0.068	-0.059

Tabla 9.9: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Pórfido diorítico

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	LN(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	-	1.000		
Ln(Factor K)	-1.000	-	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.447	-	-0.706	1.000
Ln(%PreTM)	-	-	-	-
Ln(%TM)	-0.584	-	0.589	-0.209
Ln(%HP)	0.325	-	-0.363	0.310
Ln(%HT)	-0.172	-	0.223	-0.542
Ln[f(HP)]	0.190	-	-0.229	0.394
Ln[f(HT)]	-0.578	-	0.652	-0.611

Tabla 9.10: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de BXIPDI

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	LN(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	0.944	1.000		
Ln(Factor K)	-0.978	-0.854	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.080	0.209	-0.108	1.000
Ln(%PreTM)	-	-	-	-
Ln(%TM)	0.028	0.18695493	-0.226	0.693
Ln(%HP)	-0.269	-0.04028236	0.410	-0.973
Ln(%HT)	-0.530	-0.58155071	0.469	-0.087
Ln[f(HP)]	0.231	0.40892707	-0.097	-0.670
Ln[f(HT)]	-0.797	-0.78220865	0.770	0.454

Tabla 9.11: Correlaciones logarítmicas entre los parámetros Geometalúrgicos principales con los grados de alteración en las muestras de Brecha de Anhidrita

	Ln(%Mo_Cab)	Ln(%MoNS_Cab)	Ln(Factor K)	Ln(%Rec_Mo)
Ln(%Mo_Cab)	1.000			
Ln(%MoNS_Cab)	0.610	1.000		
Ln(Factor K)	-0.468	0.415	1.000	
Ln(%Rec_Mo_Ro)	0.610	-0.070	-0.695	1.000
Ln(%PreTM)	1.000	-	-	-
Ln(%TM)	-0.255	-0.856	-0.412	-0.060
Ln(%HP)	-0.125	-	0.047	-0.040
Ln(%HT)	0.285	0.905	0.613	-0.358
Ln[f(HP)]	-0.051	-	-0.203	0.049
Ln[f(HT)]	0.093	0.290	0.324	-0.133

ANEXO E. MAPEO DE TRAMOS DE SONDAJE

Se realizó el mapeo de más de 100 tramos de sondajes de muestreo, con una longitud de 12 metros, a continuación se exponen los registros obtenidos del mapeo.

Tabla 9.12: Mapeo de sondajes muestras 1 a 13

Sondaje	Muestra	Desde	Hasta	Litología	%TM	Mineralogía TM	%HP	Mineralogía HP	%HT	Mineralogía HT	Estilo de mineralización
DDH1891		428	468	BXQZ	50				50	Qz, Anh-Moly, Cpy	Moly en vetillas HT y matriz diseminada fina
DDH2310		378	390	CMET	59	Bo, Cpy, Moly escasa	41	Py		Cpy	Moly diseminada en vetillas TM
DDH2500		78	90	CMET	94	Bt, plg, Qz, Bo, Cpy, Moly escasa			6	Anh, Ser, Carb, Moly	Moly en sutura y diseminada en vetillas TM, Diseminada fina en vetillas HT
DDH2507		162	174	CMET	90	Bo Cpy Moly	1	Qz-Ser, Cpy, Py	9	Moly, Ten	Moly en sutura y diseminada en vetillas TM, Diseminada fina en vetillas HT
DDH2511		108	120	CMET	98	Bt, Qz, Tur, Bo, Cpy	1	Qz-Ser, Cpy	1	Moly	Moly diseminada fina en vetillas HT
DDH2513		60	72	PDI	98	Bt, Qz, Tur, Cpy, Moly			2	Moly	Moly diseminada en vetillas TM
DDH2514		90	102	PDI	95	Bo, Cpy, Moly	4.75	Qz-Ser, Cpy	<1		Moly diseminada en vetillas TM
DDH2521		173	185	CMET	<99	Moly, escasa	1		<1		Moly diseminada en vetillas TM
DDH2544		188	194	CMET	95	Anh-Qz-Tur, Cpy, Py, Bo escasa	5	Qz-Ser, Cpy, Moly			Moly en cúmulos asociada a Cpy en vetillas HP
DDH2558		90	102	PDI	97.5	Qz, Ser, Plg, Cpy, ; Moly	2.5	Qz-Ser, Cpy			Moly diseminada en vetillas TM
DDH2564		78	94	PDI	93	Qz-Anh-Tur, Cpy, Mo	7	Qz-Ser, Cpy			Moly en sutura, cúmulos, rosetas y masiva en vetillas TM
DDH2564		114	128	PDI	94	Qz-Anh-Tur, Cpy, Mo	4	Qz-Ser, Cpy	2	Anh, Ten, Cpy, Py	Moly en cúmulos lentiformes y diseminada en vetillas TM
DDH2583		90	105	CMET	99	Qz-Anh, Cpy, Bo, Moly escasa	<1	Qz-Ser-Tur, Cpy			Moly diseminada en vetillas TM

Tabla 9.13: Mapeo de sondajes muestras 14 a 27

Sondaje	Muestra	Desde	Hasta	Litología	%TM	Mineralogía TM	%HP	Mineralogía HP	%HT	Mineralogía HT	Estilo de mineralización
DDH2591	S1189	84	97	CMET	99	Qz, Cpy, Moly escasa	1	Cpy, Mo cúmulos			Moly en cúmulos en asociación con Cpy en vetillas HP
DDH2600		54	66	BXIPDI	81	Qz-Anh, Cpy	6	Qz, Cpy	13	Anh, Ten, Cpy, Py	Moly diseminada en vetillas TM
DDH2601		10	26	CMET	93	Qz-Anh-Tur-Bt, Cpy, Py, Moly		Qz, Cpy	2.5	Carb-Tur-Ser-Chl, Cpy, Ten	
DDH2602	S1190	104	120	CMET	97	Qz-Anh, Cpy, Bo, Moly escasa			3	Carb - Moly Fina, Qz-Cpy-Mo	Moly diseminada vetillas TM, Moly diseminada fina vetillas HT
DDH2606	S1208	42	54	CMET	99	Qz, Cpy, Anh		Qz	1	Moly en patina	Moly en patina diseminada fina, vetillas HT
DDH2607	S1209	93	108	CMET	99	Qz, Cpy, Anh			1	Qz, Ser, Moly y Cpy diseminada	Moly diseminada fina, y en patina vetillas HT
DDH2616	S1192	84	96	CMET	99	Qz-Anh, Cpy, Bo, Moly escasa	1	Qz, Cpy, Halo Ser			Moly trazas diseminada, en asociación con Bo
DDH2620	S1193	6	18	CMET	100	Qz-Ser, Tur, Cpy, Mo, Cov, Cc					Moly como sutura masiva en vetas TM de Qz, diseminada como patina
DDH2620	S1194	72	78	CMET	97	Qz-Anh, Cpy, Bo, Moly escasa			3	Anh-Ser	Moly diseminada en asociación con Cpy
DDH2625	S1195	84	96	CMET	94	Qz-Anh-Tur	1	Cpy, halo silíceo	3	Cpy, Bo, Mo trazas	Mo diseminada fina en vetillas HT
DDH2631	S1196	0	12	CMET	99	Qz, Cpy, Bo, Moly escasa			1	Cpy, halo Ser	Moly trazas diseminada
DDH2631	S1197	78	90	CMET	99	Qz, Cpy, Bo, Moly escasa	1	Cpy, halo silíceo		Qz-Ser, Mo, Cpy	Moly diseminada trazas en vetillas TM, Moly diseminada fina en vetillas HT
DDH2633	S1198	84	96	CMET	94	Qz-Anh, Cpy, Bo, Moly escasa	3	Cpy, halo silíceo	1	Qz-Ser	Moly escasa en vetillas TM, en cúmulos y diseminada
DDH2635	S1199	84	96	CMET	96	Cpy-Qz			4	Qz-Ser, Cpy, Moly escasa	Moly diseminada fina

Tabla 9.14: Mapeo de sondajes muestras 28 a 41

Sondaje	Muestra	Desde	Hasta	Litología	%TM	Mineralogía TM	%HP	Mineralogía HP	%HT	Mineralogía HT	Estilo de mineralización
DDH2636	S1201	72	78	CMET	98	Cpy abundante, Moly escasa			2	Qz-Ser, Moly abundante y Cpy diseminada	Moly diseminada, escasa en TM, Abundante en HT
DDH2658	S1203	114	126	CMET	97	Qz, Moly-Cpy			3	Cpy, halo de Qz-Ser, Moly diseminada	Moly en rosetas (vetillas TM)
DDH2661	S1205	150	162	CMET	97	Qz, Cpy y Moly	2	Qz, Cpy, Halo Ser	1	Tur, Anh, Cpy, Bo, Moly escasa	Moly en sutura y rosetas vetillas TM, diseminada fina en Vetillas HT
DDH2663	S1206	18	30	CMET	100	Ser-Qz, Cpy, Py, Mo, Tur					Mineralización de Moly en cúmulos masivos y patinas diseminada relleno de fracturas
DDH2663	S1207	102	116	CMET	98	Qz, Mt, Cpy, Moly escasa			2	Qz-Ser-Anh-Tur, Cpy y Moly	Moly en cúmulos en vetillas TM
DDH2791		15	31	CMET	94	Anh-Qz-Tur, Cpy, Py, Bo escasa	<1	Qz-Ser, Cpy, Py	5.5	Anh, Ser, Carb, Moly	Moly diseminada fina en vetillas HT
PA0641	S1221	48	54	TO	80	Qz-Tur, Cpy, Py, Moly escasa	20	Qz, Cpy, Halo Ser			Moly diseminada en asociación con Cpy en vetillas TM de Qz
PA0641	S1221	54	60	TO	90	Qz-Anh-Tur, Cpy, Py, Moly	10	Qz, sutura de Cpy, Halo Silíceo			Moly en bordes de vetillas TM de Qz
PA0649	S1217	0	6	BXITO	95	Qz-Ser-Anh-Tur, Cpy, Moly, Bo			5	Anh-Ser, Bo, Moly	Moly diseminada y patina en vetillas TM, Moly diseminada fina en trazas en vetillas HT
PA0649	S1217	6	12	BXITO	99	Qz-Anh-Tur, Cpy, Moly, Bo			1	Tur, Cpy	Moly diseminada trazas en vetillas TM
PA0668	S1215	0	6	CMET	94	Qz-Ser-Anh-Tur, Cpy, Moly, Bo	4	Ser, Cpy, Bo	2	Qz-Ser, Mo-Cpy	Moly diseminada en vetillas TM de Qz, en Halo de Vetillas HT
PA0668	S1215	6	12	CMET	98	Qz-Tur, Cpy, Bo, Moly			2	Qz-Ser, Cpy	Moly en sutura vetillas TM de Qz
PA0671	S1228	0	12	BXANH	95	Qz-Anh-Tur, Cpy, Py, Bo, Moly escasa	2	Cpy-Bo, Anh	3	Anh, Moly	Moly diseminada en vetillas TM y diseminada en vetillas HT
PA0672	S1232	0	6	CMET	99	Qz-Anh-Tur, Cpy, Bo, Mo escasa	<1		<1	Qz, Tur, Halo Chl.	Moly diseminada trazas en vetillas TM,

Tabla 9.15: Mapeo de sondajes muestras 42 a 55

Sondaje	Muestra	Desde	Hasta	Litología	%TM	Mineralogía TM	%HP	Mineralogía HP	%HT	Mineralogía HT	Estilo de mineralización
PA0672	S1232	6	12	CMET	99	Qz-Anh-Tur, Cpy, Halo Chl-Ser, Trazas Bo, Mo y Cov	1	Qz-Ser, Cpy			Moly diseminada trazas en vetillas TM de Qz
PA0673	S1233	18	24	CMET	95	Qz-Ser-Anh, Cpy, Bo, Trazas Mo y Cov	5	Qz, Cpy, Py, Halo Ser			Moly en cúmulos, masiva, también diseminada en vetillas TM
PA0673	S1233	12	18	CMET	97	Qz-Ser-Anh, Cpy, Bo, Trazas Mo y Cov	3	Qz, Cpy, sutura de Tur, Halo Ser			Moly diseminada en vetillas TM, en asociación con Cpy
PA0678	S1234	18	24	CMET	98	Qz-Anh-Tur, Cpy, Moly escasa	2	Qz-Ser, Cpy			Moly diseminada trazas en vetillas TM de Qz
PA0678	S1234	24	30	CMET	100	Qz-Anh-Tur, Cpy, Moly, Bo					Moly masiva y diseminada en vetillas TM de Qz-Anh
PA0693	S1226	0	12	BXCL	98	Tur-Arcillas, Cpy, Bo			2	Carb-Yeso, Scheellita	Scheellita cristalina en un cumulo puntual en alteración HT
PA0694	S1231	54	66	CMET	98	Qz-Anh-Tur, Cpy, Bo, Mo escasa	1	Qz, Cpy, Halo Ser	1	Anh, Halo Ser-Chl, Moly-Cpy	Moly diseminada en trazas de vetillas HT, Moly en sutura asociada a Cpy en vetillas TM
PA0696	S1227	48	60	BBS					100	Carb, Tur, Cpy, Py, Moly	Moly diseminada fina en la Matriz de brecha HT
PA0699	S1230	0	6	PDA	100	Qz-Ser, Tur, Cpy, Mo, Bo					Moly diseminada en vetillas TM, en asociación con Cpy
PA0699	S1230	6	12	PDA	100	Qz-Alb-Ser, Cpy, Bo, Moly, trazas de Py					Moly diseminada o en sutura de vetillas TM de Qz-Ser
PA0703	S1229	60	72	CMET	99	Qz-Anh-Tur, Cpy, Bo, Mo escasa	1	Qz-Cpy masiva			Moly diseminada en trazas de vetillas TM
PA0709	S1220	60	72	CMET	94	Qz, Tur, Ser, Py, Cpy	4	Qz, Cpy, Ser	2	Ser, Tur	Moly diseminada en vetillas TM, Diseminada fina en vetillas HT
PA0710	S1224	72	84	BXSU	99	Qz, Tur, Ser, Anh, Cpy, Moly, Py			1	Anh, Moly	Moly diseminada en vetillas TM, Diseminada fina en vetillas HT
PA0710	S1225	18	30	BXANH	97	Tur-Anh, Cpy			3	Anh, Moly	Moly diseminada fina en asociación con Anh en vetillas HT

Tabla 9.16: Mapeo de Sondajes Muestras 56 a 69

Sondaje	Muestra	Desde	Hasta	Litología	%TM	Mineralogía TM	%HP	Mineralogía HP	%HT	Mineralogía HT	Estilo de mineralización
PA0713	S1219	24	36	TO	97	Qz, Tur, Cpy, Py, Moly escasa	2	Cpy, Ser	1	Anh	Moly diseminada en vetillas TM, Diseminada fina en vetillas HT
PA0713	S1218	24	36	TO	97	Qz, Tur, Cpy, Py, Moly escasa	2	Cpy, Ser	1	Anh	Moly diseminada en vetillas TM
PA0714	S1216	48	60	BXITO	95	Qz-Anh, Cpy, Moly escasa			5	Anh-Carb, Cpy	Moly diseminada en vetillas TM
PA0715	S1222	24	36	CMET	99	Qz-Anh, Cpy, Moly escasa			1	Tur-Carb, Cpy, Moly escasa	Moly en sutura y diseminada en vetillas TM
PA0715	S1223	24	36	CMET	99	Qz-Anh, Cpy, Moly escasa			1	Tur-Carb,Cpy	Moly en sutura y diseminada en vetillas TM
PA0722	S1214	0	12	TO	99	Qz-Anh-Tur, Cpy, Mo escasa	<1	Qz, Cpy, Halo Ser	<1	Anh- Carb-Yeso, Cpy-Py, Moly diseminada	Moly diseminada en patina en vetillas TM, Moly diseminada fina en vetillas HT
SG0691	S1179	12	24	CMET/PDA	100	Qz, Cpy, Moly escasa					Moly en cúmulos y sutura en vetillas TM del PDA, Moly diseminada en vetillas TM del CMET
SG0691	S1180	36	48	CMET	100	Qz, Cpy, Bo, Moly escasa					Moly diseminada en vetillas TM
SG0691	S1181	84	96	CMET	97	Qz, Tur, Cpy-Moly					Moly diseminada en asociación con Cpy en vetillas TM
SG0691	S1182	144	156	CMET	88	Qz, Cpy, Trazas Moly	2	Qz-Ser			Moly diseminada en asociación con Cpy en vetillas TM
SG0691	S1183	207	219	CMET	94	Qz, Cpy, Trazas Moly	<1	Cpy, Py	1	Qz-Ser	Moly diseminada en vetillas TM
SG0691	S1184	288	300	CMET	80	Qz, Cpy, Trazas Moly	20	Cpy, Py			Moly diseminada en vetillas TM
SG0693	S1185	73	85	CMET	100	Qz, Cpy, Bo, Moly escasa					Moly en cúmulos, masiva, también diseminada en vetillas TM
SG0693	S1187	114	126	CMET	100	Qz, Cpy, Trazas Moly y Bo					Moly diseminada en vetillas TM

ANEXO F. DESCRIPCIÓN DE CORTES DE MINERALOGÍA

Tabla 9.17: Descripción corte PA0641 @51

Corte	PA0641@51
Litología	TO
Minerales Principales	Qz
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Arcillas
Mineralización	Py, Cpy, Moly
Estilo de Moly	Bordes de Vetilla, Diseminada, Intercrecida
Asociación de Moly	Tectosilicatos, Sericita, Cpy escasa
Descripción	Vetillas de pirita con bordes de Moly y Cpy, cristales de Moly diseminados, elongados, sin asociación y intercrecidos con cpy Vetilla TM de sericita con Cpy y Moly diseminada

Tabla 9.18: Descripción de corte PA0641 @60

Corte	PA0641@60
Litología	TO
Minerales Principales	Qz, Plg
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Arcilla
Mineralización	Cpy, Moly
Estilo de Moly	Sutura, Diseminada
Asociación de Moly	Qz, Ser, escasa Cpy
Descripción	Vetilla TM de Cuarzo con Cpy y Mo diseminada Cpy y Moly diseminada en roca

Tabla 9.19: Descripción de corte PA0649@3 (1)

Corte	PA0649@3 (1)
Litología	BXITO/TO
Minerales Principales	Qz, Plg, Muscovita, Bt
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Arcillas
Mineralización	Py, Cpy, Moly
Estilo de Moly	Diseminada, Cúmulos pequeños aciculares, Cristales radiales
Asociación de Moly	Cpy, Sericita, Qz, Muscovita
Descripción	Vetillas de Qz y arcillas con Moly, Py y Cpy diseminada Baja presencia de Moly

Tabla 9.20: Descripción de corte PA0649@3 (2)

Corte	PA0649@3 (2)
Litología	BXITO
Minerales Principales	Qz, Plg, arcillas
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Arcillas
Mineralización	Moly abundante, Cpy, Py
Estilo de Moly	Diseminada, Sutura
Asociación de Moly	Qz, Ser, Arcillas, escasa Cpy
Descripción	Vetas TM de Qz y Sericita, con Mo y Cpy diseminada y en sutura Alta presencia de Moly

Tabla 9.21: Descripción de corte PA0668@9 (1)

Corte	PA0668@9 (1)
Litología	CMET/PDA
Minerales Principales	Qz, Bt, Feld, Anh, Ceolita, Epi
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Chl
Mineralización	Bo, Cpy, Moly escasa, Py escasa
Estilo de Moly	Diseminada, cúmulos pequeños, Intercrecida
Asociación de Moly	Bo, Cpy, Qz, Ser
Descripción	Vetilla TM de Qz con Bo y Cpy en cúmulos y Moly diseminada Vetillas TM de Arcillas y Ser

Tabla 9.22: Descripción de corte PA0668@9 (2)

Corte	PA0668@9 (2)
Litología	CMET
Minerales Principales	Bt, Qz, Epi
Alteración	TM/HT
Minerales de Alteración	Qz, Ser en Halo
Mineralización	Moly, Cpy, Bo
Estilo de Moly	Diseminada, Cúmulo, Cristales Anhedrales
Asociación de Moly	Qz, Ser, Cpy escasa, Bo escasa
Descripción	Vetilla de Qz con halo leve de sericita, con cumulo de Moly y diseminada moly, cpy y bo Diseminada Cpy, Bo, Moly, en el CMET

Tabla 9.23: Descripción de corte PA0668@9 (3)

Corte	PA0668@9 (3)
Litología	CMET
Minerales Principales	Chl, Bt, Epi, Ceolita
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Ser, Qz
Mineralización	Moly, Cpy
Estilo de Moly	Sutura, Diseminada, Pequeños cúmulos
Asociación de Moly	Cpy, Qz, Ser
Descripción	veta de qz mineralizada con moly en sutura abundante y cpy diseminada
	vetilla de Qz + Epi
	Cpy y moly diseminada en el CMET

Tabla 9.24: Descripción de corte PA0672@9

Corte	PA0672@9
Litología	CMET
Minerales Principales	Bt, Plg, Epi, Ceolita, Chl
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser
Mineralización	Cpy, Bo, Moly escasa
Estilo de Moly	Diseminada, Anedral
Asociación de Moly	Cpy, Bo, Qz
Descripción	Vetillas TM de Qz Ser con Cpy, Bo y Moly

Tabla 9.25: Descripción de corte PA0678@21

Corte	PA0678@21
Litología	CMET
Minerales Principales	Bt, Plg, Epi, Chl
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Ceolita, Epi
Mineralización	Moly, Cpy, Py, Bo
Estilo de Moly	Cristales aislados, Cúmulos, Cristales Radiales, Diseminada
Asociación de Moly	Cpy, Qz, Bo
Descripción	Vetillas TM de Qz con cúmulos de Moly y Cpy en altas cantidades
	Cpy y Moly diseminada en la roca

Tabla 9.26: Descripción de corte PA0694@60 (1)

Corte	PA0694@60 (1)			
Litología	CMET			
Minerales Principales	Bt, Arcillas, Epi			
Alteración	TM			
Minerales de Alteración	Qz, Ser			
Mineralización	Moly, Cpy			
Estilo de Moly	cúmulos hilos finos	sutura	diseminada	cúmulos orientados
Asociación de Moly	Cpy, Qz, Ser			
Descripción	Vetilla con sutura de Moly y Cpy, con halo sericítico			
	Diseminada en la matriz de la roca			

Tabla 9.27: Descripción de corte PA0694@60 (2)

Corte	PA0694@60 (2)			
Litología	CMET			
Minerales Principales	Bt, Epi, Qz, Ser			
Alteración	TM/HT			
Minerales de Alteración	Qz, Feld; Halo de Ser, Epi, Anh, Ceolita			
Mineralización	Moly, Cpy			
Estilo de Moly	Cúmulos, Sutura, Diseminada, Bordes de vetilla			
Asociación de Moly	Qz, Ser, Cpy escasa, Ceolita escasa, Bo			
Descripción	Veta de Qz con halo de Ser, aparentemente reutilizada,			
	Moly y Cpy diseminada en la matriz			

Tabla 9.28: Descripción de corte PA0699@9

Corte	PA0699@9			
Litología	PDA			
Minerales Principales	Bt, Qz, Plg, Feld, Epi			
Alteración	TM			
Minerales de Alteración	Qz, Ser			
Mineralización	Moly, Cpy			
Estilo de Moly	Sutura, Diseminada			
Asociación de Moly	Cpy, Qz			
Descripción	Vetilla de Qz con sutura de Cpy y Moly			
	Moly y Cpy diseminada en la roca			

Tabla 9.29: Descripción de corte DDH2654@119.05

Corte	DDH2654@119.05
Litología	PDI
Minerales Principales	Plg, Qz, Epi
Alteración	TM
Minerales de Alteración	Ser, Qz, Anh
Mineralización	Moly, Cpy, Pirrotina, Aspy
Estilo de Moly	Sutura cristalina, Cúmulos lentiformes, Cúmulos Pequeños
Asociación de Moly	Cpy escasa, Qz, Ser, Anh, Epi
Descripción	Vetilla TM de Qz con sutura cristalina de Moly Moly escasa diseminada en la roca

Tabla 9.30: Descripción de corte PA0722@2.06

Corte	PA0722@2.06
Litología	TO
Minerales Principales	Qz, Plg
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Anh
Mineralización	Py, Moly, Aspy, Cpy, Esf
Estilo de Moly	Halo
Asociación de Moly	Cpy, Aspy, Qz, Ser
Descripción	Vetilla HT de pirita, con cristales de aspy, esf y Cpy, halo de Moly Moly diseminada en la roca

Tabla 9.31: Descripción de corte PA0710@24.4

Corte	PA0710@24.4
Litología	BXANH
Minerales Principales	Anh, Qz, Plg
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Anh, Yeso, Ser
Mineralización	Cpy abundante, Moly
Estilo de Moly	Moly muy fina, En bordes de vetillas, Cúmulo de cristales finos
Asociación de Moly	Anh, Cpy
Descripción	Vetilla HT de Anh con Cpy con bordes de moly muy fina Cpy masiva en la roca

Tabla 9.32: Descripción de corte DDH1801@430

Corte	DDH1801@430
Litología	BXQZ
Minerales Principales	Qz
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Ser, Anh Act
Mineralización	Moly, Cpy
Estilo de Moly	Moly muy fina diseminada en vetillas
Asociación de Moly	Cpy, Anh, Ser, Qz
Descripción	Vetillas de Moly muy fina Enrejado de vetillas

Tabla 9.33: Descripción de corte DDH1801@440

Corte	DDH1801@440
Litología	BXQZ
Minerales Principales	Qz, Act
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Anh
Mineralización	Cpy, Moly, Bo
Estilo de Moly	Diseminada muy fina, En matriz de roca
Asociación de Moly	Anh, Ser, Cpy, Act
Descripción	Vetillas HT con relleno de Moly fina Moly matriz de brecha muy fina

Tabla 9.34: Descripción de corte DDH1801@454

Corte	DDH1801@454
Litología	BXQZ
Minerales Principales	Qz
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Anh, Act, Epi, Ser
Mineralización	Moly, Cpy, Py, Esf
Estilo de Moly	Diseminada fina
Asociación de Moly	Cpy, Qz, Anh, Act
Descripción	Moly fina diseminada en matriz de brecha

Tabla 9.35: Descripción de corte DDH2544@19.08

Corte	DDH2544@19.08
Litología	CMET
Minerales Principales	Plg, Epi, Act, Bt
Alteración	HP
Minerales de Alteración	Qz, Ser
Mineralización	Cpy, Moly
Estilo de Moly	Cúmulos pequeños, Diseminada, Cúmulos lentiformes
Asociación de Moly	Cpy, Py, Ser
Descripción	Vetilla HP de sulfuros masiva, Cpy
	Moly diseminada en roca, cristales muy finos

Tabla 9.36: Descripción de corte DDH2791@23.4

Corte	DDH2791@23.4
Litología	CMET
Minerales Principales	Plg, Bt
Alteración	HT
Minerales de Alteración	Qz, Ser, Ceolita
Mineralización	Moly, Py, Cpy
Estilo de Moly	Diseminada fina, Relleno intergranular
Asociación de Moly	Plg, Qz, Ser, Ceolita
Descripción	vetillas de moly diseminada en vetillas
	Molibdenita relleno espacios entre cristales de vetillas de Qz

ANEXO G REPORTES QEMSCAN 2015 Y 2016

Los primeros datos de QEMSCAN de los cuales se dispone son los correspondientes a los compuestos mensuales de los Laboratorios COLON, SAG y SEWELL, los cuales se obtienen directamente de la línea de producción posterior a la molienda. Éstos abarcan muestras de diferentes líneas de producción de sectores productivos del yacimiento El Teniente para formar los compuestos, para luego realizar estudios de flotación y mineralogía QEMSCAN. Los compuestos de colas corresponden a la extracción directa de muestras de las colas de producción y no presentan relación con los compuestos de alimentación, las características de estas muestras presentan una gran influencia de la línea de proceso de la cual fueron obtenidas ya que éstas pueden presentar una gran variación en cada día en sus condiciones debido a factores operacionales, por lo cual no presentan información útil para entender la geología del yacimiento.

Para comprender los minerales los cuales se encuentran en asociación con la Molibdenita en el yacimiento y así caracterizar dichas asociaciones, en primer lugar se estudia en un gráfico los minerales asociados a las partículas de Molibdenita en los compuestos de alimentación de cada mes y se comparan con la recuperación de Molibdenita registrada por la planta en el mes correspondiente. El sesgo de los resultados es grande debido a que los compuestos representan una amplia zona dentro de la mina, no se sabe su precisa ubicación en el yacimiento y se desconoce si corresponde a una muestra representativa de los sectores involucrados. Además es importante diferenciar que los datos de recuperación de Mo obtenidos de la planta y los datos de asociación mineral no corresponden a las mismas muestras, pero resultan útiles para comprender de manera preliminar los minerales que se encuentran asociados en mayor proporción a la Molibdenita en el yacimiento. Finalmente al comparar los datos de asociación con la recuperación se obtiene una idea general de cómo afectan los minerales asociados a la Molibdenita en la recuperación de ésta ya que la información de asociaciones minerales no presenta grandes variaciones entre las muestras in situ, y los compuestos de alimentación después de pasar por la molienda.

El tamaño de las partículas también es un parámetro a considerar a momento de estudiar los factores que pueden controlar la recuperación de la Molibdenita. Esto se debe a de acuerdo a los estudios realizados, la Molibdenita fina, es decir las partículas de Molibdenita cuyo diámetro no superan los 12 micrones, no tiende a flotar durante el proceso de flotación y, a menos que sea llevada por arrastre al concentrado, ésta se pierde en la etapa de procesamiento. Este fenómeno indicaría que debiese existir una relación directa entre el tamaño de la Molibdenita luego de la molienda y la recuperación de Molibdenita posterior. Si esto fuera cierto, es importante determinar si existen factores geológicos que pudieran controlar o influir en el tamaño de las partículas de la Molibdenita una vez que el material pasa por el proceso de molienda. Sin embargo los datos de los compuestos mensuales de tamaño y grado de liberación de las partículas se ven alterados por el proceso de molienda y el transporte del material, por tanto las relaciones observadas entre el tamaño de las partículas y los datos de recuperación de la planta no tendrán una relación con la geología sino más bien con la etapa de procesamiento.

Compuestos COLON 2015

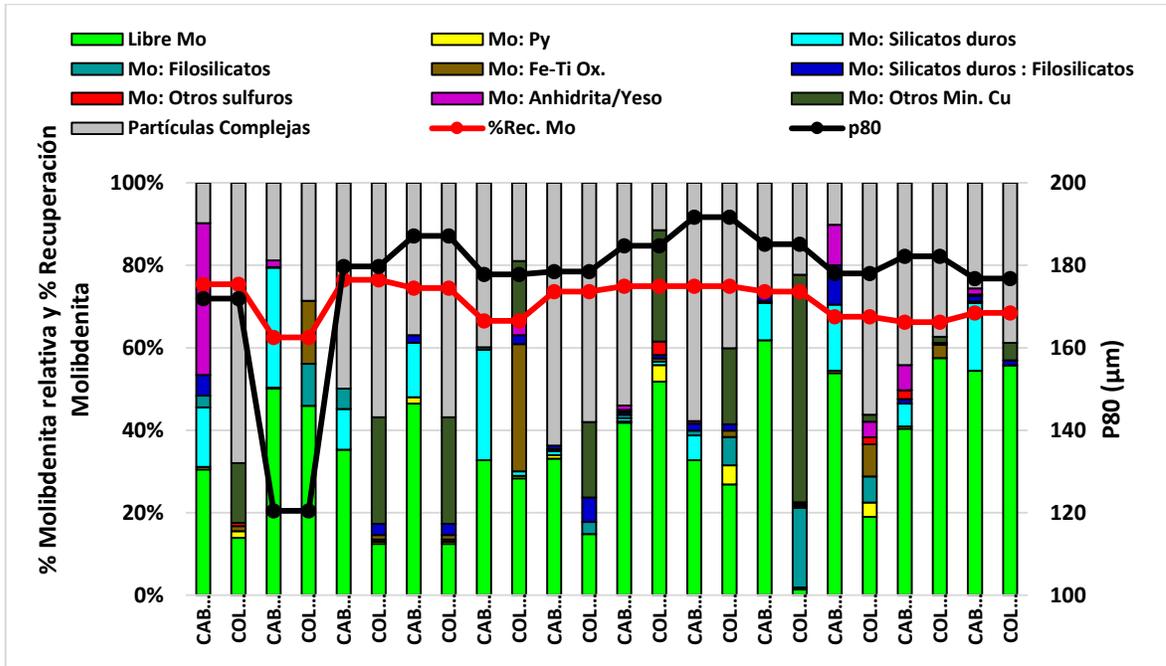


Gráfico 9.15: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación COLON 2015

Compuestos SAG 2015

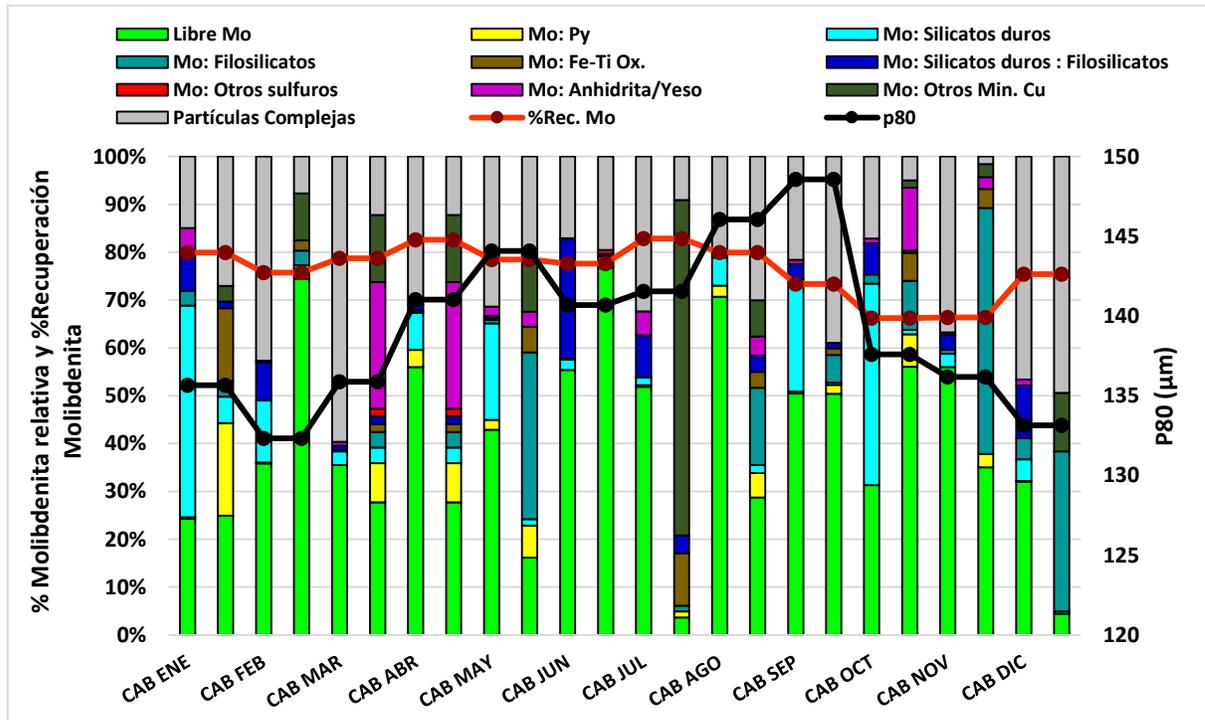


Gráfico 9.16: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SAG 2015

Compuestos SEWELL 2015

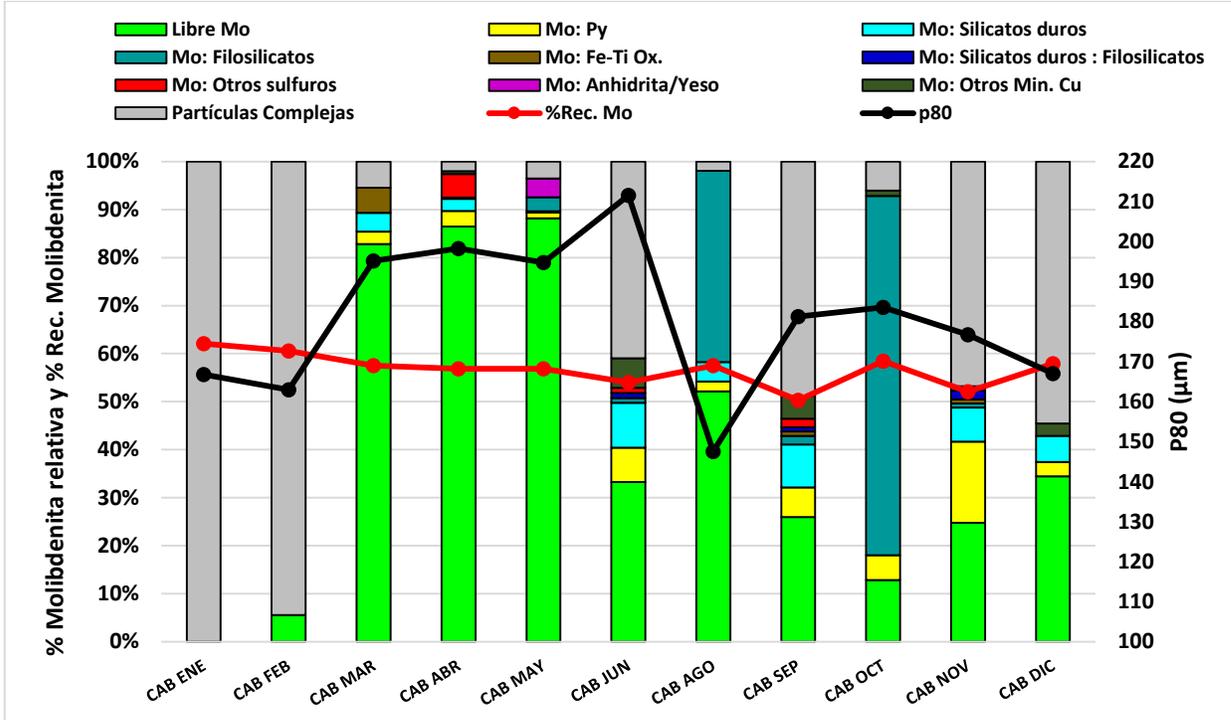


Gráfico 9.17: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SEWELL 2015

Compuestos COLON 2016

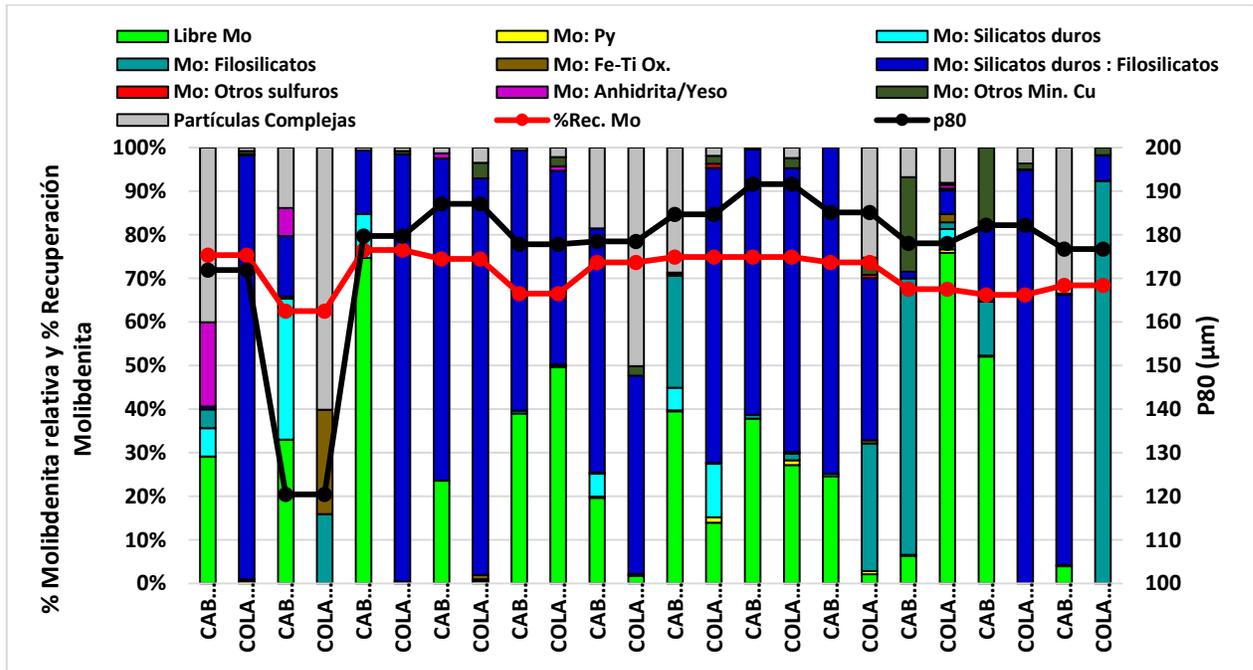


Gráfico 9.18: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación COLON 2016

Compuestos SAG 2016

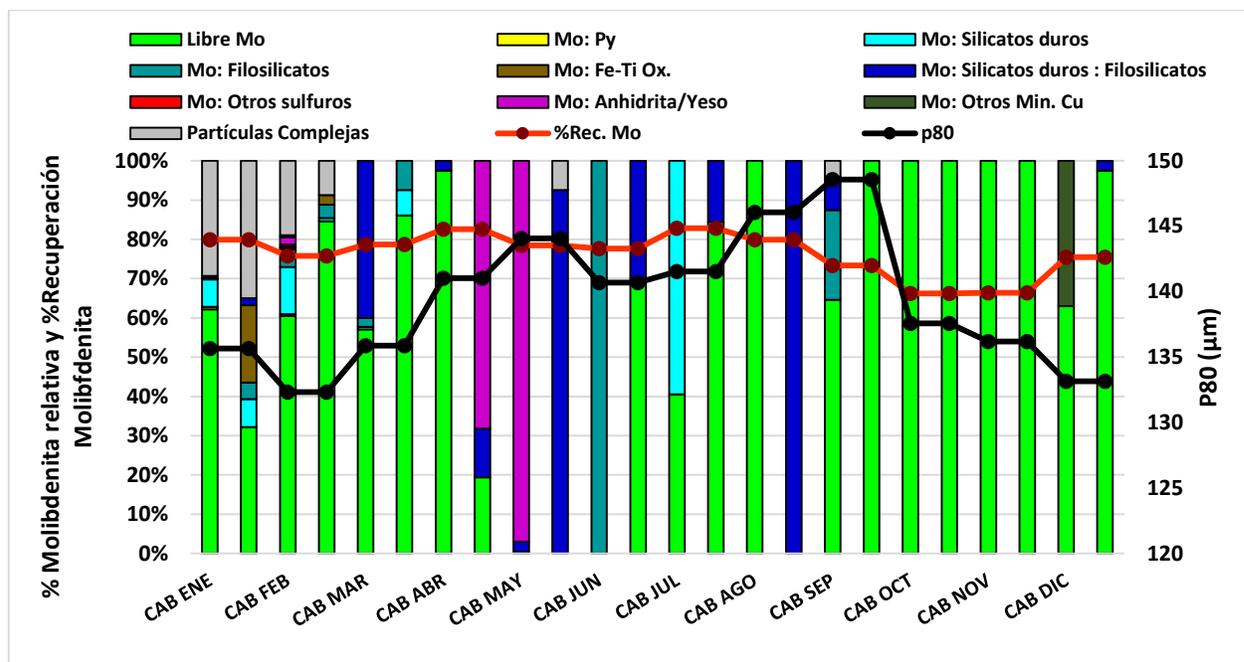


Gráfico 9.19: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación SAG 2016

Compuestos Sewell 2016

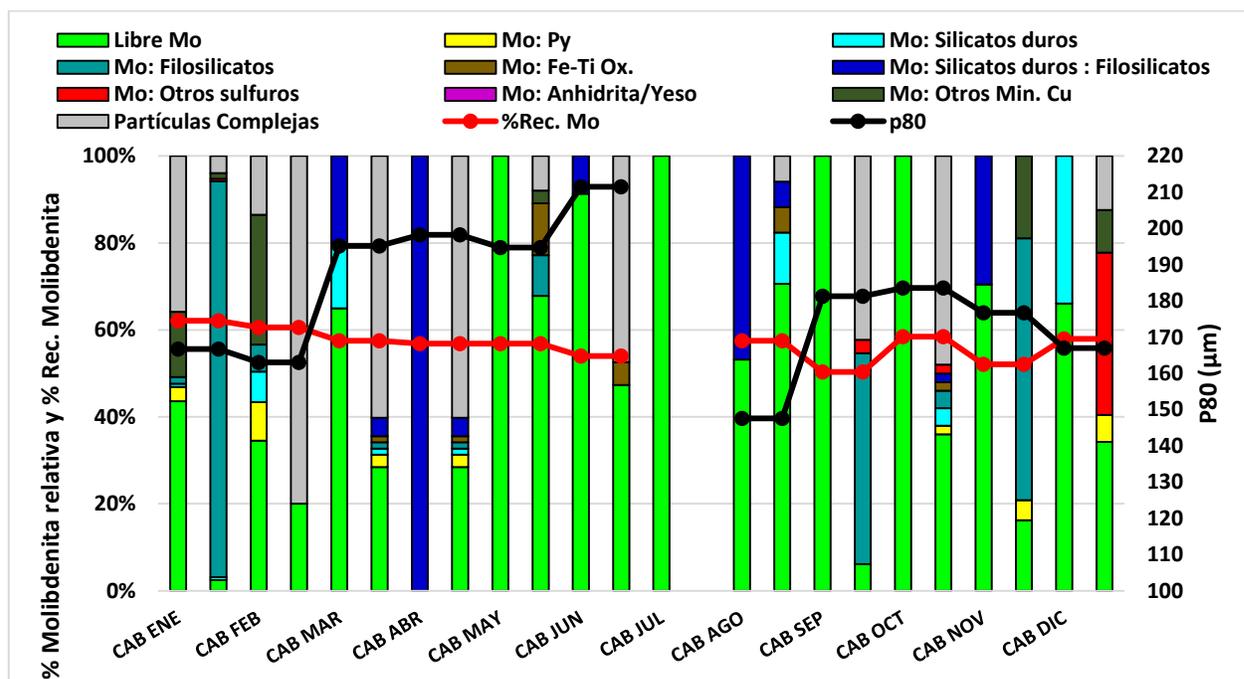


Gráfico 9.20: Recuperación de Mo y P80 vs contenido relativo asociado a Molibdenita en compuestos mensuales alimentación Sewell 2016

