

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**Modelo Genético del Proyecto Los Mantos, Provincia de
Aconcagua – Región de Valparaíso – Chile**

T E S I S

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Bach. David Antonio Arribasplata Rojas

Asesor:

Dr. Ing. Alejandro Lagos M.

Cajamarca, Junio de 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
GEOLÓGICA**

**Modelo Genético del Proyecto Los Mantos, Provincia de Aconcagua –
Región de Valparaíso – Chile**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Bach. David Antonio Arribasplata Rojas

Asesor:

Dr. Ing. Alejandro Lagos M.

Cajamarca, Junio de 2016

DEDICATORIA

A las personas más importantes en mi vida, mis Padres *JOEL* y *BERITA*, quienes a lo largo de mi vida me han apoyado y brindado las herramientas para desenvolverme en la vida, y quienes gracias a su sacrificio y esfuerzo llegó a concluir unos de mis sueños.

A mis hermanos *DARÍO* y *STEFANY* puesto que con su apoyo me han dado los ánimos necesarios y el cariño para lograr las metas que me he trazado.

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a mi Alma Mater, Universidad Nacional de Cajamarca, a la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Geológica, a sus catedráticos quienes con sus consejos y enseñanzas me dieron las herramientas necesarias para defenderme en el campo laboral.

Mi gratitud hacia los trabajadores de Compañía Minera Cerro Negro, en especial a las personas de Ernesto Henríquez, Jaime Acevedo y a los integrantes del área de Geología, en primer lugar por la oportunidad de integrar el grupo de trabajo, por el apoyo y enseñanzas brindadas.

Al Dr. Marcos Zentilli, por su apoyo invaluable en la preparación y análisis microscópico de muestras, también por los conocimientos brindados y buena voluntad en asesorar este trabajo, así mismo mi más sincero agradecimiento a mis asesores Dr. Ing. Alejandro Lagos e Ing. Julio Rodas, por sus conocimientos, apoyo y motivación para la elaboración de la presente tesis.

Finalmente, agradezco a todas las personas que han colaborado en la realización de este trabajo de investigación y quienes con sus consejos y motivación me han brindado la confianza necesaria para cumplir uno de mis anhelos más preciados.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xiii
ÍNDICE DE MICROFOTOGRAFÍAS	xv
RELACIÓN DE PLANOS	xvi
LISTA DE ABREVIACIONES	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. ANTECEDENTES.....	4
2.2. BASES TEÓRICAS	6
2.2.1. METALOGÉNESIS DE CHILE	6
2.2.1.1. FRANJAS METALOGÉNICAS	9
2.2.1.1.1. FRANJA METALOGÉNICA DEL CRETÁCICO INFERIOR	9
2.2.2. YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS DE CU.....	12
2.2.2.1. SUBTIPOS DE YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS	13
2.2.2.1.1. TIPO FACIE REDUCTORA (RF).....	13
2.2.2.1.2. TIPO CAPAS ROJAS (RB).....	15
2.2.2.1.3. TIPO ARENISCA REVETT (RV).....	16
2.2.2.2. MANTO TIPO CHILENO CU-AG	18
2.2.2.3. RASGOS GEOLÓGICOS DE LOS ESTRATOLIGADOS.....	19
2.2.2.4. CONTROLES Y RASGOS ESTRUCTURALES	22
2.2.2.5. ALTERACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS.....	23
2.2.2.6. ZONAMIENTO MINERAL.....	25

2.2.2.7. ZONA DE ÓXIDOS DE CU	27
2.2.2.8. YACIMIENTOS CONOCIDOS	29
2.2.2.8.1. EL SOLDADO	30
2.2.2.8.2. CERRO NEGRO	32
2.2.3. TEORÍAS EXISTENTES RELATIVAS AL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	36
2.2.3.1. ORIGEN SINGENÉTICO DE LOS MANTOS	36
2.2.3.2. ORIGEN EPIGENÉTICO DE LOS MANTOS	36
2.2.3.3. MATERIA ORGÁNICA EN LA GÉNESIS DE YACIMIENTOS TIPO MANTO.....	36
2.2.3.3.1. ASOCIACIÓN DE METALES CON MATERIA ORGÁNICA.....	38
2.2.3.3.2. INTERACCIÓN HIDROTHERMAL	40
2.2.3.4. OCURRENCIA DE ISÓTOPOS DE S EN DEPÓSITOS TIPO MANTO	42
2.2.3.5. MINERALIZACIÓN RELACIONADA A INTRUSIVOS	45
2.2.3.6. MINERALIZACIÓN ASOCIADA A PROCESOS METAMÓRFICOS DE BAJO GRADO	45
2.2.3.7. OTRAS TEORÍAS DE GÉNESIS MINERAL EN YACIMIENTOS ESTRATOLIGADOS.....	48
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	49
 CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	 52
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	52
3.2. ACCESIBILIDAD	54
3.3. CLIMA Y VEGETACIÓN.....	55
3.3.1. CLIMA	55
3.3.2. VEGETACIÓN	55
3.4. GEOMORFOLOGÍA	56
3.4.1. LA CUENCA DEL ACONCAGUA.....	57
3.4.2. SISTEMA MONTAÑOSO SEMIÁRIDO	58
3.5. GEOLOGÍA REGIONAL	61
3.5.1. FORMACIÓN LO PRADO.....	61
3.5.1.1. DEFINICIÓN Y RELACIONES ESTRATIGRÁFICAS	61
3.5.1.2. ESPESOR	62
3.5.1.3. EDAD Y CORRELACIÓN	63

3.5.1.4. CONDICIONES DE DEPOSITACIÓN.....	65
3.5.2. FORMACIÓN VETA NEGRA	65
3.5.2.1. DEFINICIÓN Y RELACIONES ESTRATIGRÁFICAS	65
3.5.2.2. ESPESOR	66
3.5.2.3. EDAD Y CORRELACIÓN	66
3.5.2.4. CONDICIONES DE DEPOSITACIÓN.....	67
3.5.3. FORMACIÓN LAS CHILCAS	68
3.5.3.1. DEFINICIÓN Y RELACIONES ESTRATIGRÁFICAS	68
3.5.3.2. ESPESOR	69
3.5.3.3. EDAD Y CORRELACIÓN	69
3.5.3.4. CONDICIONES DE DEPOSITACIÓN.....	69
3.5.4. ROCAS INTRUSIVAS	70
3.5.5. ESTRUCTURAS REGIONALES	70
3.6. PROCEDIMIENTO	72
3.6.1. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	72
3.6.1.1. CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO.....	72
3.6.1.2. MUESTREO GEOQUÍMICO	74
3.6.1.2.1. MUESTREO ROCKCHIP	75
3.6.1.2.2. MUESTREO POR CANALES	76
3.6.1.2.3. MUESTREO PARA ESTUDIO DE MICROSCOPIA	78
3.6.1.2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	78
3.7. TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	80
3.7.1. SOFTWARE	81
● EXCEL.....	81
● SAS PLANET	81
● ARCGIS 10.2	82
● COREL DRAW X6	82
● SURPAC 6.3	82
● STERIONET.....	82
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	83
4.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	83
4.1.1. GEOLOGÍA LOCAL	83

4.1.1.1. ROCAS VOLCANO-SEDIMENTARIAS	83
i) AGLOMERADO BASAL	85
ii) LAVA GRIS – INFERIOR.....	85
iii) LAHARES – ANDESITA AUTOBRECHADA – ANDESITA VESICULAR....	86
iv) SECUENCIA SEDIMENTARIA LAGUNAR CALCÁREA	87
v) LAVA GRIS – SUPERIOR	88
vi) AGLOMERADO VOLCÁNICO	89
vii) ANDESITA BRECHOSA GRIS.....	90
viii) LAVA PARDA – TOBAS.....	90
ix) AGLOMERADO – VOLCARENITA.....	91
4.1.1.2. ROCAS INTRUSIVAS	92
i) DIORITA	92
ii) PÓRFIDOS MONZONÍTICOS	93
4.1.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	96
4.1.3. ALTERACIONES.....	105
4.1.3.1. CLORITA – EPÍDOTA ± PRENHITA.....	105
4.1.3.2. SÍLICE – FELDESPATO POTÁSICO	106
4.1.3.3. BARITINA – CARBONATOS ± ARCILLA.....	108
4.1.3.4. CALCITA	111
4.1.4. MINERALIZACIÓN	113
4.1.4.1. ÓXIDOS DE COBRE	113
4.1.4.2. SULFUROS	115
4.1.5. GEOQUÍMICA.....	118
4.1.6. MICROSCOPIA Y MICROSONDA.....	123
4.1.7. MICROSONDA.....	134
4.2. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	138
4.2.1. CONTROLES DE MINERALIZACIÓN.....	138
a) CONTROL LITOLÓGICO.....	138
b) CONTROL ESTRUCTURAL	138
c) CONTROL MINERALIZACIÓN.....	139
d) CONTROL DE ALTERACIÓN	140
4.2.2. DISTRIBUCIÓN DE CU Y AG.....	141
4.2.3. PARAGÉNESIS MINERAL	147
4.2.4. MECANISMO DE EMPLAZAMIENTO	148

4.2.5. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL PROYECTO LOS MANTOS	150
• ESTADIO A	150
• ESTADIO B	150
• ESTADIO C	150
• ESTADIO D	151
• ESTADIO E	151
• ESTADIO F	151
• ESTADIO G	152
• ESTADIO H	152
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	154
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	156
5.1. CONCLUSIONES	156
5.2. RECOMENDACIONES	158
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
ANEXOS	163

LISTADO DE CUADROS

	Pág.
Cuadro N°01. Análisis de Cu vs. Litología.....	119
Cuadro N°02. Análisis de Ag vs. Litología.....	119
Cuadro N°03. Análisis de Cu vs. Alteración.....	120
Cuadro N°04. Análisis de Ag vs. Alteración.....	120
Cuadro N°05. Distribución de Cu vs. Litología	142
Cuadro N°06. Distribución de Ag vs. Litología	142
Cuadro N°07. Distribución de Cu vs. Alteración	143
Cuadro N°08. Distribución de Ag vs. Alteración.....	144
Cuadro N°09. Paragénesis del proyecto Los Mantos.....	148

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla N°01. Tonelajes en yacimientos estratoligados	17
Tabla N°02. Coordenadas del proyecto Los Mantos	52
Tabla N°03. Distancias hacia el proyecto Los Mantos	54
Tabla N°04. Medidas de fallas en el proyecto Los Mantos	98
Tabla N°05. Ubicación de muestras para microscopía y microsonda	124

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura N°01. Arco magmático en el Jurásico superior a Cretácico inferior	7
Figura N°02. Franja Metalogénica del Cretácico inferior	11
Figura N°03. Zonamiento mineral en White Peni – Michigan – USA	13
Figura N°04. Sección del depósito Kupferschiefer – Polonia (RF)	14
Figura N°05. Sección esquemática del subtipo de depósito Redbed (RB)	15
Figura N°06. Sección esquemática del subtipo de depósito Revett (RV).....	17
Figura N°07. Sección esquemática del yacimiento White Peni – Michigan – USA ...	18
Figura N°08. Sección de la zona central de Chile en el Cretácico inferior	19
Figura N°09. Modelo esquemático de vulcanismo en Chile en el Cretácico inferior .	21
Figura N°10. Mineralización estratiforme de Cu y Ag en Spar Lake (Mina Troya)...	23
Figura N°11. Sección idealizada de controles litológicos y estructurales en yacimientos tipo estratoligado	26
Figura N°12. Secuencia paragenética del yacimiento Mantos Blancos.....	27
Figura N°13. Perfil esquemático idealizado de las zonas de oxidación en yacimientos estratoligados	28
Figura N°14. Leyes vs. Tonelaje en depósitos estratoligado y pórfido	30
Figura N°15. Sección esquemática del yacimiento El Soldado	31
Figura N°16. Sección idealizada del yacimiento Cerro Negro.....	33
Figura N°17. Presencia de gas y petróleo en poros de roca	40
Figura N°18. Modelo general de depósitos estratoligados.....	41
Figura N°19. Ubicación del proyecto Los Mantos	53

Figura N°20. Vías de acceso al proyecto Los Mantos	54
Figura N°21. Distribución geomorfológica en la Región Valparaíso	57
Figura N°22. Extracción de Ortofoto del proyecto Los Mantos.....	73
Figura N°23. Columna estratigráfica simplificada del proyecto Los Mantos.....	94
Figura N°24. Diagrama de rosas de fallas del proyecto Los Mantos	99
Figura N°25. Círculos mayores con dirección de movimiento en Los Mantos	100
Figura N°26. Diagrama de Polos de Fallas del proyecto Los Mantos	101
Figura N°27. Diagrama de rosas de vetas del proyecto Los Mantos.....	102
Figura N°28. Diagrama de polos de vetas del proyecto Los Mantos	103
Figura N°29. Rangos geoquímicos de Cu y Ag	118
Figura N°30. Esquema de mineralización estratiforme de Cu y Ag en lahares y autobrechas de la formación Las Chilcas en Los Mantos	139
Figura N°31. Modelo esquemático de la distribución vertical de Mineralización en el proyecto Los Mantos	140
Figura N°32. Modelo esquemático de la distribución vertical de Alteración en el proyecto Los Mantos	141
Figura N°33. Diagrama de distribución de contenido de Ag vs. Cu en % Mol de menas sulfuradas del proyecto Los Mantos.....	145
Figura N°34. Diagrama de distribución de contenido de Au vs. Cu en % Mol de menas sulfuradas del proyecto Los Mantos.....	145
Figura N°35. Diagrama de composición Cu vs. Ag vs. Au de las menas sulfuradas del proyecto Los Mantos	146
Figura N°36. Mecanismo de emplazamiento mineral en Los Mantos.....	149
Figura N°37. Evolución Geológica del proyecto Los Mantos	153

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía N°01. Vista al Valle del Aconcagua	58
Fotografía N°02. Vista a la Cordillera de la Costa	59
Fotografía N°03. Meseta madura rodeada por colinas.....	59
Fotografía N°04. Colinas y cadena montañosa	60
Fotografía N°05. Quebradas con carga pluvial	60
Fotografía N°06. Afloramiento de aglomerado volcánico	73
Fotografía N°07. Toma de muestras de Rockchip	76
Fotografía N°08. Venilla de sílice cortando derrames andesíticos.....	77
Fotografía N°09. Muestra de mano de andesita vesicular con vetilla de bornita	78
Fotografía N°10. Instrumentos de medición	80
Fotografía N°11. Aglomerado volcánico	85
Fotografía N°12. Afloramiento de lavas andesíticas color gris.....	86
Fotografía N°13. Afloramiento de autobrechas con inyección de sílice – baritina carbonatos.....	87
Fotografía N°14. Lutitas cortadas por diques dioríticos	88
Fotografía N°15. Afloramiento de andesita grisácea.....	89
Fotografía N°16. Afloramiento de aglomerado volcánico andesítico rojizo	89
Fotografía N°17. Afloramiento de andesita brechosa.....	90
Fotografía N°18. Coladas andesíticas color pardas	91
Fotografía N°19. Aglomerado volcánico andesítico matriz soportado.....	92
Fotografía N°20. Contacto entre aglomerado y Volcarenita	92

Fotografía N°21. Dique diorítico cortando lavas andesíticas	93
Fotografía N°22. Falla de rumbo NE-SW mineralizada	97
Fotografía N°23. Vetilla mineralizada	97
Fotografía N°24. Lavas andesíticas con alteración epidota – clorita.....	105
Fotografía N°25. Muestra mano roca con alteración epidota – clorita – prehnita.....	106
Fotografía N°26. Afloramiento de andesita vesicular con alteración sílice y óxidos de hierro.....	107
Fotografía N°27. Inyección de sílice lechosa con feldespato potásico	107
Fotografía N°28. Muestra de mano de alteración sílice – feldespato potásico	108
Fotografía N°29. Afloramiento de autobrechas con alteración baritina – carbonatos y óxidos de hierro	109
Fotografía N°30. Andesita con baritina y malaquita rellenando oquedades	110
Fotografía N°31. Andesita vesicular con relleno en oquedades de carbonatos y baritina e inyección de calcopirita y galena	110
Fotografía N°32. Afloramiento de lava andesítica con calcita	111
Fotografía N°33. Mineralización de crisocola – malaquita con alteración sílice – feldespato potásico, baritina – carbonatos	113
Fotografía N°34. Malaquita reemplazando bornita	114
Fotografía N°35. Muestra de mano, óxidos de cobre (malaquita – tenorita) reemplazando bornita.....	115
Fotografía N°36. Veta de calcopirita masiva con cuarzo en andesita vesicular.....	116
Fotografía N°37. Muestra de mano de andesita vesicular con parches de calcopirita y bornita	117
Fotografía N°38. Muestra de mano de andesita vesicular cortada por vetilla de calcopirita con galena	117

LISTADO DE MICROFOTOGRAFÍAS

	Pág.
Microfotografía N°01. Muestras sector La Serena – Melipilla – Naltahua	43
Microfotografía N°02. Muestras del distrito Melipilla – Talcuna.....	47
Microfotografía N°03. Muestra M-1, sección pulida a objetivo 50X.....	126
Microfotografía N°04. Muestra M-2, sección pulida a objetivo 10X.....	127
Microfotografía N°05. Muestra M-3, sección pulida a objetivo 10X.....	128
Microfotografía N°06. Muestra M-3, luz reflejada a objetivo 50X.....	129
Microfotografía N°07. Muestra M-4, sección pulida a objetivo 50X.....	130
Microfotografía N°08. Muestra M-4, sección pulida a objetivo 50X.....	131
Microfotografía N°09. Muestra M-5, luz reflejada a objetivo 50X.....	132
Microfotografía N°10. Muestra M-5, sección pulida a 50X aumentos.....	133
Microfotografía N°11. Muestra M-5, sección pulida a 10X aumentos.....	134
Microfotografía N°12. Muestra M-2, estudio de microsonda, microprobe a 850X	135
Microfotografía N°13. Muestra M-3, estudio de microsonda, microprobe a 850X	136
Microfotografía N°14. Muestra M-5, estudio de microsonda, microprobe a 430X	137

RELACIÓN DE PLANOS Y SECCIONES

	Pág.
Plano N°01. Geológico Regional, Hoja de Quillota	71
Plano N°02. Plano Lito-estructural del proyecto Los Mantos.....	84
Plano N°03. Geología estructural del proyecto Los Mantos	95
Plano N°04. Alteraciones y estructuras en el proyecto Los Mantos.....	104
Plano N°05. Mineralización y estructuras en el proyecto Los Mantos.....	112
Plano N°06. Isovalores de Ag y estructuras en el proyecto Los Mantos	121
Plano N°07. Isovalores de Cu y estructuras en el proyecto Los Mantos	122
Plano N°08. Ortofoto y ubicación de muestras para estudio de microscopía	125
Sección DD. Corte esquemático E-W Vista al N del Sector NE del proyecto Los Mantos, mostrando zonamiento de mineralización y desarrollo de cuerpo mineralizado.....	155

LISTADO DE ABREVIACIONES

And	:	Andesita		Clo	:	Clorita
Autobx	:	Autobrecha		Ep	:	Epidota
Bx	:	Brecha		Z	:	Zeolita
Aglom	:	Aglomerado		Si	:	Sílice
Mtx	:	Matriz		Kspar	:	Feldespatopotásico
Fx	:	Fragmento		Bar	:	Baritina
Alb	:	Albita		Clc	:	Calcita
Bo	:	Bornita		Ten	:	Tenorita
Cp	:	Calcopirita		Crs	:	Crisocola
Py	:	Pirita		Mq	:	Malaquita
Ga	:	Galena		FeOx	:	Óxidos de hierro
Sp	:	Esfalerita		CuOx	:	Óxidos de cobre
Te	:	Tenantita		Fr?	:	Framboide
Goe	:	Goethita		Cs	:	Calcosina
He	:	Hematita		Cv	:	Covelina
Cb	:	Carbonatos		Q	:	Cuarzo

RESUMEN

El proyecto Los Mantos está ubicado la comuna de San Felipe, Provincia de Aconcagua, Región de Valparaíso – Chile; está emplazado en el corredor de yacimientos estratoligados del Cretácico inferior (Cerro Negro – Catemu – El Soldado), se caracteriza por estar alojado en rocas volcano sedimentarias pertenecientes a la formación Las Chilcas; debido a que esta zona tradicionalmente ha sido trabajada por mineros artesanales para la extracción de Cu y Ag, su concepción geológica y alcances de mineralización son desconocidos.

Es por ello que la presente tesis se centró en identificar los controles implicados en la formación de la ocurrencia mineral en el Proyecto Los Mantos, así como definir un modelo genético mediante el uso de estudios geológicos superficiales (cartografiado a escala 1/10 000), geoquímica, microscopía y microsonda de ejemplares mineralizados representativos del proyecto.

El trabajo de cartografiado geológico muestra la existencia de un cuerpo mineralizado de geometría mantiforme con potencia variable de 2 a 5m para la zona de óxidos de cobre (crisocola – malaquita) y profundizando hacia una zona de sulfuros con desarrollo concéntrico de bornita, calcopirita y en la periferia galena – esfalerita – pirita, los que se presentan a manera de vetas y vetillas de rumbo NE-SW y E-W y como relleno de oquedades; la mineralización se encuentra confinada a un horizonte de lahares, lavas autobrechadas y vesiculares así como vinculada a la presencia del ensamblaje de alteración sílice – feldespato potásico y baritina – carbonatos (calcita – ankerita). Los análisis de geoquímica muestran valores anómalos económicos de Cu y Ag en rocas volcano-sedimentarias, más no en los intrusivos. Data microscópica y de microsonda revelan contenidos de Ag y Au (menor medida) en bornita y calcopirita, lo que define un evento mineralizante al inicio de Ag-Cu, posteriormente enriqueciéndose en Cu con el consecuente reemplazamiento sucesivo por menas ricas en Cu. Por las características geológicas arriba descritas, para el proyecto Los Mantos se define un depósito del tipo estratoligado volcano-sedimentario relacionado a estructuras (vetas/fallas).

Palabras Clave: Yacimiento estratoligado, alteración, mineralización, microscopía, manto Chileno Cu-Ag.

ABSTRACT

Los Mantos project is located in the San Felipe Comuna, Aconcagua Province, Valparaíso Region - Chile; The project is placed in the corridor of Cretaceous stratabound deposits (Cerro Negro - Catemu – El Soldado), is characterized by being hosted in volcano-sedimentary rocks of Las Chilcas formation; because this area has traditionally been worked by artisanal miners for the extraction of Cu and Ag, the geological concept and scope of mineralization are unknown.

This thesis is focused in identify the controls involved in the formation of the mineral occurrence at the Los Mantos project and define a genetic model using surface geological studies (1/10 000 scale mapping), geochemistry, microscopy and microprobe of representative ore specimens of the project.

The geological field work shows the existence of an ore body with mantiform geometry and variable thickness 2 to 5m for copper oxide zone (chrysocolla - malachite) and deepening develop a sulphide zone with concentric pattern of bornite, chalcopyrite and periphery galena - sphalerite - pyrite, which are presented by NE-SW and E-W veins and veinlets and as filling cavities; the mineralization is confined to a specific horizon consisting of lahars, autobrecciated and vesicular lavas as linked to the presence of silica –feldspar assemblage and barite - carbonate (calcite - ankerite). Geochemical analyses show economic anomalous Cu and Ag in volcano-sedimentary rocks, but not in the intrusives. Microscopic and microprobe data reveal contents of Ag and Au (lesser extent) are present in chalcopyrite and bornite, which defines a mineralizing event at the start of Ag - Cu subsequently enriched in Cu with consequent successive replacement for ores rich in Cu. By geological characteristics described above for the Los Mantos project, is defined a Stratabound volcano-sedimentary deposit related to structures (faults/veins).

Keywords: Stratabound deposits, alteration, mineralization, microscopy, Chilean manto Cu-Ag.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La presente tesis se elaboró en el Proyecto Los Mantos, perteneciente al Distrito Minero Cerro Negro localizado en la provincia de Aconcagua, región de Valparaíso, Chile, a una altitud media de 575 msnm, en el corredor de depósitos de tipo estratoligado volcano-sedimentarios de edad Jurásico superior a Cretácico inferior; ejemplos importantes de estos tipos de depósitos son: Cerro Negro, Catemú, El Soldado, entre otros. Este tipo de depósito cuprífero ocupa un segundo lugar en cuanto a importancia económica, y ha desempeñado un papel histórico y social en el desarrollo de la minería en Chile.

En el proyecto Los Mantos se encuentran en superficie ejemplares de óxidos de cobre como crisocola – malaquita – tenorita y sulfuros como bornita – calcopirita – calcosina – galena – esfalerita, los que se encuentran expuestos debido a trabajos mineros artesanales, por lo que su extensión y distribución es desconocido; la ocurrencia de esta mineralización está ligada principalmente al ensamble de sílice – feldespato potásico, baritina y calcita, y se aloja en horizontes de roca lávica autobrechada en su mayoría. Dentro del plan de exploración de Compañía Minera Cerro Negro se consideró trabajar esta zona, para identificar el potencial geológico del sector y generar zonas de exploración. En base al trabajo de cartografiado lito-estructural a escala 1/10 000, muestreo geoquímico selectivo (análisis de Cu/Ag) y estudio mineralógico (secciones pulidas y microsonda), se investigan algunos parámetros implicados en la génesis de mineralización y se llevan a un modelo geológico compatible con los datos existentes.

En consideración de lo expuesto, se planteó la siguiente interrogante ¿Cuáles son los controles implicados en la génesis de mineralización y el tipo de depósito en el proyecto Los Mantos? Se intenta desarrollar un modelo metalogénico que tenga carácter predictivo, con aplicación para exploración futura en el distrito y en otros lugares donde se presenten condiciones geológicas similares.

La presente tesis tiene como objetivo general: Proponer un modelo genético para el proyecto Los Mantos, y tiene como objetivos específicos: Realizar cartografiado geológico superficial a escala

1/10000, definir los controles implicados en la formación de mineralización en Los Mantos, y mediante el estudio microscópico y de microsonda, así mismo identificar la relación entre la mineralización de Cu y Ag en el proyecto Los Mantos.

Planteándose como hipótesis la existencia de un cuerpo mineralizado de Cu y Ag, (hospedado en el Corredor de Estratoligados Catemú – Cerro Negro), alojado en una secuencia volcánica específica (lavas autobrechadas), relacionada a la ocurrencia de minerales de alteración como sílice, feldespatos potásico, baritina y calcita, emparentados estos a rellenos de cavidades, vetas y estructuras (fallas); lo que definiría un depósito del tipo estratoligado alojado en rocas volcánico – sedimentarias.

La metodología de investigación utilizada en la presente tesis es analítica experimental, ya que la investigación está orientada a realizar trabajos de gabinete y campo; de acuerdo a su método de contrastación es descriptiva debido a que los datos obtenidos son directamente de la realidad, sin que estos sean modificados o alterados.

La importancia de la tesis radica en el entendimiento del cómo y porqué se genera la mineralización en Los Mantos, en la actualidad existen muchas teorías respecto a la génesis de los yacimientos tipo estratoligado de Cu-Ag, esto me ha motivado a poder realizar esta investigación, teniendo en cuenta los diferentes estudios y relacionando a cuál de ellos se aplica mejor lo encontrado en el proyecto Los Mantos. Analizando las características petrológicas, mineralógicas y estructurales, este trabajo está orientado a definir un modelo genético del Proyecto Los Mantos para proponer guías de exploración de este tipo de yacimientos y hacerlas extensivas para encontrar otros depósitos que pudieran tener las mismas características. Además el modelo genético así favorecido, podría tener aplicación en otros ambientes geológicos donde existen mantos (estratoligados) con características análogas.

Los alcances de la investigación se refieren al reconocimiento geológico del sector sur este del distrito minero Cerro Negro; mediante el cartografiado lito-estructural, muestreo geoquímico y análisis microscópico (secciones pulidas y microsonda), enfocado en la búsqueda de mineralización como vetas con ensamble de sílice-baritina, zona de inyección (relleno de cavidades) de sílice, baritina y carbonatos (calcita – ankerita) presentes en las rocas volcánico-sedimentarias Cretácicas de la formación Las Chilcas.

En el capítulo II se detalla el marco teórico, el contexto regional de la zona de estudio así como definiciones generales y teorías existentes respecto al problema en estudio. En el capítulo III se detalla la metodología de la investigación desarrollada en gabinete y campo, técnicas de procesamiento de

datos y descripción del software utilizado; aspectos generales como ubicación, clima, geomorfología del sector de estudio y marco geológico regional. En el Capítulo VI se desarrollan los resultados de la investigación, resultado de los trabajos de cartografiado lito-estructural (escala 1/10 000) y análisis de los controles de mineralización del proyecto, análisis químico y estudio de microscopía (sección pulida y microsonda). Finalmente en el Capítulo V se exponen las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

- Geología del Distrito Minero Los Mantos de Catemú – Los Portales – Provincia de Aconcagua. Espinoza (1969). Se reconoce la existencia de mineralización cuprífera en los horizontes de brecha sedimentaria, siendo el principal objetivo de exploración la ampliación de las pequeñas minas existentes en el área desde las cuales propone la realización de muestreos, así como una campaña de perforación para determinar la importancia económica de la mineralización.
- Estudio Geológico de las pertenencias Portales – Distrito Minero Cerro Negro – Provincia de Aconcagua. Peebles (1971). Identifica la existencia de un horizonte sedimentario dentro del cual se observa mineralización restringida a rocas sedimentarias finas del tipo lutitas cuya potencia varía entre 0.40 – 0.50 m. con leyes conocidas entre 1 – 2 % de Cu. Posibilidad de que este horizonte sedimentario cubra un área aproximada de 2 Km².
- Levantamiento Geológico – Minero de las pertenencias y alrededores de Cerro Negro (Elgueta et al, 1990). Define que la mineralización en Cerro Negro es estrictamente estratoligada, y se aloja en un horizonte texturalmente permeable y heterogéneo en la secuencia volcano-sedimentaria (Brecha Diablo), concluyen que el zonamiento de alteración es típicamente un rasgo hidrotermal y que las intrusiones en Cerro Negro pueden estar relacionadas a stocks de emplazamiento profundo; las cuales pueden haber provisto de fluidos mineralizantes, los que migraron hacia horizontes permeables de la Brecha Diablo (Horizonte mineralizado), ocupando preferentemente la facies de contacto, actuando los horizontes supra e infrayacentes como capas impermeables que sellaron el movimiento del fluido.

- Estudio Geológico Mínero, Área 3; preparado para Compañía Minera Cerro Negro. (Araya, 1988). Reconoce la existencia de pequeñas zonas de cateo (“picados”) y pequeñas minas entre los sectores Portales y Catemú, las que constituyen una muy favorable evidencia de la presencia de cuerpos mineralizados en la cuenca del Ñilhue (SE distrito minero Cerro Negro), bajo superficie al Este.
- Mapa geológico superficial 1:2000, Área Mina Yacimiento Cerro Negro y Geología del Distrito Minero Cerro Negro – Catemú (Injoque, 1993). Concluye la existencia de dos sub-distritos estructurales denominados respectivamente Cerro Negro, al Norte, en que predominan las estructuras N-S y Portales – Catemú al Sur, en que predominan las estructuras WSW – ENE. Define la existencia de dos eventos mineralizadores, aparentemente formados secuencialmente. El primero es el Evento Mineralizador Cerro Negro, que fue infiltracional, de baja temperatura, no reemplazativo, el cual mineralizó con bornita, calcosina, calcopirita, calcita la Brecha Diablo y alrededor, aparentemente formó un halo de diseminación débil con cuarzo – calcita – baritina – óxidos de hierro y cobre. Este evento formó los yacimientos mantiformes Cerro Negro y los Mantos de Catemú, mineralizando brechas laharicas sub-angulares, y vetas rellenando fracturas y fallas abiertas. El segundo es el evento, de tipo Metamórfico de contacto, asocia a intrusivos de pórfido diorítico, en donde principalmente se formó calcopirita con gangas de epidota – granate – tremolita.
- Razones Isotópicas de S de los sulfuros del distrito minero Cerro Negro (Munizaga et al, 1994). Estos autores reportaron que los sulfuros en Cerro Negro exhiben valores muy bajos de isótopos de azufre, en el rango -21.2 y -15.6 permil, los cuales contrasta con los valores en torno a 0 permil típicos de depósitos en secuencias meramente volcánicas, como los mantos cupríferos jurásicos de la región Antofagasta. Proponen que los valores reflejan una asociación con materia orgánica proveniente de sedimentos lacustres que existen en la secuencia volcano-sedimentaria. Sugieren que actividad bacteriana en los sedimentos habría producido el fraccionamiento del azufre reflejado en los valores isotópicos de los sulfuros. Sin embargo, la baritina tiene azufre con valores que indican una fuente ígnea.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Metalogénesis de Chile

La metalogénesis de Chile y en general de la Cordillera de Los Andes está determinada por el marco tectónico de ésta cadena montañosa, el que corresponde a un margen continental activo con subducción de corteza oceánica bajo el continente sudamericano. Aunque este marco tectónico es común a toda la cadena andina, la evolución geológica tiene notables diferencias a lo largo de ella. Los Andes Centrales (20°-45° Lat. S), que son los más relevantes para la metalogénesis chilena, se consideran como un ejemplo clásico de un orógeno “simple” desarrollado en un margen convergente de placas (Dewey & Bird, 1970; James, 1971), formada sobre un sistema de subducción de larga vida y activo en la actualidad (Maksaev, 2001).

Una significativa parte de la riqueza mineral de Chile está constituida por varios depósitos gigantes de tipo pórfido cuprífero, incluyendo los mayores depósitos de este tipo en el mundo. Como Chuquicamata o El Teniente que contienen > 50 millones de toneladas de Cu fino, por lo que fueron denominados como monstruosos (“behemotian”) por Clark (1993), para indicar que son mayores que los pórfidos cupríferos súper-gigantes a nivel mundial. En efecto la mayor parte de la producción cuprífera de Chile proviene de 16 pórfidos cupríferos, 12 en el Norte de Chile y 4 en la Zona Central. Es decir proviene de unos pocos depósitos gigantes de cobre. La segunda fuente de cobre chileno proviene de depósitos estratoligados, hospedados por rocas volcánicas del Jurásico y del Cretácico Inferior, tal como Cerro Negro, Catemú, El Soldado, entre otros (Maksaev, 2001).

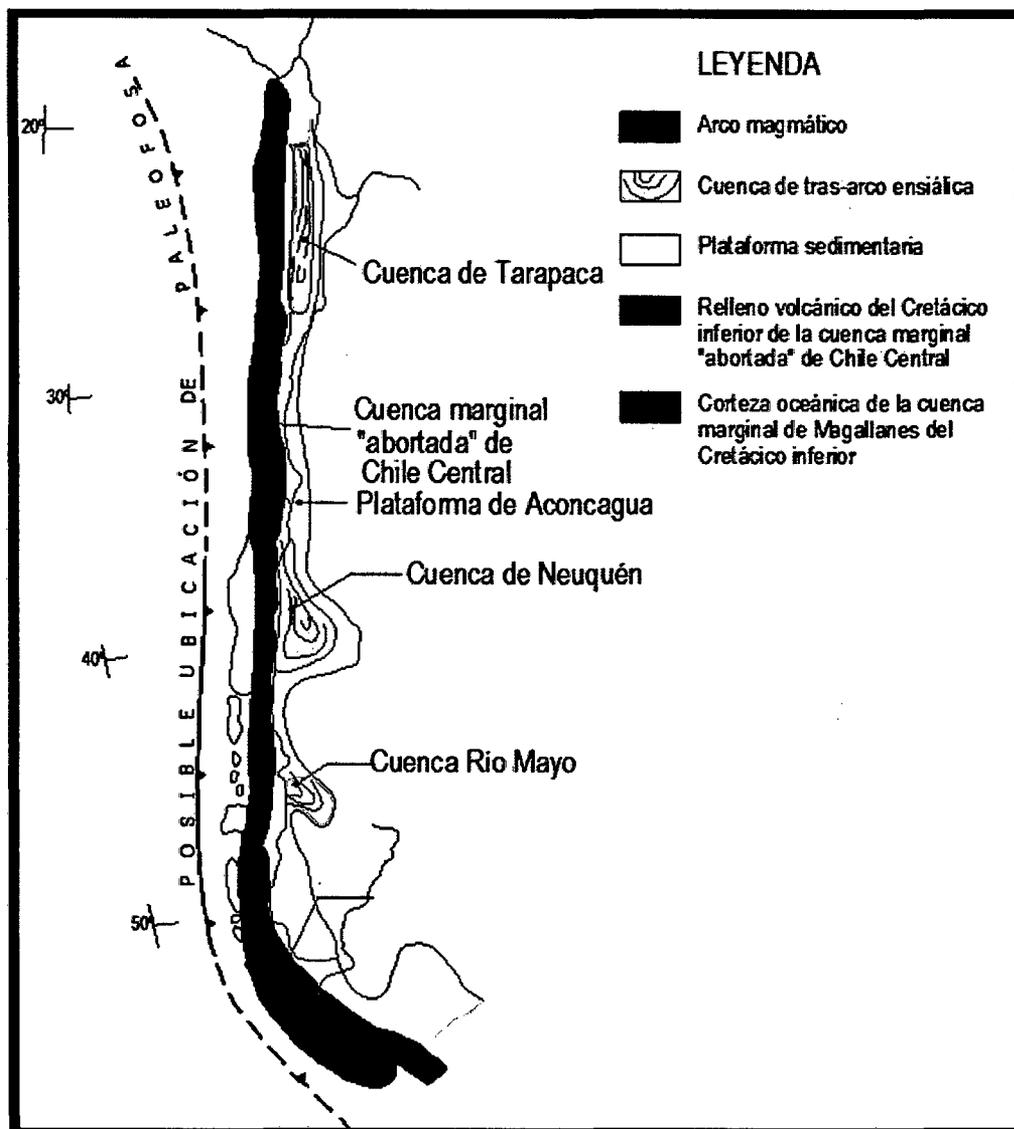


Figura N°01 – Sistema de Arcos magmáticos y tras arcos durante el Jurásico a Cretácico inferior en Chile (Mpodozis & Ramos, 1990; Tomado de Maksaev, 2001).

Para Maksaev (2001), el desarrollo del arco magmático del Jurásico a Cretácico Inferior fue acompañado por el desarrollo de una cuenca de tras-arco (Cuenca de Tarapacá; Mpodozis & Ramos, 1990). Las secuencias de tras-arco están preservadas como una faja de rocas sedimentarias marinas y continentales expuestas 70 a 110 Km al este del arco en la II Región (Reutter & Scheuber, 1988), extendiéndose hacia el sur por la porción media de Chile y engranando con las rocas volcánicas hacia el occidente (Ej. engrane entre Formación Bandurrias y el Grupo Chañarcillo). La cuenca de tras-arco tiene esencialmente depósitos sedimentarios al norte de los 27° Lat. S. (Cuenca de Tarapacá). En contraste al sur de los 27° Lat. S y al menos hasta los 35° Lat. S existen extensos depósitos

volcánicos andesíticos y basálticos del Cretácico dentro de la cuenca con algunas intercalaciones sedimentarias marinas a continentales que incluyen lutitas carbonosas y evaporitas (yeso, anhidrita). Estos depósitos se han interpretado como el resultado de la evolución de la cuenca de tras-arco hacia una cuenca marginal ensiálica o “abortada” en el sentido que se desarrolló sobre corteza continental estirada y adelgazada, pero no alcanzó a desarrollar corteza oceánica. Las rocas volcánicas de esta cuenca marginal ensiálica se interdigitan hacia el este con una estrecha plataforma de rocas carbonatadas y sedimentarias (Plataforma de Aconcagua). Una situación similar existe en Perú Central donde la formación Puente de Piedra del Cretácico fue interpretada por Atherton et al. (1983) como una cuenca marginal ensiálica, en base a su litología y petroquímica. Lo anterior implica que si bien en Los Andes Centrales durante el Jurásico y Cretácico Inferior se mantuvo un esquema general de par arco magmático – cuenca de tras arco existía una segmentación tectónica que se refleja mayormente en la naturaleza de los depósitos tras-arco (Figura N°01) (Maksaev, 2001).

Las rocas volcánicas y plutónicas relacionadas al arco del Jurásico en el norte de Chile hospedan muchos depósitos de cobre y constituyen un distintivo metalotecto cuprífero. Los cuerpos mineralizados más significativos son los depósitos estratoligados de cobre hospedados por las rocas volcánicas del Jurásico (Ej. Mantos Blancos, Buena Esperanza, Michilla y Santo Domingo; Boric et al., 1990) y sistemas de vetas cupríferas de rumbo NE a ENE hospedadas por intrusivos dioríticos - granodioríticos (Ej. Minita-Despreciada, Toldo- Velarde, Naguayán-Desesperado, Montecristo; Boric et al., 1990; Vivallo & Henríquez, 1998). También existe un dominio de la mineralización cuprífera en el arco magmático del Cretácico Inferior y éste hospeda depósitos estratoligados de cobre en la zona central de Chile (Ej. El Soldado, Lo Aguirre, Cerro Negro, Talcuna), pero la mineralización del Cretácico Inferior es más variada incluyendo el pórfido cuprífero de Andacollo con depósitos de oro periférico (Reyes, 1991; Oyarzún et al., 1996), depósitos de Skarn cupríferos (Distritos Cabildo, Punta del Cobre, Cerro Campana), mineralización de hierro en el dominio de la Zona de Falla de Atacama en la III y IV Regiones (Maksaev, 2001).

A pesar que la mineralización cuprífera domina en las rocas ígneas asociadas al arco magmático del Jurásico a Cretácico Inferior, los pórfidos cupríferos son raros (sólo Andacollo y algunos prospectos sub-económicos). En contraste los pórfidos cupríferos son los depósitos económicamente más importantes asociados a las rocas ígneas de los arcos magmáticos más jóvenes en el norte de Chile (Maksaev, 2001).

2.2.1.1. Franjas Metalogénicas

Chile presenta varias franjas metalogénicas longitudinales que tienen características distintivas en cuanto a edad, posición geográfica y tipo(s) de mineralización presente. Maksaev hace una combinación de la distribución espacial con la edad de los depósitos, de modo que se le asigna un rango de edad a las franjas metalogénicas (Maksaev, 2001). Estas son:

- Franja Metalogénica del Carbonífero Superior al Triásico
- Franja Metalogénica del Jurásico
- Franja Metalogénica del Cretácico Inferior
- Franja Metalogénica del Cretácico Superior
- Franja Metalogénica del Paleoceno a Eoceno Inferior
- Franja Metalogénica del Eoceno Superior a Oligoceno Inferior
- Franja Metalogénica del Neógeno

Para efectos del presente trabajo se describe la Franja Metalogénica que corresponde al sector de estudio (Cretácico Inferior).

2.2.1.1.1. Franja Metalogénica del Cretácico Inferior

Existe un variado conjunto de tipos de depósitos metalíferos asociados a rocas del Cretácico Inferior a lo largo de la Cordillera de la Costa del centro Chile (Figura N°02). Estos incluyen algunos pórfidos cupríferos, la mayoría de los cuales son sub-económicos a excepción de Andacollo que es el único que está en explotación (Reyes, 1991; Oyarzún et al., 1996).

Este pórfido de Cu-Mo es el que contiene mayor ley de oro (0.23 g/t Au) de los pórfidos de Cu-Mo en explotación en el país y hacia el oeste del pórfido existe mineralización de oro en vetas y en cuerpos estratoligados también del Cretácico Inferior. Entre los 26° a 31°S, existen muchos yacimientos de Fe (magnetita – apatito) hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior en sectores aledaños a intrusivos dioríticos a granodioríticos del Albiano (Maksaev, 2001).

Estos depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama. Ej. Cerro Imán, Cerro Negro, El Tofo y Romeral. Existen indicios menores de mineralización de cobre y de oro ligados al mismo contexto, particularmente en la periferia de los cuerpos ferríferos o en la zona de la Falla de Atacama. En la misma zona donde se presentan los yacimientos de Fe-apatito existen también yacimientos de óxido de Fe (Cu-Au) como Candelaria y Manto Verde y otros menores del distrito Punta del Cobre (Maksaev, 2001).

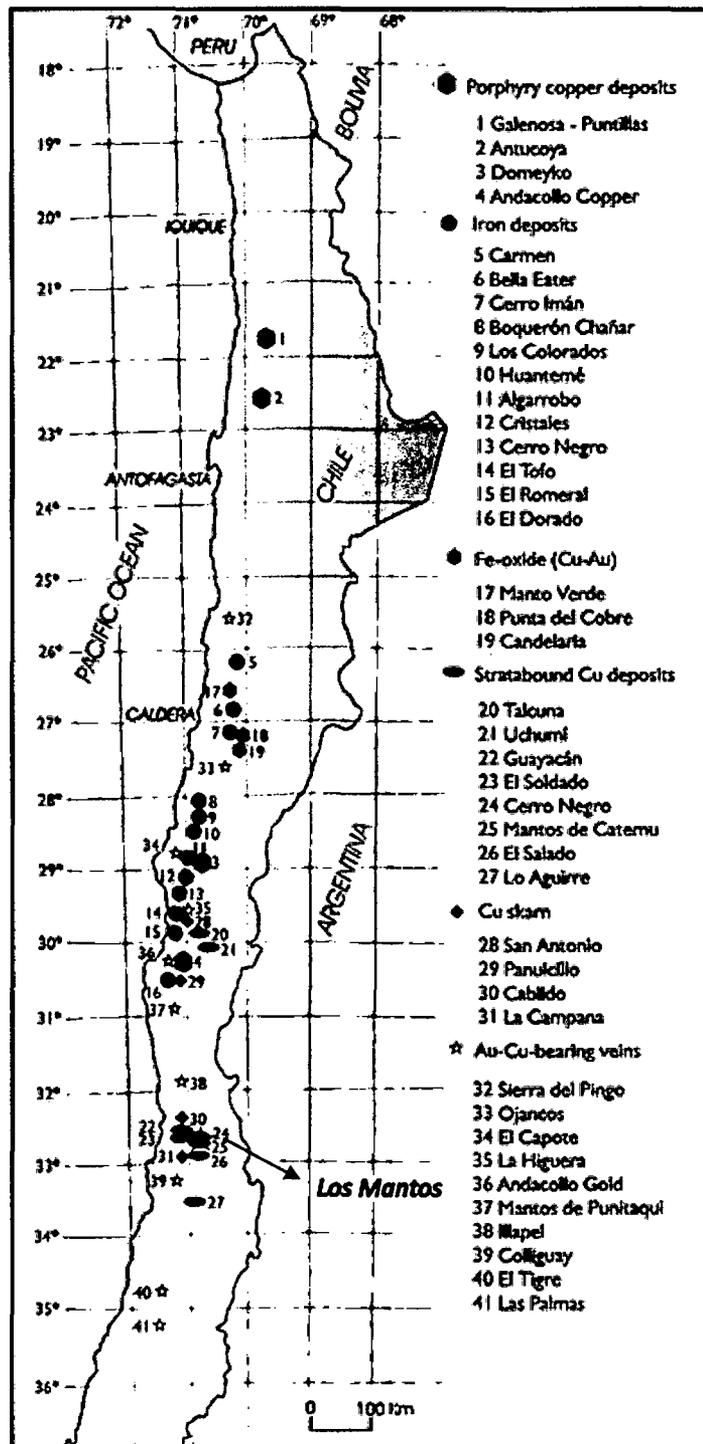


Figura N°02 - Franja Metalogénica del Cretácico Inferior, con ubicación de yacimientos tipo Skarn y estratoligados volcano y volcano-sedimentarios (Maksaev, 2001)

En la zona central de Chile y Norte Chico existen también depósitos estratoligados de cobre, los de mayor volumen están hospedados por rocas volcánicas del Cretácico Inferior Ej. El Soldado y Lo Aguirre. Además, existen depósitos estratoligados hospedados por rocas sedimentarias volcanoclásticas como Talcuna y Cerro Negro y en zonas de contacto entre intrusivos del Albiano y calizas Neocomianas en las regiones IV y V existen Skarn cupríferos Ej. Distritos Panulcillo y La Campana. En general los mantos cupríferos de esta región tienen valores significativos de Ag, pero son relativamente pobres en Au. En contraste a lo largo de la Cordillera de la Costa existe un gran número de vetas auríferas mesotermales las que se emplazan ya sea en cuerpos intrusivos Cretácicos o en rocas estratificadas en la periferia de las intrusiones. Actualmente los distritos auríferos del Cretácico Inferior carecen de importancia económica, pero algunos distritos como Andacollo y Mantos de Punitaqui se encuentran en explotación (Maksaev, 2001).

2.2.2. Yacimientos Estratoligados de Cu

Los yacimientos sedimentarios estratoligados de cobre son la segunda fuente más importante de cobre, después de los depósitos tipo pórfido de Cu. El 20% de la producción mundial de Cobre proviene de este tipo de yacimientos. Además son fuente importante de mineralización de Cobalto y Plata, siendo además el cuarto tipo de depósitos en producción de plata a escala global (Hayes et al, 2015).

Los yacimientos sedimentarios estratoligados de cobre tienen presencia de diseminación y/o vetilleo de minerales de cobre, los que están emplazados en rocas sedimentarias a meta-sedimentarias; este tipo de depósitos están caracterizados por un fuerte zonamiento lateral de minerales mena a lo largo del estrato, variando de pirita – calcopirita – bornita – calcosina – hematita (Figura N°03) (Hayes et al, 2015).

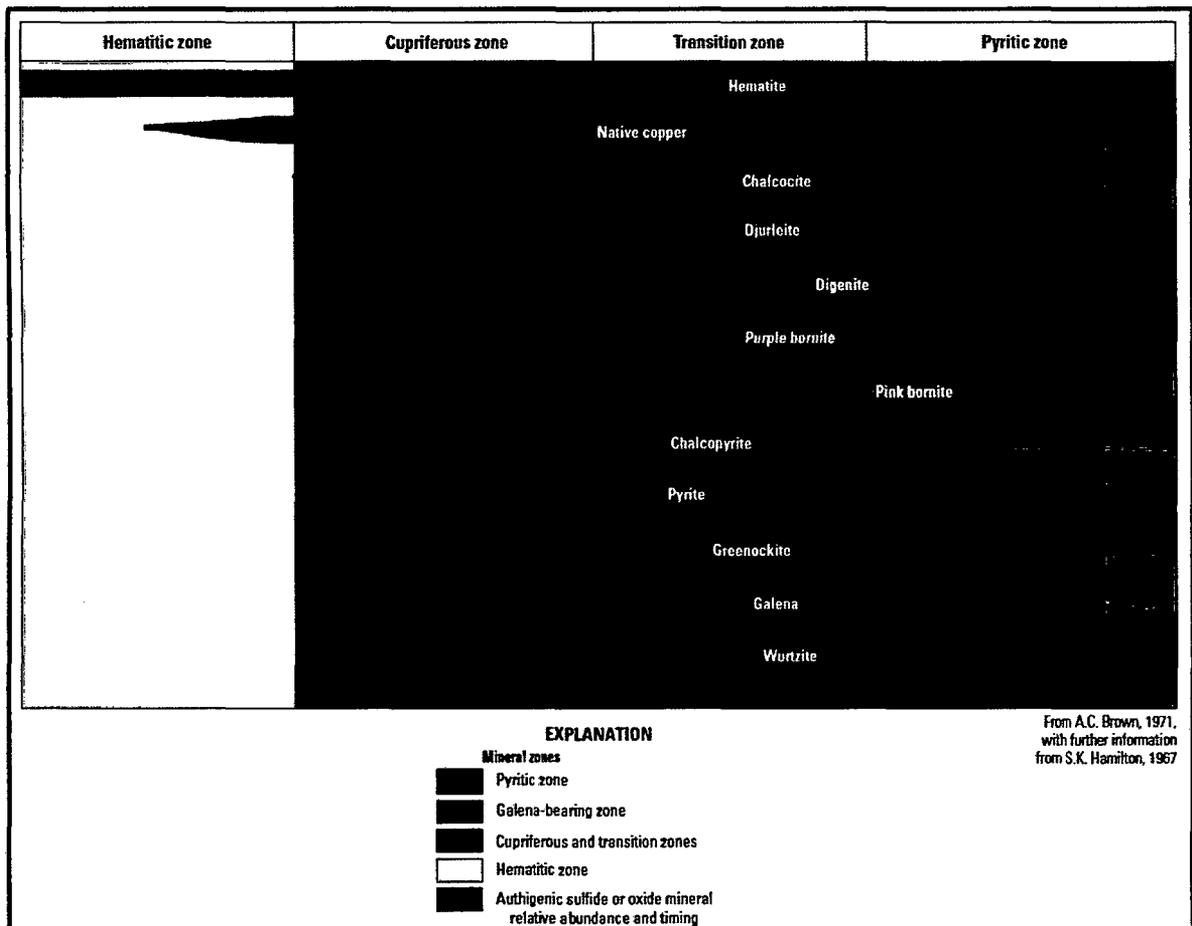


Figura N°03 - Zonamiento mineral del depósito White Peni – Michigan - USA (tipo Facie Reductora) propuesto por White & Wright (1966) y Brown (1971). El diagrama ilustra la distribución de minerales solo en espacios, no en el tiempo (Hayes et al, 2015).

2.2.2.1. Subtipos de Yacimientos estratoligados

Ocurren 3 subtipos de depósitos, los cuales se dividen por litología huésped de la mineralización y por el tipo de agente reductor que precipita el Cu y el S (75-225°C), pudiendo ser este agente: oxidante (Hm estable), mecanismos de transporte de metales o salmueras sedimentarias (Hayes et al, 2015).

2.2.2.1.1. Tipo Facie Reductora (RF – Reduced Facie Model)

Este tipo de depósitos están presentes donde rocas sedimentarias clásticas continentales se superponen por rocas carbonatadas, lacustrinas o marinas de extensión regional, ricas en materia orgánica, que actúan como trampas para

deposición mineral. Las rocas huéspedes de mineralización son lutitas o calizas adyacentes, areniscas o conglomerados. Comúnmente, las facies reductoras suprayacen rocas volcánicas basálticas en ambientes de rift. Poseen un tonelaje relativamente alto (Tabla N°01), un ejemplo de este depósito es White Pine en Michigan (USA); el cual produjo 138Mton de mineral conteniendo 1.14% Cu y 8 g/t Ag entre los años de 1953 y 1982 (Kirkham, 1989; Lindsey et al, 1996).

El ambiente de reducción propicio para la generación de este subtipo de depósitos está dado por lutitas negras y calizas (Figura N°04). La mineralización en las lutitas es de grano fino (2 a 20 micrones en White Pine, USA y menos de 50 micrones en Kupferschiefer, Polonia) calcosina diseminada acompañada por lentes y vetillas de cobre nativo (White Pine) y calcopirita y bornita (Kupferschiefer). Las areniscas mineralizadas en Kupferschiefer contienen sulfuros de cobre como cemento relleno los poros, comúnmente calcosina (Tomaszewski, 1986; Lindsey et al, 1996).

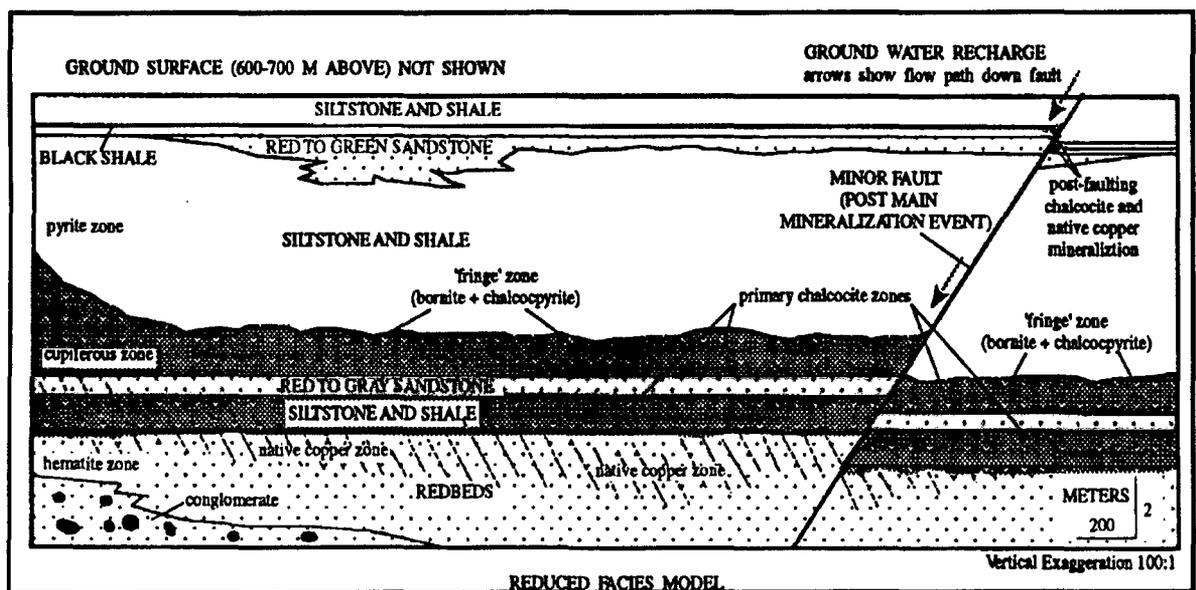


Figura N°04 – Sección del depósito Kupferschiefer, Polonia. Corte esquemático mostrando las zonas mineralizadas. Se genera la mineralización, fallamiento posterior favorece el ingreso de fluidos meteóricos generando re-movilización de las menas de Cu (mineralización de calcosina y cobre nativo) - Tomado de Mauk, 1992; modificado por Lindsey et al, 1996.

2.2.2.1.2. Tipo Capas Rojas (RB – Redbed Model)

Incluyen depósitos en áreas de rocas reductoras en secuencias de capas rojas, los tonelajes son bajos (Tabla N°01), siendo menores fuentes de cobre. Tienen el mismo rasgo geológico que los del tipo facie-reductor pero tiene ausencia de extensión regional de los estratos reductores. El Cu comúnmente reemplaza acumulaciones locales de fósiles y plantas (LaPoint, 1976; Lindsey et al, 1996), su ambiente tectónico son las zonas de rift y las cuencas intra-cratónicas (Lindsey et al, 1996).

El ambiente reductor de este depósito está dado por la presencia de materia orgánica (fósiles o plantas). La litología en la que se aloja la mineralización son areniscas y en menor medida niveles de limolita y lutitas (Figura N°05). La mineralización está compuesta principalmente por malaquita y azurita, y calcosina en los poros de las areniscas, algunos minerales reemplazan los remanentes de plantas fósiles (Lindsey et al, 1996).

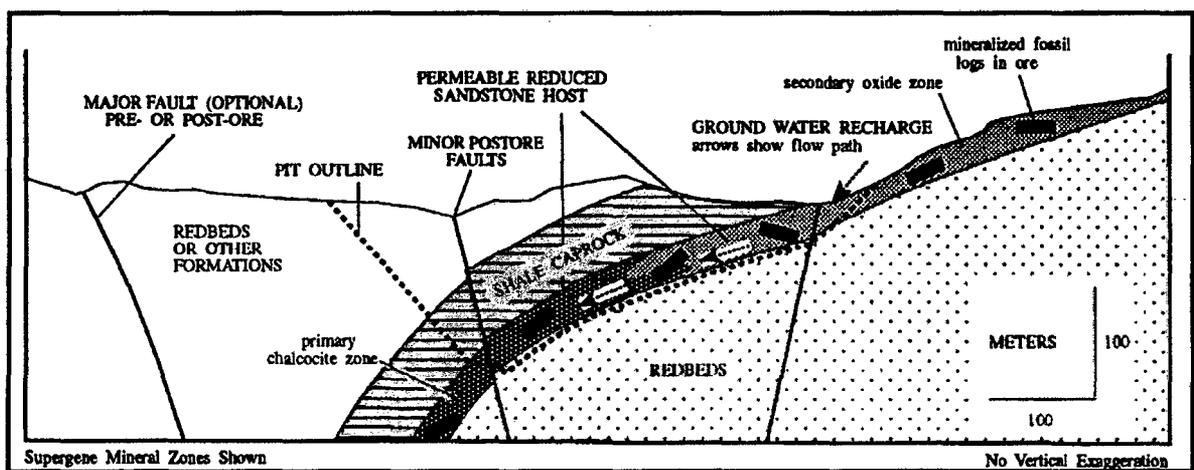


Figura N°05 – Sección esquemática yacimiento Nacimiento (USA) estratoligado tipo capas rojas (Redbed) – muestra un nivel de areniscas con fósiles y materia orgánica mineralizado, por cambios en gradiente de aguas subterráneas se generan zonas de oxidación; este horizonte se encuentra limitado por fallas y sellado por un nivel impermeable de lutitas. Tomado de Woodward et al, 1974; modificado por Lindsey et al, 1996

2.2.2.1.3. Tipo Arenisca Revett (RV – Revett Model)

Definido por Spanski en 1992, están basados en los depósitos de edad Proterozoica de la formación Revett del Cinturón del Supergrupo de Montana y Idaho - USA, poseen tonelajes intermedios (Tabla N°01). La mina Spar Lake en Montana (USA) produjo 44Mton de mineral con ley de 0.74% Cu y 53g/ton Ag (Balla, 1992; Lindsey et al, 1996). Se encuentran en capas gruesas de cuarcitas piritosas (y también en metareniscas), los cuerpos mineralizados están emplazados, especialmente cerca de fallas. El cobre no se asocia con materia orgánica sólida en los depósitos tipo Revett, pero podría haberse depositado por gas reductor generado por la degradación de materia orgánica (Lindsey et al, 1996).

Las zonas reductoras en areniscas están blanqueadas (carbonatación) y contienen pirita o pseudomorfos de óxidos de hierro; posiblemente formado por acción reductora de fluidos hidrocarburos. Roca reductora está separada de la roca oxidante por un frente redox (regiones de pirita a hematita - magnetita) (Figura N°06). Presenta sulfuros diseminados, incluyendo calcosina y bornita, que reemplazan el cemento de las areniscas o rellenan los espacios de los poros (formando parches en algunos casos), menor cantidad de mineral está presente en vetas; el mineral se aloja en cuarcitas refractarias (Hayes & Einaudi, 1986; Lindsey et al, 1996)

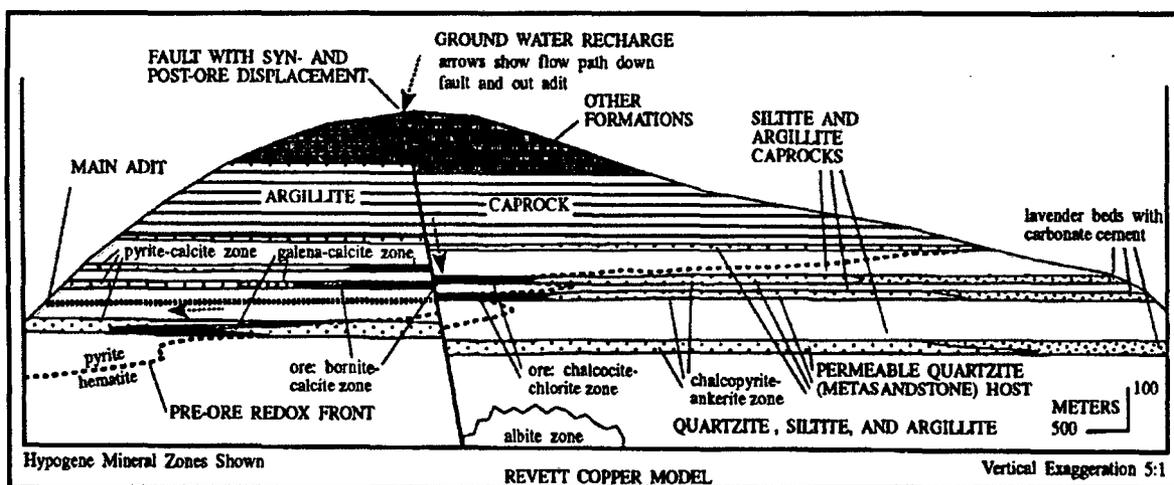


Figura N°06 – Sección esquemática del depósito Spar Lake (USA) estratoligado tipo areniscas Revett; la mineralización se aloja en niveles de areniscas a metareniscas permeables; se define un frente pre-mineralizado redox; los contenidos mineralizados se alojan hacia las zonas piritosas, formando cuerpos con bornita y hacia la zona superior galena ambas acompañadas por calcita; la zona de hematita está definida por presencia de calcopirita con ankerita; los niveles de arenisca presentan amplia dispersión de carbonatos (Calcita – ankerita) generados por degradación de hidrocarburos; el sistema presenta un sello de rocas pelíticas (limolitas / lutitas?) – Tomado de Hayes & Einaudi, 1986; modificado por Lindsey et al, 1996.

Los del tipo reductor (RF) y depósitos de Cu en arenisca (RV) pueden ser de gran volumen (decenas o millones a billones de toneladas de mineral). Los del tipo capas rojas (RB) tienen como mucho 10 Mton de mineral. Excluyendo el Cinturón de cobre Centro Africano, las leyes en los yacimientos del tipo facie reductor es de 1.38% Cu, en areniscas 2.09% Cu (Parks et al, 2012; Hayes et al, 2015) (Tabla N°01).

Tabla N°01 – Tonelajes medios - máximos estimados y leyes de Cu de los subtipos de depósitos estratoligados (Lindsey et al, 1996).

Model	Number of deposits in model	Median Size (tonnes X 10 ⁶)	Copper grade (percent)	Maximum Size (tonnes X 10 ⁶)
Reduced (RF) ¹	43	32	2.3	2600 ²
Redbed (RB) ¹	17	0.12	2.8	10
Revett (RV) ^{1,3}	7	19	0.86	147

¹Cox and others (1992)
²Kirkham (1989)
³Spanski (1992)

Estos subtipos de depósitos estratoligados son una fuente importante de otros metales. Siendo por largo las principales fuentes de cobalto (Co) y el 4° tipo de depósito productor de plata (Ag). El 25% de los yacimientos

estratoligados contienen Ag, variando de 2 a 200g/ton Ag y el 14% contiene cobalto, con leyes de 0.05 a 0.5% Co en mena primaria (Parks et al, 2012). Los que contienen subproducto de Ag no poseen Co y viceversa, la excepción serían los del tipo Kupferschiefer (RF) que contienen ambos subtipos de mineralización (Hayes et al, 2015).

Estos depósitos son confinados y limitados a paquetes sedimentarios específicos, (Figura N°07), por lo general poseen una geometría tipo sabana, tabular o lenticular (Hayes et al, 2015).

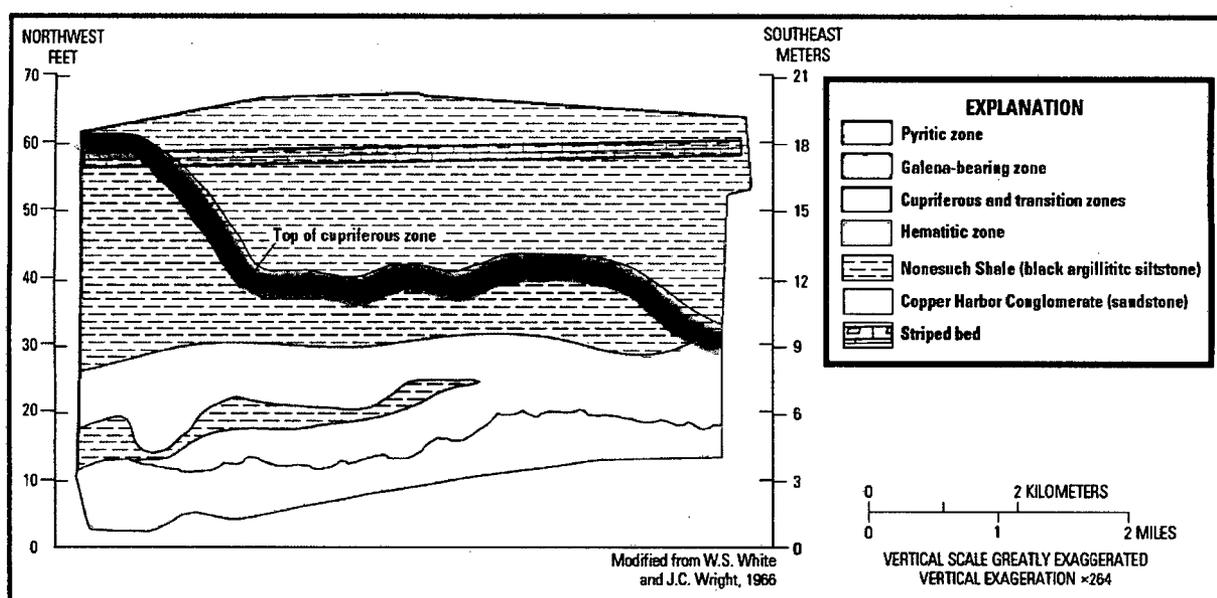


Figura N°07 - Sección esquemática mostrando el zonamiento mineral relacionado a la estratigrafía en el depósito White Pine estratoligado de facie reductora en Michigan - USA, modificado de White & White (1966). Los colores coinciden con la Figura N°01. La roca achurada con líneas cortadas corresponde a Lutitas Nonesuch (Limolitas negras), la mas importante roca huésped. Es importante destacar la exageración vertical; ya que la mineralización en realidad se distribuye como una sábana (Hayes et al, 2015).

2.2.2.2. Manto Tipo Chileno Cu-Ag

Los yacimientos del tipo Manto Chileno Cu-Ag, se albergan en secuencias volcano-sedimentarias de edad Jurásico Superior a Cretácico Inferior a lo largo de la costa chilena de centro a norte (Maksaev & Zentilli, 2002). Estas secuencias fueron generadas en cuencas tras-arco extensionales, en un margen convergente activo (Figura N°08), donde en adición de gran actividad magmática y enterramiento indujo a que tome

lugar eventos de metamorfismo de bajo grado (Levi et al, 1988; Carrillo-Rosua et al, 2005).

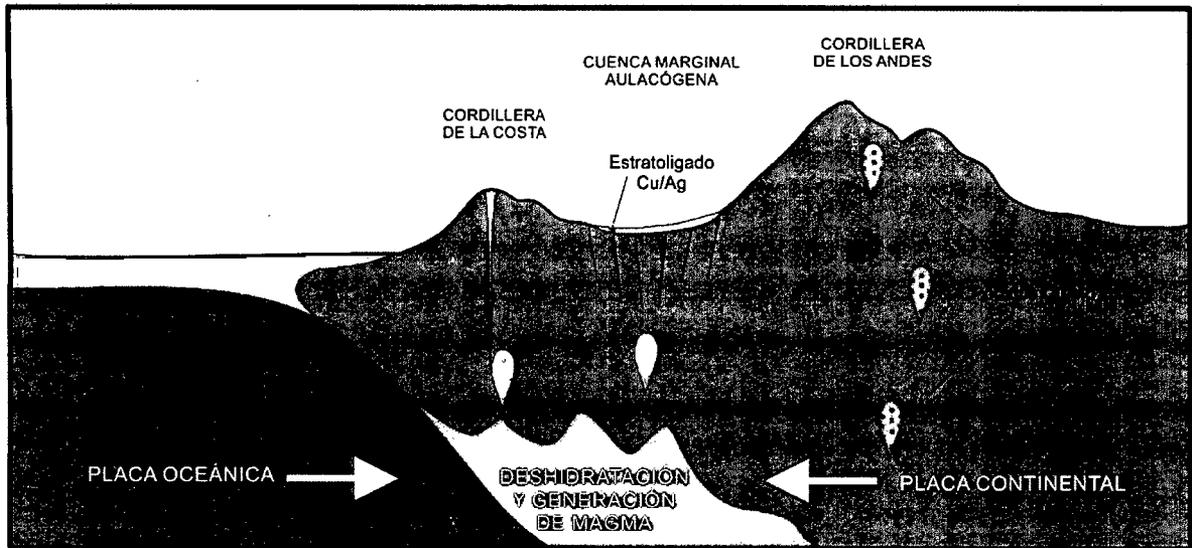


Figura N°08 – Sección esquemática sin escala de la zona central de Chile; se observa la cordillera de la costa, con su infraestructura de arco volcánico – magmático erosionada; desarrollo de cuenca marginal aulacógena donde se emplazan los depósitos estratoligados como el caso de Cerro Negro, Catemú, El Soldado, entre otros. El arco magmático migra hacia el E, cordillera de los Andes con el consecuente desarrollo y emplazamiento de Pórfidos de Cu/Mo, ejemplo de estos depósitos son Los Bronces y El Teniente – Tomado y modificado de (Maksaev & Zentilli, 2002).

2.2.2.3. Rasgos Geológicos de los Yacimientos Estratoligados

Maksaev & Zentilli en 2002 definen dos estadios mayores que son reconocidos en la evolución geológica de los Andes del centro de Chile:

- *Del Jurásico al Cretácico Inferior*; arco magmático flanqueado al este por sedimentos marinos de cuenca tras-arco desarrollado en una tectónica extensional.
- *Del Cretácico Superior al Presente*; desarrollo de sistemas arco volcánico en un ambiente continental con tectónica de corrimiento compresivo, desarrollándose pliegues y cinturones de falla hacia el este del arco en esta etapa.

La mineralización de estratoligados de Cu-Ag fue conspicua durante el primer estadio extensional de la evolución de los Andes chilenos; mientras depósitos de pórfido de cobre dominaron fuertemente durante el segundo estadio (Maksaev & Zentilli, 2002).

Los episodios volcánicos fueron paulatinamente intruídos por diversos batolitos calco-alcalinos dioríticos a granodioríticos de edad Jurásico a Cretácico Inferior; existen además pequeñas intrusiones y enjambres de diques (Marinovic et al, 1995; Dallmeyer et al, 1996; Maksaev & Zentilli, 2002).

La extrusión de la secuencia volcánica tuvo que estar acompañada por una considerable subsidencia cortical, probablemente relacionada a la tectónica extensiva de todo el sistema arco (Dallmeyer et al 1996, Maksaev & Zentilli, 2002). El hecho de que la potente pila volcánica Jurásico – Cretácico Inferior (más de 10 000m) fuera depositada sin edificios o relieves significantes indican que la evolución del arco magmático fue acompañada por adelgazamiento cortical que preparó y acomodó la subsidencia, depositándose la secuencia volcánica sobre una corteza adelgazada (Vergara et al, 1995; Aguirre et al, 1999). En detalle los batolitos del Cretácico inferior (Aptiano – Albiano) están compuestos por varios plutones individuales que conforman un corredor norte – sur, indicando que los batolitos, distribuidos por episodios de inyección magmática, fueron emplazados a lo largo de fallas transtensionales dentro de la pila volcano-sedimentaria Cretácica Inferior e intrusiones antiguas (Maksaev & Zentilli, 2002).

Para Maksaev & Zentilli (2002) la posición estratigráfica y datos de geocronología indican que los depósitos estratoligados de Cu-Ag fueron generados durante el Jurásico Superior a Cretácico Inferior. La tectónica de corrimiento extensional, el adelgazamiento cortical, subsidencia activa, inclinamiento extensional de los estratos volcano-sedimentarios y emplazamiento de batolitos dentro de estos estratos, durante el desarrollo del arco volcano-magmático es singular a la etapa temprana de la

evolución andina de Chile. Sin embargo, parece que estos distintivos periodos de tectónica trastensional facilitaron el emplazamiento somero de masas batolíticas (Figura N°09), proveyendo zonas de debilidad estructural para la circulación de fluidos hidrotermales, y modificar el régimen hidráulico dentro de los estratos permeables de los horizontes volcano-sedimentarios inclinados. La ocurrencia de estos factores específicos y probablemente otros aún desconocidos, pueden tener importancia para la ocurrencia de estos dos episodios de mineralización de estratoligados de Cu-Ag (Maksaev & Zentilli, 2002).

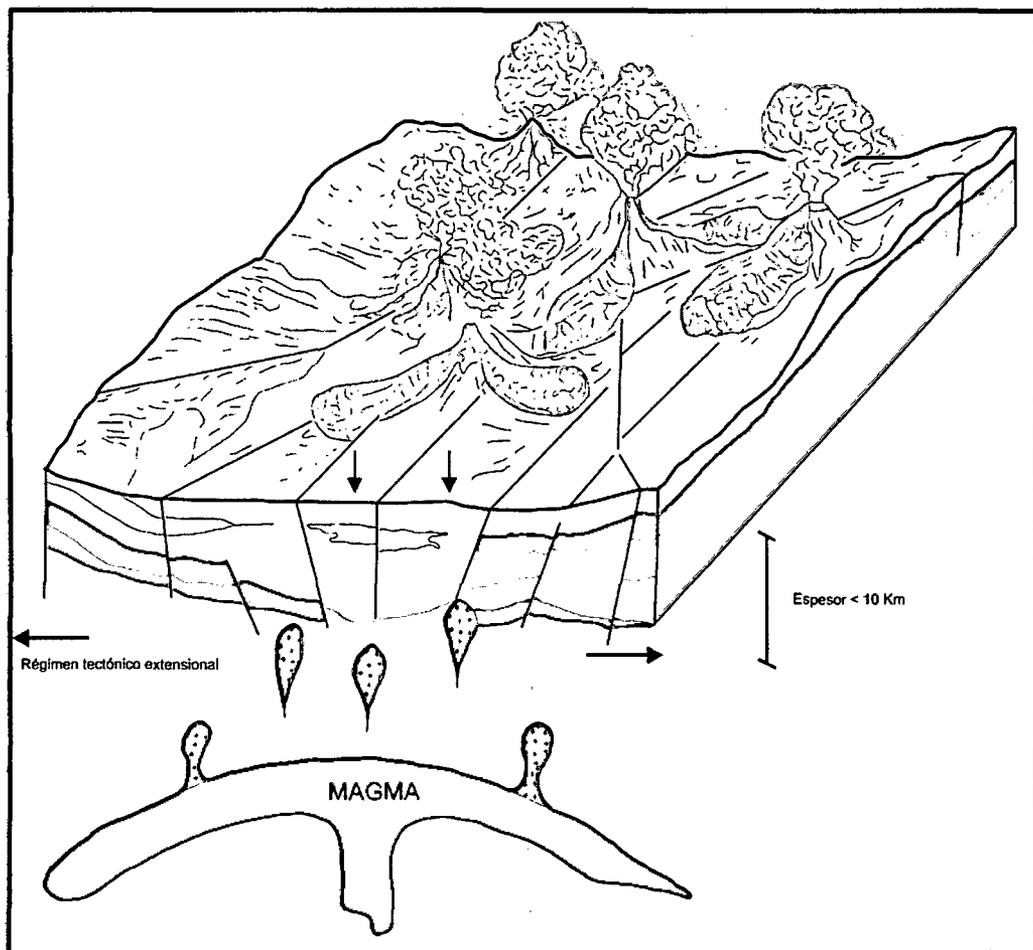


Figura N°09 – Modelo esquemático, se observa una tectónica predominantemente extensiva, acompañada por adelgazamiento cortical e incremento de actividad volcánica y desarrollo de una columna volcánica con potencia mayor a 10 000m; fallamientos y subsidencia generan espacios favorables para el emplazamiento de intrusivos y circulación de fluidos mineralizantes (Maksaev & Zentilli, 2002).

2.2.2.4. Controles y rasgos estructurales

En general la mineralización está controlada por porosidad primaria y secundaria (fracturamiento). El aspecto más importante de depósitos como Cerro Negro es que están alojados en rocas sedimentarias a volcano-sedimentarias. Estas parecen estar controladas en la mayoría de los casos por estratificación y laminación de las rocas sedimentarias. La mineralización está restringida a un horizonte estratigráfico en particular en otras palabras estratoligado, también se reconoce que las estructuras tienen un control importante en el desarrollo de este tipo de yacimientos (Hayes et al, 2015).

Fallas de alto ángulo en los niveles mineralizados se han encontrado en muchos depósitos como en El Soldado y Cerro Negro, por citar algunos. Muchas de estas fallas, sin embargo, cortan y desplazan los cuerpos mineralizados (Figura N°10). La importancia de las fallas en la génesis de mineralización ha sido debatida por años (por ejemplo, la falla White Pine del depósito del White Pine; Ensign et al, 1968; White, 1968), particularmente en depósitos estratoligados del tipo arenisca (RV) como Spar Lake (Falla Este; Hayes et al, 1968; Hayes, 1990; Hayes et al, 2012); comúnmente se puede probar que los estratos mineralizados están afectados por fallas, pero la relación en el tiempo con la génesis de mineralización no es clara, quedando debatible la posibilidad de que las fallas actuaron como alimentadores de soluciones ricas en metales. Para el caso de los depósitos Kupferschiefer y del Cinturón de cobre de Zambia, se reconocen fallas de alto ángulo, las cuales cortan el basamento pero no así los niveles mineralizados, siendo estas fallas margen de graben subyacentes (Hayes et al, 2015).

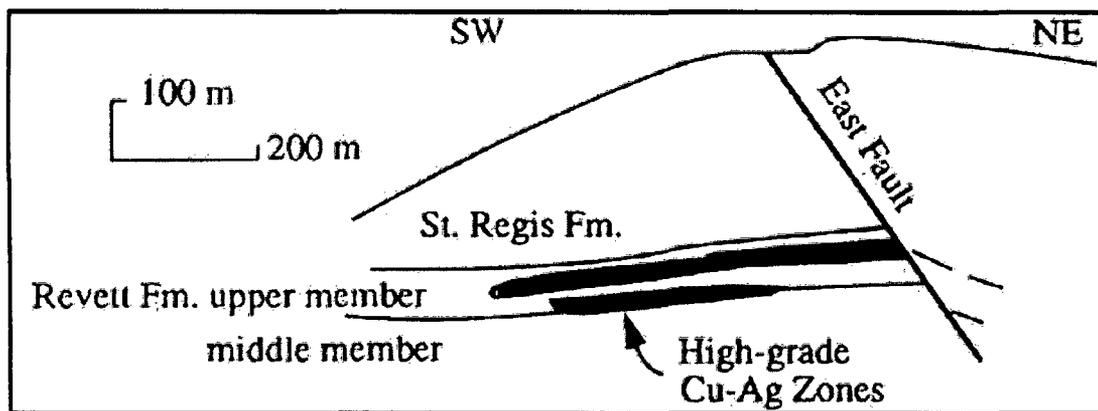


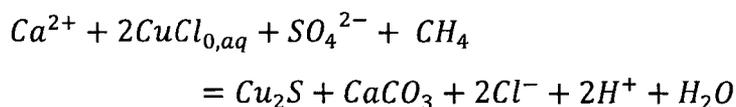
Figura N°10 – Mineralización estratiforme de Cu-Ag localizada preferentemente en cuarcitas relativamente permeables del nivel superior de la Fm. Revett, Spar Lake (Troya) – Montana – USA. Mineralización ascendió a través de fallas (Falla Este), esparciendo lateralmente la mineralización a lo largo del estrato más permeable. (Alex C. Brown, 1992).

2.2.2.5. Alteración y características geoquímica

Las características geoquímicas de los yacimientos estratoligados de Cu son relativamente sencillas. Principalmente dado por la presencia y abundancia de carbonatos. Los carbonatos son por lo general ricos en fierro (Ankerita) en las zonas de calcopirita – pirita ± galena. Estudios detectan que presencia de carbonatos con manganeso se presentan en zonas ricas en bornita. Ocurrencias puntuales de baritina y sílice se presentan en las zonas de carbonatos, pudiendo estar asociadas a las zonas de mineralización (Hayes et al, 2015).

Se pueden identificar extensas zonas de carbonatos principalmente férricos y mangániferos en las zonas mineralizadas de depósitos del tipo estratoligado, los cuales se extienden desde las zonas mineralizadas hacia la periferia. Algunos de estos carbonatos formados en los márgenes intermedios de una zona de mezcla y reacción entre salmueras metalíferas y reservorios de gas natural (Hayes et al, 2012), y es probable que marque los lugares de reacción redox entre SO_4^{2-} de las salmueras que transportaban metales y carbón en los reservorios de metano (CH_4) (Hayes et al, 2015).

Tal reacción puede ser expresada como:



La reacción del complejo clorurado con sulfato produce calcosina, el ion sulfato es comúnmente abundante en salmueras derivadas de evaporitas y que podrían acompañar soluciones oxidantes ricas en Cu, cuando estas salmueras se mezclan con fluidos reductores, tiene lugar la ecuación; la acción de bacterias reductoras es necesaria para llevar a cabo esta reacción a temperaturas cercanas a superficie (Cox et al, 2003).

Debe haber condiciones favorables para la mezcla de estos fluidos. Haynes (1986) concluye que la mayoría de menas sulfuradas precipitan a 50 cm de la interface agua – sedimento, esto porque la reducción bacterial debajo de esta profundidad es inhibida. Los fallamientos y plegamientos pueden proveer cambios hidráulicos, ocasionando que un fluido invada el espacio de otro (Cox et al, 2003).

Estudios isotópicos de carbonatos asociados a menas de depósitos estratoligados del subtipo facie – reductor (RF) y areniscas (RV) incluyen valores bajos de $\delta^{13}C$. El valor bajo de $\delta^{13}C$ de los carbonatos, refleja oxidación de materia orgánica sólida o petróleo que proveyó C para la depositación de carbonatos (Hayes et al, 2015).

En el yacimiento de Cu-Ag de Mantos Blancos en el norte de Chile, se presentan como alteraciones minerales de albita, clorita, hematita, cuarzo, calcita, epidota esfena, escapolita, anatasa y sericita (menor cantidad), los que están asociados a mineralización, donde se preservan las texturas primarias de la roca (Losert, 1973; Chaves, 1984, 1985; Palacios, 1986, 1987; Maksaev & Zentilli, 2002). Esta alteración parece estar sobreimpuesta a la alteración regional metamórfica de bajo grado de la secuencia volcánica, caracterizada por el ensamblaje clorita –

calcita – epidota – zeolita – prenhita – pumpellita. La alteración hidrotermal es particularmente pervasiva en Mantos Blancos, donde litogeoquímica muestra significativo metasomatismo de la roca en adición de Na, Fe y Mg (Chavez, 1985; Makshev & Zentilli, 2002).

Efectos de metasomatismo se aprecian en rocas caja y mineralizadas, pudiendo generar un efecto de mineralización en los sistemas del tipo estratoligado. Depósitos como el de Konkola en Zambia, y del oeste del Cinturón cuprífero de Montana en USA; muestran enriquecimiento de potasio (K) acompañando la depositación de Cu. Ambos depósitos también registran enriquecimiento de bario (Ba), así como enriquecimiento y lixiviación extrema de calcio (Ca). La Ag y Co son subproductos de las zonas ricas en Cu. La presencia de Ag esta totalmente confinada a las zonas de calcosina – bornita; extendiéndose el Co hacia las zonas piritosas (Hayes et al, 2015).

2.2.2.6. Zonamiento Mineral

Típicamente ocurren calcosina, bornita, calcopirita y pirita en los flujos volcánicos de composición máfica a félsica, tufos, brechas y rocas clásticas sedimentarias, a manera de disseminación, venillas y relleno de amígdalas, fracturas y brechas. Se presenta un patrón de zonamiento concéntrico de calcosina – bornita, luego hacia los bordes calcopirita y un halo externo de pirita (Figura N°11). Los minerales de plata no son obvios. Los depósitos son tabulares en su mayoría, las zonas estratoligadas tienen potencias de centimétricas hasta decena de metros y poseen un control estratigráfico y estructural (Lefebure & Ray, 1998)

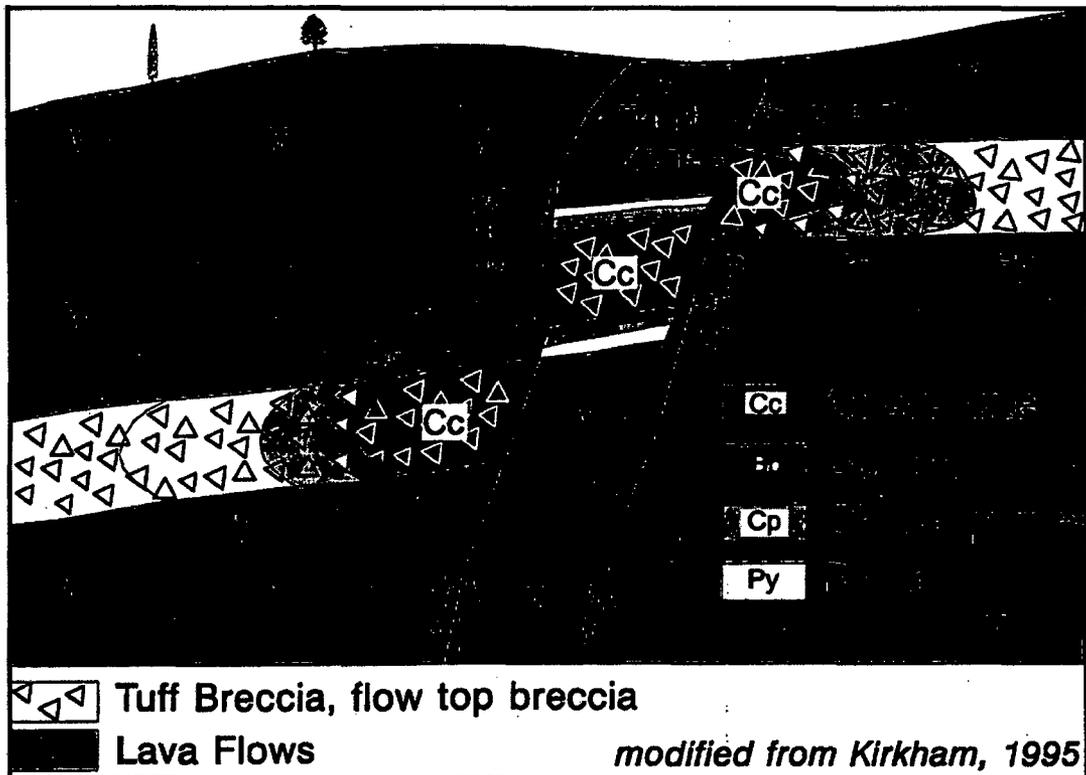


Figura N°11 – Diagrama esquemático del zonamiento de mineral en conjunto con controles litológicos y estructurales en Yacimientos Estratoligados de Cobre, (Kirkham, 1995; Lefebure & Ray, 1998).

Estudios de paragénesis en el estratoligado Cu-Ag de Mantos Blancos muestran que pirita – calcopirita – bornita y en menor cantidad specularita fueron depositados primero, posteriormente calcosina – covelina – digenita hipógena (Figura N°12). Esta secuencia indica un gradual incremento en la porción de Cu en los sulfuros, probablemente decrecimiento con el tiempo de la actividad del S en los fluidos mineralizantes (Losert, 1974; Chavez, 1985; Wolf et al, 1990; Trista 2001). La secuencia paragenética está caracterizada por el reemplazamiento sucesivo de sulfuros hipógenos ricos en Fe (pirita, calcopirita) por sulfuros ricos en cobre (bornita, covelina, calcosina, digenita) lo cual contó con la liberación del Fe y formación de hematita hipógena asociada con sulfuros de Cu (Chavez, 1984; MaksaeV & Zentilli, 2002).

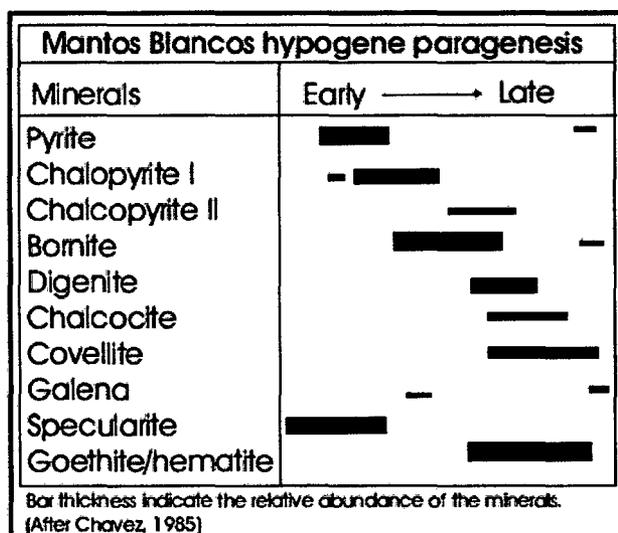


Figura N°12 – Secuencia paragenética de minerales hipógenos en Mantos Blancos – yacimiento estratoligado alojado en rocas volcánicas Cu-Ag – Chavez (1985) (Maksaev & Zentilli, 2002).

2.2.2.7. Zona de óxidos de cobre

Los principales óxidos de Cu están representados por malaquita, crisocola, cuprita, cobre nativo, tenorita y copper wad. Los que se encuentran principalmente emplazados en fracturas y en relleno de cavidades. Por encima del nivel freático aparecen malaquita, azurita y crisocola; entre la zona de óxidos y calcosina hipógena se tiene cobre nativo y cuprita en una zona muy delgada. Zonas de enriquecimiento de calcosina por debajo de los niveles freáticos no ha sido identificadas (Figura N°13) (Woodward et al, 1974; Cox et al 2003).

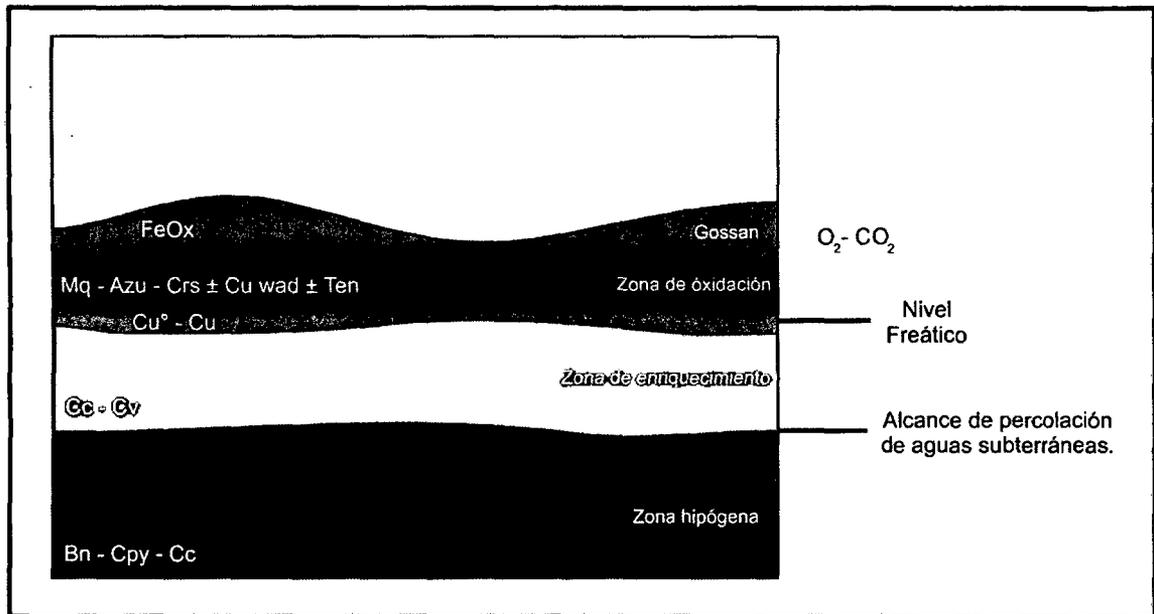


Figura N°13 – Perfil esquemático idealizado sin escalas del desarrollo de las zonas de oxidación en un yacimiento estratoligado; Azu = azurita, Bo = bornita, Cp = calcopirita, Cc = calcosina, Cv = covelina, Crs = crisocola, Cu° = cobre nativo, Cu = cuprita, Cu wad= cobre wad, FeOx = óxidos de hierro, Ten = tenorita. (Tomado y Modificado de MaksaeV, 2001).

Dos principales tipos de minerales ganga se encuentran en la zona de óxidos de cobre; el primero caolinita, la que se encuentra presente en las zonas de enriquecimiento supérgeno de calcosina. Carbonatos con contenidos de Cu y Co se desarrollan en la zona secundaria, frecuentemente acompañados por calcita. En los poros intergranulares se puede encontrar Fe y Mn a manera de goethita y pirolusita respectivamente (Hayes et al, 2015).

Dentro de la zona de óxidos de cobre, los aniones disponibles de las rocas caja proveen un control importante en la formación de minerales de óxidos. El óxido predominante es malaquita, sin embargo la mayoría de malaquita por lo general es finamente diseminada, y en menor medida masiva y botroidal relleno de espacios abiertos en la roca. En las zonas más silíceas se encuentra abundante crisocola intercalada con calcedonia, y en menor medida plancheita, dioptasa y shatuquita. La presencia de silicatos es más común en rocas huéspedes detríticas (areniscas principalmente) (Notebaart & Vink, 1972, Hayes et al, 2015). El desarrollo de zonas de fosfatos de cobre está vinculado a los

estratoligados de Cu – Co, como los del Cinturón Africano (Hayes et al, 2015).

La diferenciación de las zonas de enriquecimiento de las zonas de calcosina hipógena, está marcada por la presencia de cobre nativo ó covelina supérgena. La presencia de caolinita claramente es un indicador del proceso supérgeno, el blanqueamiento a escala de limo o arcillas de los ensamblajes de ganga indican algún cambio mineralógico, el cual podría incluir oxidación y lixiviación de materia orgánica y cambios en el ensamblaje de los filosilicatos (Hayes et al, 2015).

La presencia de calcosina está generalmente asociada a materia orgánica, derivada de un proceso singenético de bajo grado (un pequeño porcentaje de calcosina remplace a materia orgánica). La presencia de cobre nativo está vinculado al resultado de disolución de Cu en aguas subterráneas. Este cobre llega a precipitar por acción de materia orgánica (y con ayuda de bacterias reductoras) o por minerales de hierro (Tourtelot & Vine, 1976).

2.2.2.8. Yacimientos Conocidos

En la II Región de Chile existen muchos yacimientos estratoligados en rocas del Jurásico (p. ej. Buena Esperanza, Tocopilla), pero más al sur entre la III Región y la Región Metropolitana los yacimientos estratoligados de cobre están alojados en rocas del Cretácico inferior. La mayor parte de ellos se presentan en rocas volcánicas: lavas o brechas de andesita, basalto, riolita, dacita, traquita. Las rocas mineralizadas constituyen cuerpos irregulares o estratiformes principalmente en la porción superior de coladas, rellenando vesículas o pequeñas fracturas, matriz de brechas piroclásticas o niveles brechosos de coladas, pero también como disseminación fina a media en la masa fundamental de rocas volcánicas; parte de la mineralización se emplaza en estructuras. Los depósitos mayores son irregulares y corresponden a El Soldado,

Cerro Negro, Talcuna, Catemú, Lo Aguirre entre otros en la zona central de Chile (Maksaev & Zentilli, 2002) (Figura N°14).

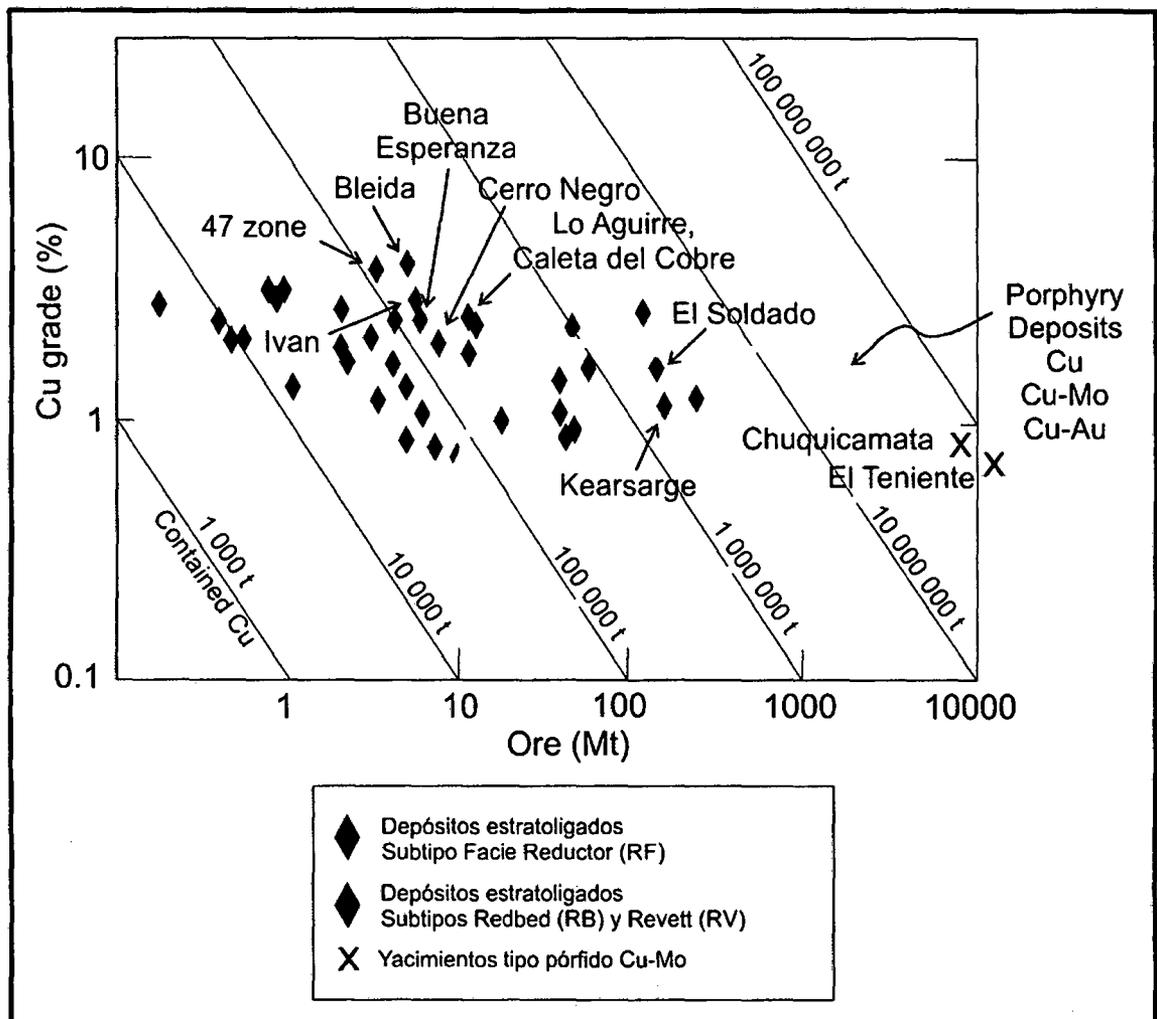


Figura N°14 – Leyes y tonelajes característicos de depósitos estratoligados de Cu diferenciados por subtipos, en color amarillo zona donde usualmente se concentran los depósitos tipo pórfido en función de tonelaje y Ley; como se observa en la figura los estratoligados tienen menor tonelaje pero más alta ley que los pórfidos cupríferos, y por lo tanto contienen la misma cantidad de cobre que muchos de ellos en el mundo; la excepción son los súper-gigantes pórfidos como Chuquicamata, El Teniente y Los Bronces, etc. (Lefebvre & Ray, 1998).

2.2.2.8.1. El Soldado

Es un yacimiento en explotación localizado a 100 km al norte de Santiago y a solo 20Km al Oeste de Cerro Negro (Figura N°02); la mineralización está diseminada y en venillas o microvenillas dentro de andesitas, traquitas y tobas constituyendo numerosos cuerpos irregulares separados dentro de un área de 1800 m de largo en sentido N-S y 700 m de ancho; los cuerpos de mena individuales son de 100-450 m de

largo, 30-150 m de ancho y 80-250 m de alto. Existe control estructural de los cuerpos de mena y ellos se orientan paralelos a los sistemas de fallas N-S y NE. Los sulfuros hipógenos corresponden a calcopirita (60% del total de sulfuros), bornita (25%), pirita (10%), calcosina (5%); la ganga es de calcita, hematita, clorita, epidota, albita, feldespato potásico. Existe una zonación de sulfuros hipógenos con núcleos de bornita – calcosina – hematita rodeados por zonas de calcopirita, calcopirita – pirita y halos con pirita externos a los cuerpos de mena. La alteración hidrotermal asociada a la mena incluye carbonatación, cloritización, silicificación y albitización (Figura N°15) (Boric et al, 2002).

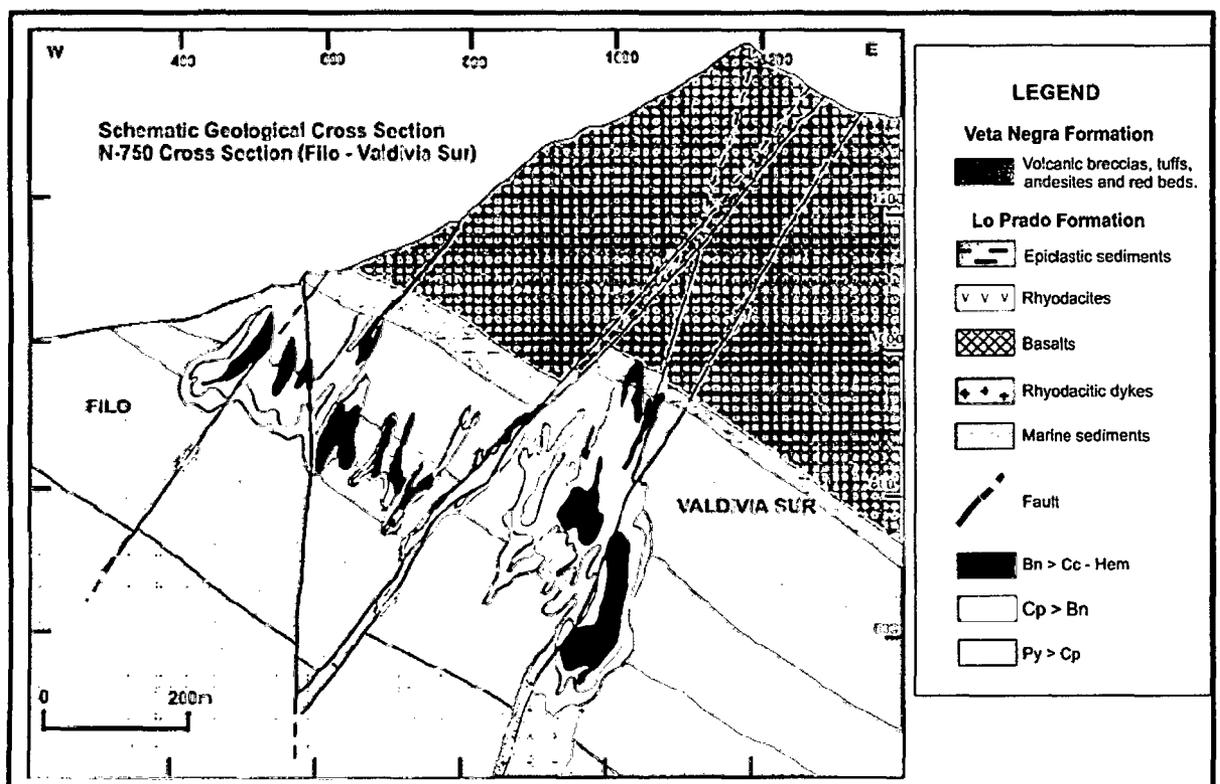


Figura N°15 – Corte esquemático, muestra el fuerte control estructural del yacimiento estratoligado El Soldado, alojado en el miembro superior de la formación Lo Prado (Boric et al, 2002).

Bitumen sólido (variación de petróleo) está asociado a menas cupríferas en el sur del yacimiento El Soldado. Las texturas indican que el petróleo ocupó la porosidad de la roca huésped antes de la mineralización de Cu. Datos isotópicos de C y O en

carbón y carbonatos confirma la asociación de carbón orgánico y sugiere que las gangas carbonatadas son en parte el resultado de la oxidación de hidrocarburos (Zentilli et al, 1997).

La edad de la mineralización de El Soldado sería Albiano (edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 110 ± 2 , 103 ± 2 , 101 ± 1 Ma). Esta edad coincide con las edades radiométricas y con la asignada al metamorfismo regional (prehnita - pumpellita; 105-101 Ma) (Maksaev & Zentilli, 2002), aparentemente más antigua que muchos de los intrusivos existentes en la región. El plutón de Caleu, al sur de Cerro Negro tiene una edad de 96 Ma (Gana & Zentilli, 2000; Wilson et al, 2003).

2.2.2.8.2. Cerro Negro

El yacimiento Cerro Negro ha sido explotado a pequeña escala desde el año 1860, centrándose las primeras actividades en el sector Pirquitas lo que se mantuvo en general hasta el año 1944. A partir de esa fecha han sido explotados secuencialmente bloques de mineral separados por fallas, en 5 sectores (Pirquitas, Valparaíso, Bermudas, Diablo Norte, Diablo Sur). La mineralización se encuentra mayoritariamente emplazada en la Brecha Diablo, definida como una toba de lapilli polimíctica, con fragmentos de andesitas porfíricas rojas, que posee una clasificación regular a buena y está cementada por carbonatos y también por sulfuros de Cu. Se supone que para esta toba un ambiente de depositación subacuático, su potencia alcanza los 80 a 90m. (Injoque, 1993).

El cuerpo mineralizado alojado en la Brecha Diablo ha sido cortado por fallamiento normal posterior a la mineralización (Figura N°16), definiendo 5 bloques principales, los cuales han sido trabajados en diferentes minas, estas de norte a sur son: Pirquitas, Valparaíso, Bermudas, Diablo Norte, Diablo Sur; en

planta, la mineralización tiene una forma ascendente con un eje alargado de 2200m, orientado hacia el NNE a lo largo y paralelo a la parte más gruesa de la Brecha Diablo; su anchura oscila entre 100 y 600 metros y el grosor de 2 a 55m. Aunque la mineralización está claramente presente en un único cuerpo continuo, puede diferenciarse 3 unidades diferentes (Elgueta et al, 1990):

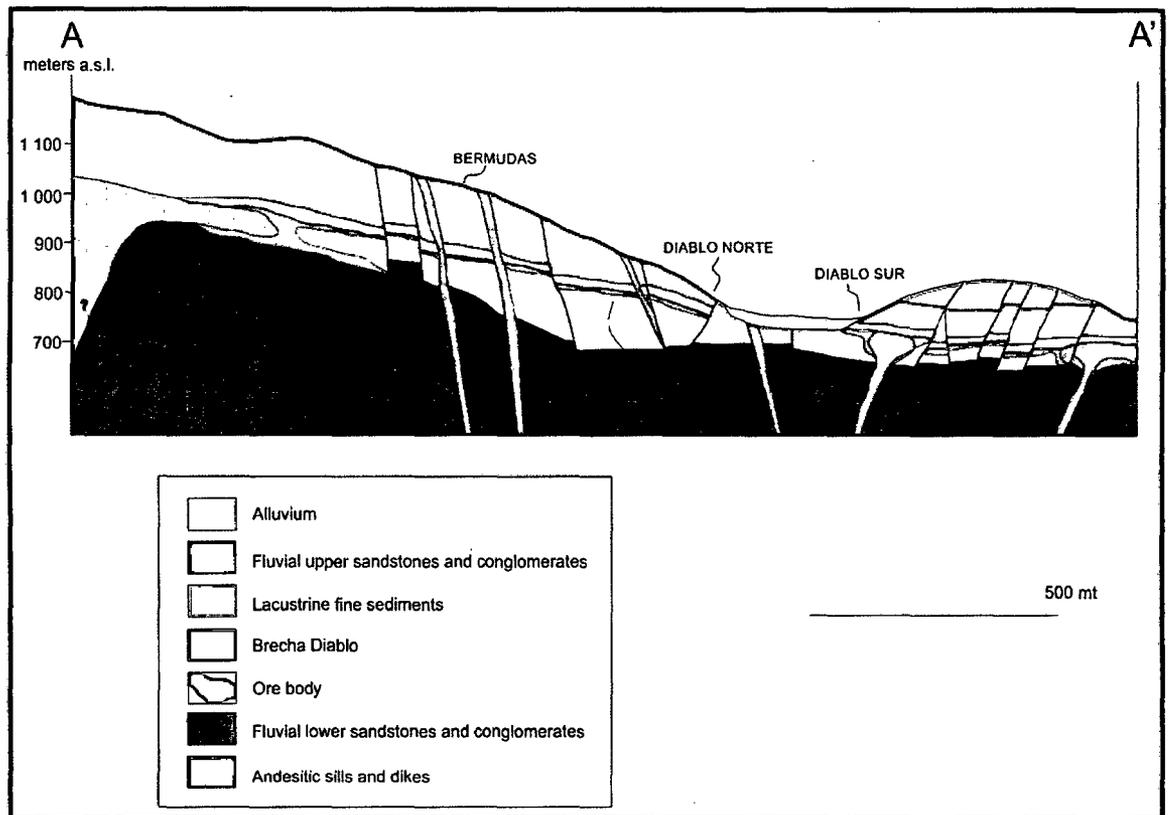


Figura N°16 – Sección idealizada del yacimiento Cerro Negro; las estructuras desplazan los cuerpos mineralizados que se diferencian en Borde de Sill, Manto Inferior y Manto Superior; la mineralización se aloja exclusivamente en la Brecha Diablo (Elgueta et al, 1990)

a) El “manto superior”. La parte superior del cuerpo mineralizado es un horizonte estrictamente estratiforme de 2 – 3 m, la cual sigue un contacto concordante entre la Brecha Diablo huésped de la mineralización y capas de Lutita suprayacente, cubriendo un área de 750X500m (Elgueta et al, 1990); esta lutita carbonosa se interpreta como un sello impermeable que permitió la acumulación de

petróleo y gas natural a la vez que una posible fuente de hidrocarburos.

- b) “Borde” de sill Andesítico. Este cuerpo irregular rodea el borde exterior del sill andesítico como una cáscara o corteza dentro de la brecha Diablo. Tiene una geometría y espesor variable con un desarrollo vertical máximo de 55m. La parte superior de este cuerpo gradúa hacia el “manto superior”, mientras su base es transicional al “manto inferior”. En la zona de contacto con el cuerpo mineralizado el sill muestra una textura vesicular y porfírica fina con menor cantidad de hematita, bornita, calcopirita y calcosina (Elgueta et al, 1990).
- c) El “manto inferior”. Esta parte del cuerpo mineralizado se extiende más o menos estratiforme hacia el SE, a lo largo de la zona de contacto con la Brecha Diablo con las areniscas infrayacentes. Tiene una anchura máxima de 100m y un espesor variable en promedio de 20m, ocurre en las areniscas inferiores 40m por debajo del cuerpo mineralizado principal (Elgueta et al, 1990).

La mineralización de sulfuros generalmente ocurre de manera uniforme, extremadamente diseminaciones de grano fino (0.07 – 1.1mm), preferentemente concentraciones en la matriz de cemento de los tufos de lapilli y en menor cantidad en los clastos. Microvenillas discontinuas e irregulares representan un 5% del total de la mineralización de sulfuros. La mineralización primaria consiste de los siguientes especímenes, en orden aproximado de abundancia: calcopirita, pirita, bornita, calcosina, magnetita, hematita, galena y esfalerita (Elgueta et al, 1990).

La zonación vertical es característica en el cuerpo mineralizado de manto superior:

Una zona superior de Calcosina – bornita con presencia significativa de galena, esfalerita y valores elevados de plata, está en contacto y restringidas al contacto infrayacente de la arenisca superior; esto da lugar progresivamente al descenso de las zonas de bornita – calcopirita y calcopirita, con incremento de pirita, formando una zona dominante de pirita a la base. El cuerpo mineralizado envolvente al sill andesítico muestra una zonación externa similar al patrón de encima, aunque la zona de bornita – calcosina contiene altas leyes (por encima de 5% Cu, 0.5% Pb, 1% Zn, y 50g/t Ag); la mayor parte del cuerpo mineralizado está formado por la zona de bornita – calcopirita a pirita (Elgueta et al, 1990).

La alteración distintiva asociada con el cuerpo mineralizado es silicificación local de las limolitas-lutitas superiores, aunque volumétricamente este es un fenómeno menor. Consiste en cuarzo criptocristalino y vetillas cortantes de calcita con escasa arcilla. Silicificación débil pervasiva también está presente en el cuerpo mineralizado de la Brecha Diablo. Las plagioclasas del sill muestran moderada a fuerte albitización. Esta es otra característica, la alteración en la zona mineralizada es similar a la alteración propilítica regional, aunque es posible que la cloritización y la carbonatación sean más intensas, y este ausente prehnita – pumpellita, en la zona de mineralización. Olcay (1979) establece que el grado de alteración es variable y que los cambios rápidos a lo largo de la litología y zonamiento están en asociación con la mineralización (Elgueta et al, 1990).

2.2.3. Teorías existentes relativas al Problema de Investigación

2.2.3.1. Origen singenético de los mantos

Ruiz et al (1965) suponían que las menas de los estratoligados se habrían formado simultáneamente con las rocas volcánicas de caja (hipótesis singenética), explicando que las andesitas del Jurásico y Cretácico son relativamente muy ricas en cobre. Esta hipótesis se desacreditó al avanzar estudios de detalle de muchos estratoligados. Se ha establecido claramente que la mayoría de los yacimientos que son el foco de este estudio son en general epigenéticos, es decir las menas se formaron más tarde que las rocas de caja.

2.2.3.2. Origen epigenético de los mantos

Tradicionalmente se explica que los yacimientos estratoligados se formaron más tarde que las rocas de caja, con aporte de metales provenientes de rocas intrusivas a profundidad, ya sea batolitos, pórfidos sub-volcánicos como pórfidos, o diques y filones. Por ejemplo Klohn et al. (1990) interpretaron la mineralización en El Soldado como proveniente de intrusiones alcalinas. La mayoría de los informes sobre Cerro Negro suponen una fuente ígnea en profundidad, aunque en general no se observa. En estudios más recientes se propone que los fluidos mineralizadores y el cobre provienen de fluidos de cuenca, expulsados durante movimientos tectónicos o durante la intrusión de batolitos cercanos o distantes (Munizaga et al, 1994; Wilson & Zentilli 1999).

2.2.3.3. Materia orgánica en la génesis de yacimientos tipo manto

Como se explicó en el acápite 2.2.2.8.1. El Soldado; Zentilli et al (1997) estudian la ocurrencia de materia orgánica (Isótopos de C y O) en el yacimiento El Soldado a 20 Km al oeste de Cerro Negro (Figura N°02), sugiriendo que los fluidos mineralizantes interactuaron con un

pre-existente reservorio de hidrocarburos degradado, que sería el responsable de generar la alteración y ganga carbonata en el yacimiento.

La asociación de Cu con varios tipos de materia orgánica ha sido anotada en muchas ocasiones en los Andes. Flint en 1989 describe la ocurrencia de materia orgánica en muchos depósitos estratoligados volcano-sedimentarios en los Andes y considera un probable rol de reductor. Sulfuros de Cu reemplazan madera fosilizada y piritas framboidales en el proyecto Recreo en el distrito mangánífero de Fragua cerca de Andacollo (Zentilli, 1963) y Bitumen sólido fue descrito por Ulriksen (1970) en la mina Uchumi en la región del Elqui (Zentilli et al, 1997).

Los hidrocarburos físicamente impedidos por el sello de porosidad del metamorfismo de bajo grado, actúan como reductor (efecto carbón activado) en la precipitación de sulfuros de Cu (bornita, calcosina, calcopirita) que rellena espacios entre bitumen, carbonatos, y sulfuros preexistentes (arsenopirita, piritas). Este proceso se realiza luego de enterramiento significativo y fallamiento de los estratos volcánicos, así como ocurrencias de intrusivos sub-volcánicos, después de la migración del petróleo fluido en la porosidad de la roca huésped y durante o después de la solidificación (Zentilli et al, 1997).

En el distrito minero de Talcuna (29°53' S Lat., 70°55' W Long.) localizado a 35km al norte de La Serena en el norte de Chile; la mineralización rellena los poros y vesículas en andesitas (formación Quebrada Marquesa – Cretácico inferior), en menor medida presentándose en venillas en la matriz de la roca, creando bandeamientos “crustiformes” relleno de espacios (fracturas y brechas de falla). El mineral principal es calcopirita, bornita, con calcosina subordinada, esfalerita, galena y piritas; la alteración consiste en calcita, baritina, albita, zeolitas, epidota, prehnita, clorita, sericita y arcilla (Boric, 1985; Zentilli, et al, 1997). Zentilli en 1997, identifica

bitumen en el distrito Talcuna, el cual se presenta a manera de venillas de 1 a 3mm y en los poros de las andesitas, asociado a las menas de sulfuro (Zentilli et al, 1997).

En Mantos de Uchumi, ubicado en el valle del Elqui hacia el este de Talcuna (30°04.8' S Lat, 70°37.4' W Long). Ocurre mineralización del tipo estratoligada de bornita – calcosina en conglomerados arcósicos Cretácicos (Ulriksen, 1970, Zentilli et al, 1997). La roca mineralizada contiene abundante bitumen asociado con los sulfuros de cobre, y ambos ocupan la porosidad intergranular de la roca clástica (Wilson, no publicado, Zentilli et al, 1997). Sugiere que la materia orgánica en Uchumi sirvió como un control para la precipitación de sulfuros de cobre (Zentilli et al, 1997).

2.2.3.3.1. Asociación de metales con materia orgánica

Materia orgánica y sus derivados han sido reconocidos en la formación de una variedad de depósitos diagenéticos y espacialmente conectados con componentes mineralizados en ambientes de alta temperatura. Muchos depósitos están formados en el campo de la generación y migración de hidrocarburos, es razonable pensar que podrían interactuar de alguna o muchas maneras a la formación de sistemas mineralizados. Avances en el entendimiento de la migración de hidrocarburos y fluidos mineralizantes permite una evaluación de la interacción entre ellos (Zentilli et al, 1997).

La oxidación del carbón en un ambiente de diagénesis puede resultar en la fijación de carbonatos en rocas que de otra manera no podrían convertirse potencialmente reactivas a otros fluidos posteriores. Carbonato diagenético impone importantes restricciones en las propiedades físicas

y en la permeabilidad de cualquier roca (Graves & Zentilli, 1990; Zentilli et al, 1997).

La migración de hidrocarburos es un proceso que mueve el carbón reducido y azufre desde una roca fuente anóxica (sin oxígeno), la cual puede tener un poco de carbón reducido luego del proceso. El transporte puede ser de hasta cientos de kilómetros en una extensión lateral, y puede posteriormente usarse por fluidos de cuenca con capacidad de acarrear metales (Revenhurst & Zentilli, 1987). El transporte del carbón (y azufre) también es permitido en estos nuevos lugares para fluidos que acarrean metales de fuentes y edades significativamente diferentes (Zentilli et al, 1997).

Mecánicamente la materia orgánica (ej. hidrocarburos) tienen la habilidad de mantener los poros abiertos y prevenir la cementación (Figura N°17). El entrapamiento de hidrocarburos prepara el reservorio para entrapamiento físico o químico de fluidos con metales (Zentilli et al, 1997).

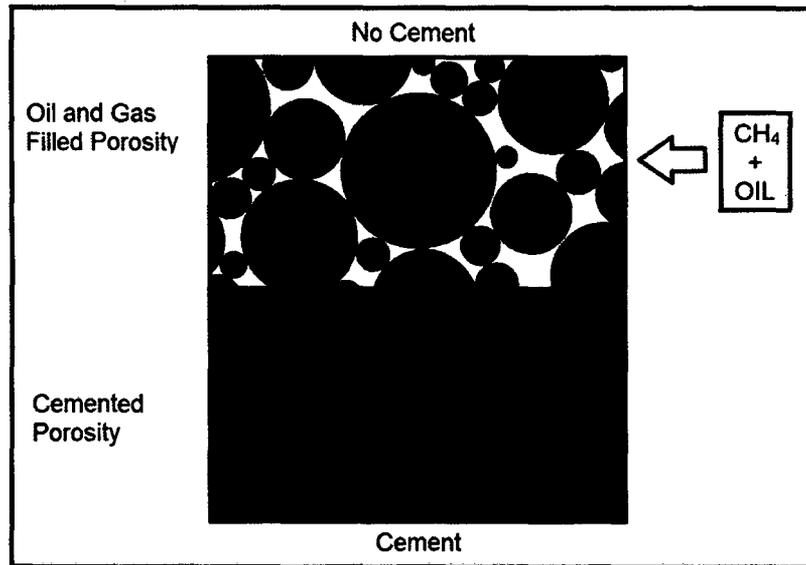


Figura N°17 - La presencia de Gas y Petróleo en lugar del agua en los poros de la roca, puede prevenir la cementación, estos preservan la porosidad que de otra manera serían sellados por cemento mineral (Zentilli et al, 1997)

2.2.3.3.2. Interacción Hidrotermal

Es importante tener en cuenta explorar la posibilidad de interacción de soluciones hidrotermales (de fuentes variables / intrusivo profundo?) con carbón, lutitas negras, petróleo o gas en el proceso de migración o entrapamiento de reservorios de petróleo (Zentilli et al, 1997).

La materia orgánica juega un rol importante en la preservación de la porosidad de la roca para fluidos mineralizantes tardíos o incrementar el comportamiento receptivo (Stokes et al, 1991) (Figura N°18); el azufre no es un elemento menor en los reservorios de hidrocarburos (comúnmente entre 0.1 a 3 wt%) y el gas puede contener más de 50% H₂S por peso (North, 1985; Worden et al, 1995). El petróleo es considerado un importante agente transportador de metales, la disponibilidad de metales en fase acuosa precipitando controlados por pH, así como temperatura, oxidación y descomposición biológica de

complejos metal-orgánicos (Manning, 1986) (Zentilli et al, 1997).

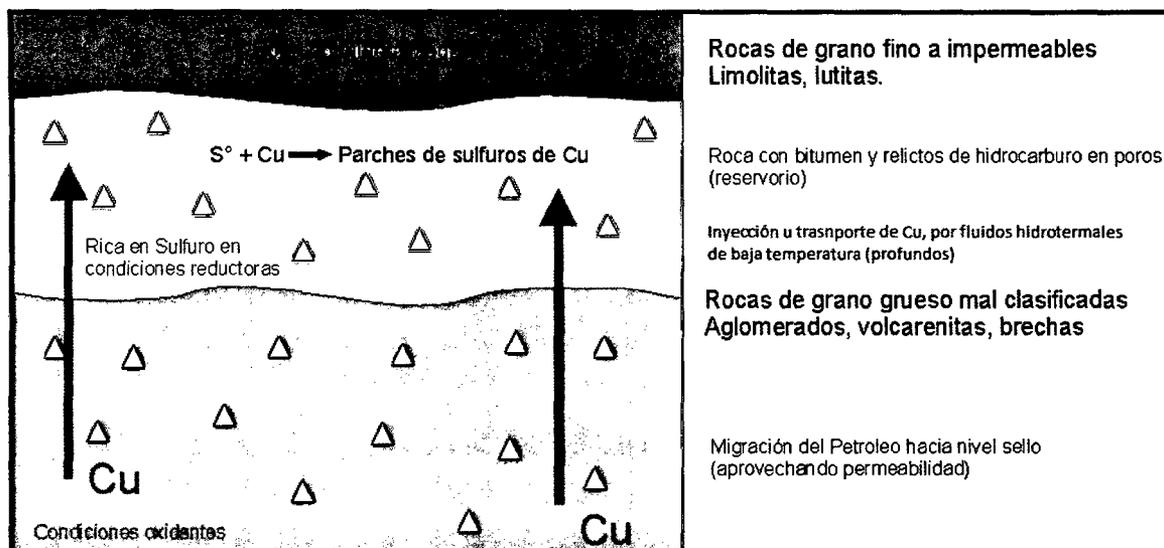


Figura N°18 - Modelo general Depósitos Estratoligados de Cu (Modificado de Alex C. Brown, 1992): A partir de una roca fuente de hidrocarburos (caliza bituminosa), esta migra a niveles más permeables (primario/secundario), el hidrocarburo y bitumen alojado los poros de volcarenitas brechosas a aglomerádicas posteriormente es afectada por inyección de fluidos hidrotermales (profundos?) ricos en Cu (móvil), el cual por reacción química – efecto carbón activado, origina la precipitación de Cu en los poros de la roca (Zentilli et al, 1997).

Las reacciones metamórficas prógradas producen fluidos, los cuales en presencia de carbón y azufre restringido a un estrato; están restringidos en su composición de H₂O, CO₂, CH₄, H₂S, H₂, CO y SO₂ (Ferry & Burt, 1982). A temperaturas por debajo de 500°C, los fluidos y las rocas con contenido de carbón y azufre consisten mayormente en CH₄ (Holloway, 1981); la presencia de materia orgánica afecta la composición química del fluido de los poros, dejando un importante papel al carbón en la génesis de mineralización (Zentilli et al, 1997).

En el depósito de Ni-Cu Voisey Bay en Labrador, Canadá, los sulfuros provenientes del gneiss de Tasiuyak (rico en azufre y carbón) que infrayace el depósito pudo proveer el azufre necesario para saturar los magmas y separar las fases

sulfuradas ricas en Ni-Cu-Co (Ryan et al, 1995). La interacción de magmas con carbón ha sido un factor importante en la génesis de la mayoría de depósitos de estaño y no debería dejarse de lado en los modelos genéticos de algunos depósitos de W, U, Cu, Au y depósitos de Ni y PGE (Zentilli et al, 1997).

2.2.3.4. Ocurrencia de isótopos de S en depósitos tipo manto

Los depósitos volcánico estratoligados (Jurásico Superior a Cretácico Inferior) están caracterizados por valores de -10 a 10% $\delta^{34}\text{S}$ (razón isotópica), sugiriendo una derivación magmática del sulfuro. En los yacimientos volcánico-sedimentarios estratoligados contienen -10 a -40% $\delta^{34}\text{S}$ sugiriendo una reducción por fraccionamiento biogénico o materia orgánica (Munizaga et al, 1994). El amplio rango de valores del azufre isotópico sugiere una fuente poligénica (variada) de azufre para estos depósitos, donde predomina el azufre bacteriogénico (Carrillo Rosua et al, 2014). Sin embargo, baritina presente en los niveles superiores de los cuerpos mineralizados de Cerro Negro con $\delta^{34}\text{S} +10\%$ sugiere una última fuente magmática para el sulfuro de estos sulfatos (Munizaga et al, 1994).

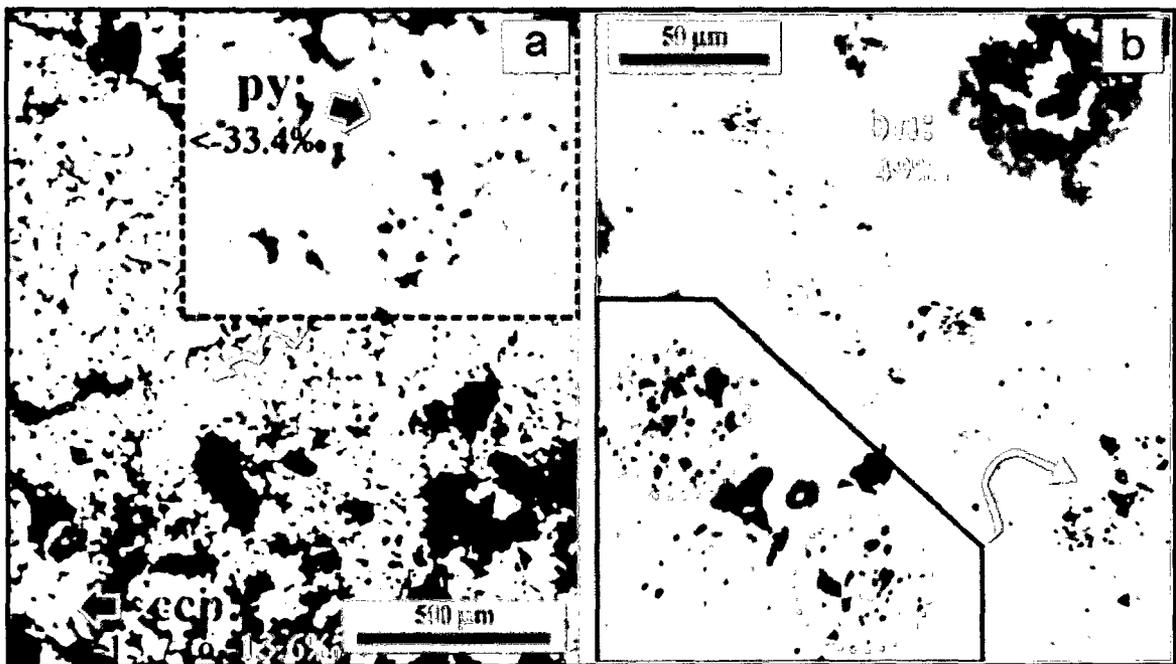
Los Valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenido de calcitas asociadas a mineralización con rangos de -0.1 a 0.2% , también sugiere fuentes de carbón poligénico, con una fuerte involucración de degradación de materia orgánica y lixiviación de calizas (Carillo Rosua et al, 2014).

Carillo Rosua et al (2014) realizan estudios en el área de La Serena y Melipilla – Naltahua (Estratoligados de Cu-Ag, en el centro norte de Chile), proponen un modelo genético de dos etapas, donde involucran hidrocarburo:

- a) Crecimiento de pirita framboidal, con muy bajo $\delta^{34}\text{S}$ formado por reducción de azufre bacterial, en un sistema abierto, y con

degradación diagenética de salmueras relacionadas a petróleo (Carillo Rosua et al, 2014).

- b) Etapa de inyección de Cu, reemplazamiento de pirita framboidal (Microfotografía N°01), inherente consumo del sulfuro como bajo 50.4%, junto con sulfuros directamente precipitados de mezcla de fluidos hidrotermales con $\delta^{34}\text{S}$ cercano a 0%. Para La Serena un simple evento marcado sin generación de pirita framboidal. Aporte de sulfuros de Cu precipitados principalmente en vetas donde Cu/metales base provenientes de fuentes de fluidos hidrotermales mezcladas con H_2S generado por azufre bacterial reductor en la roca huésped (Carillo Rosua et al, 2014).



Microfotografía N°01 – Microfotografías de muestras del sector La Serena – Melipilla – Naltahua. a) Calcopirita masiva (ccp) cementando con pirita framboidal (py). b) Bornita (bn) reemplazando pirita framboidal. Los datos de $\delta^{34}\text{S}$ fueron tomados *in situ* por análisis de láser de combustión (Carrillo Rosua et al, 2014).

La génesis de los depósitos estratoligados Cu-Ag del Cretácico inferior, está vinculado a eventos metalogénicos importantes, con el desarrollo de numerosos depósitos de pequeño a mediano tamaño en

un intervalo de corto de tiempo y la conjunción de otros factores en la cordillera de la costa de Chile (Carrillo Rosua et al, 2014):

- a) Relleno de una cuenca marina – lacustre somera, con formación de sedimentos ricos en materia orgánicas en un ambiente probablemente euxínico. Estos sedimentos constituyeron una fuente de petróleo. El petróleo subsecuentemente está involucrado en la formación de azufre, como nutriente clave para las bacterias que reducen sulfatos. Este azufre bacteriogénico está directamente incorporado en los minerales de mena (caso La Serena), o indirectamente en dos estadios con procesos de reemplazamiento (caso Melipilla – Naltahua). Los depósitos estratoligados de Cu-Ag del Jurásico, y quizás algunos del Cretácico inferior (por ejemplo Lo Aguirre, Saric et al, 2003) la ausencia de este factor indicaría un predominio de la actividad magmática (ó hidrotermal?) (Carrillo Rosua et al, 2014).
- b) Contexto geotectónico extensional, combinado con la intensa actividad magmática, con la formación de una potente pila estratigráfica (varios Km) disponibles para la lixiviación de Cu (también Ag y otros metales base) y también para crear una importante fuente de evaporitas continentales (Carrillo Rosua et al, 2014).
- c) Diagénesis a metamorfismo de muy bajo a grado coexistiendo con la actividad intrusiva que proveyó el gradiente geotérmico y la actividad tectónica favorable para el desarrollo de actividad hidrotermal (Carrillo Rosua et al, 2014).

La coincidencia de estos factores genera una importante provincia metalogénica del Cretácico inferior con depósitos de Cu caracterizados no solo por el alto rango de $\delta^{34}\text{S}$, pero también por el bajo valor de $\delta^{34}\text{S}$ encontrado en minerales hipógenos (Carrillo Rosua et al, 2014).

2.2.3.5. Mineralización relacionada a intrusivos

Data radiogénica y los rasgos metalogénicos del yacimiento El Soldado muestran fuertemente que en este depósito la mineralización del cobre es genéticamente distal, relacionada a fluidos hidrotermales desencadenados por el emplazamiento de batolitos y es concordante en edad con la formación de Skarn de Cu en aureolas de contacto de las mismas intrusiones (Distrito Cabildo). Fluidos mineralizantes pudieron haber sido una mezcla de aguas magmáticas, connatas y meteóricas, termalmente movilizadas por las masas ígneas del Aptiano – Albiano que se emplazaron dentro de la secuencia Cretácica Inferior a lo largo de fallas sinestrales transtensionales (Maksaev & Zentilli, 2002).

2.2.3.6. Mineralización asociada a procesos metamórficos de bajo grado

El término fluido metamórfico es usado en el estricto sentido de fluidos durante metamorfismo prógrado. Típicamente incluye un componente pre-metamórfico de formación de aguas como fluidos provenientes por escape de minerales y volátiles, todas modificadas por interacciones con la roca huésped (Yardley & Cleverley, 2013).

Recientemente se reconoció que fluidos de la corteza pueden acarrear elementos solubles con potencial de elementos metálicos en solución (Yardley & Bottrell, 1992, Heinrich et al, 1992, Campbel et al 1995, Dudetat et al 2000, Yardley 2005, Heijlen et al 2008, Newton & Maning 2008), esta consideración no es dominante para muchos metales, debido a que algunos son siempre relativamente insolubles (Yardley & Cleverley, 2013).

Rocas metamórficas en corredores orógenos evolucionan de sedimentos relativamente porosos, con alto contenido de agua. Una vez que recrystalizan a una roca metamórfica de baja porosidad,

pueden acomodar significativamente solo los niveles de fluidos si están fracturados o como resultado de reacciones metamórficas específicas que generan la porosidad secundaria. Tales reacciones son conocidas por cierto tipo de rocas, pero no son extensivas y el incremento de porosidad es muy transitorio. Aunque, lejos de las fuentes de fluido metamórfico las rocas tienen el potencial de actuar como drenajes, absorbiendo agua y otras especies de fluidos en una reacción retrógrada hasta enfriarse (Yardley & Cleverly, 2013).

En las rocas metamórficas de bajo grado, indistintamente de la temperatura, el enfriamiento está generalmente acompañado disminución en la presión de fluidos, por debajo de la presión litostática. Esto efectivamente consume todo el fluido del espacio del poro, pudiendo favorecer la infiltración de otro fluido o por otra parte mezclarse y reaccionar para formar ensamblajes retrógrados (Yardley & Cleverly, 2013).

Algunos gases son menos solubles en fluidos ricos en clorita que en agua pura (efecto “salting-out”), y como resultado genera ligandos como bicarbonato y bisulfuro, cuales concentraciones están relacionadas a la solubilidad de CO_2 y H_2S respectivamente, en términos de fluidos de baja salinidad. La dilución de fluidos ricos en gas tienen el potencial de generar aluminosilicatos y minerales carbonatos, pero relativamente poca capacidad para intercambiar metales comunes con la roca caja y esto provee un mecanismo para generar yacimientos con pequeñas cantidades de metales base (Yardley & Cleverly, 2013).

Relaciones texturales en los yacimientos estratoligados de Melipilla y Talcuna muestra relación entre minerales de metamorfismo de bajo grado y presencia de sulfuros de cobre (Microfotografía N°02). Valores de presión de 2 – 3 Kbar y temperaturas de 200 – 280°C puede ser propuesta para metamorfismo de bajo grado. Morata et al (2003) describe metamorfismo de bajo grado en rocas volcánicas del

Cretácico Inferior en el área de La Serena, encontrando condiciones de baja presión y temperatura cercanas a 250°C; este metamorfismo transforma cristales de plagioclasa primaria a albita y sericita y neofoma prenhita, pumpellita, clorita y epidota en la mayoría de espacios abiertos de la matriz de la roca volcánica (Morales et al, 2005).

Las relaciones petrográficas muestran la típica formación de calcosilicatos formados durante metamorfismo, como prenhita y pumpellita es paragenética con minerales de Cu. Las fases que traen Cu pueden ser consideradas como otros minerales metamórficos (ensamblaje mineral), trayendo el Cu original una probable relación con movilización de la roca huésped. Sin embargo, eventos hidrotermales locales (probablemente relacionados a intrusiones granitoides) es necesaria para la concentración de mineral para producir un yacimiento (Morales et al, 2005).



Microfotografía N°02 – Microfotografías de muestras de los distritos Melipilla – Talcuna (Estratoligados de Cu-Ag). a) Sulfuros intercreciendo con prenhita (prh) y pumpellita (pmp) del depósito Melipilla (Cu-Ag). b) Calcopirita masiva (ccp) con pirita framboidal (py) y galena (gn) del depósito Melipilla (Cu-Ag). c) Inclusión de cobre nativo (cu) en prenhita (prh) en una muestra de roca volcánica con alteración metamórfica de bajo grado del distrito minero de La Serena (Morales et al, 2005).

La evolución de estos fluidos hidrotermales produce la formación de mineralización tipo “hidrotermal” con diferencias texturales con respecto a la mineralización tipo “metamórfica” (Morales et al, 2005).

2.2.3.7. Otras teorías de génesis mineral en yacimientos estratoligados

Es importante considerar que circunstancias especiales podrían producir un depósito económico de cobre en rocas sedimentarias a volcano – sedimentarias. En muchos casos, hay factores implicados en la génesis de un yacimiento que no son completamente entendibles. Es sabido que una sola idea de génesis mineral no puede explicar el origen de todos los yacimientos; porque estos son el resultado de diferentes procesos que actuaron en las rocas sedimentarias y volcánicas durante la historia geológica; y porque muchos de estos procesos son opacados por eventos posteriores y son difíciles de descifrar (Tourtelot & Vine, 1976).

La hipótesis epigenética hidrotermal, estipula que la mineralización está relacionada a un cuerpo ígneo que es la fuente de calor, metales y volátiles que constituyen las alteraciones y mineralización. Los minerales precipitan en vetas, diseminado o reaccionando químicamente con la roca por disminución de la temperatura, presión y pérdida de volátiles. Esta hipótesis hidrotermal – magmática ha servido muy bien para la exploración y descubrimiento de grandes yacimientos y distritos mineros en Norte y Sur América (Sawkins, 1972; Sillitoe, 1972). Sin embargo, estudios hechos por Taylor (1973), muestran que, en gran parte aguas meteóricas están involucradas en el proceso de alteración y mineralización de algunos yacimientos hidrotermales. Muchos depósitos no muestran relación con intrusiones ígneas y/o alteraciones hidrotermales de las rocas que albergan la mineralización (Por ejemplo depósitos tipo Mississippi Valley, SEDEX, entre otros). Por lo que no pueden ser explicados por teorías hidrotermales convencionales (Tourtelot & Vine, 1976).

La hipótesis hidrotermal – epigenética ha tendido a dominar discusiones de la génesis de yacimientos minerales hasta hace poco. Este predominio ocurre cuando, de la hipótesis hidrotermal, Waldemar Lingren (1933), incluyó muchos capítulos en su libro

“Yacimientos minerales” o yacimientos no – hidrotermales, incluyendo el título “Deposits Formed by Concentration of Substances Contained in the Surrounding Rocks by Means of Circulating Waters”, lo que antiguamente llamaban “secreción lateral”, pero el término y concepto fue tan discreto que en la actualidad raramente se usa (Tourtelot & Vine, 1976).

En los años 1950 en la exploración de uranio, mayormente por pequeñas compañías independientes o compañías petroleras, emplearon geólogos de petróleo en la exploración de uranio; estos no están comprometidos con la hipótesis hidrotermal, pero están familiarizados con conceptos de migración de fluidos y diagénesis de rocas sedimentarias. El éxito de la aplicación de conceptos desarrollados por geólogos petroleros en la búsqueda de yacimientos de uranio en rocas sedimentarias, sugiere que los mismos conceptos pueden ser igualmente usados en la búsqueda de otros metales que son móviles bajo condiciones de baja temperatura y presión, incluido el cobre (Tourtelot & Vine, 1976).

2.3. Definiciones

- **Yacimiento Mineral:** Concentración local de una o más sustancias minerales útiles y de rendimiento económico. Incluye por lo tanto a los minerales propiamente dichos como a las sustancias naturales, así como también a los fósiles (carbón, petróleo, etc). (Dávila, 2011).
- **Mineralización:** Proceso mediante el cual los minerales son introducidos en la roca, dando como resultado la formación de yacimientos minerales de rendimiento económico (Dávila, 2011).
- **Depósito estratoligado:** Se denomina depósito estratoligado a un tipo de mineralización en la cual la concentración de mineral está asociada a un determinado horizonte estratigráfico (Dávila, 2011).

- **Deposito estratiforme:** Estilo de mineralización emplazado de manera concordante con la estratificación, no guardando necesariamente relación con algún horizonte estratigráfico específico (Dávila, 2011).
- **Metalogenia:** Término derivado del griego "*metaleion*" que significa "mina", el cual se refiere al estudio de la génesis de depósitos minerales (metálicos o no-metálicos), con énfasis en sus relaciones espaciales y temporales (espacio-tiempo) con los rasgos geológicos regionales (tectónicos, petrográficos, etc). Es decir, el estudio de la relación de los depósitos minerales con su entorno geológico regional (Maksaev, 2002).
- **Singenético:** Se refiere a minerales depositados o formados simultáneamente con el sedimento (Stanton, 1972).
- **Diagenético:** Formación post-depositacional de nuevos minerales por reacciones de equilibrio entre los constituyentes originales de la roca sedimentaria (detríticos y químicos) y fluidos o gases intersticiales desde dentro de la secuencia. Por implicación, los elementos agregan nuevos minerales a la roca al momento de la depositación (Stanton, 1972).
- **Epigenético:** Formación post-depositacional de nuevos minerales, especialmente menas, por reacciones químicas entre los constituyentes originales de la roca sedimentaria y soluciones provenientes de una fuente externa. Históricamente, el término fue utilizado a soluciones hidrotermales de origen magmático, pero ahora el término se ha extendido a aguas subterráneas de origen meteórico, las cuales quizás fueron introducidas a acuíferos antes de los levantamientos y truncamientos tectónicos (Stanton, 1972).
- **Hipógeno:** Describe soluciones ascendentes, generalmente en la forma de exhalaciones volcánicas o aguas hidrotermales. Pueden producir depósitos singenéticos en los pisos marinos o depósitos epigenéticos en rocas preexistentes (Stanton, 1972).
- **Supérgeno:** Describe soluciones descendentes, generalmente aguas meteóricas o sistema de aguas subterráneas. Aplicado frecuentemente a la destrucción oxidante de

cuerpos mineralizados preexistentes y a la formación de zonas de enriquecimiento mineral, puede aplicarse el término a la movilización de menas diseminadas y redepositación de un cuerpo mineralizado (Stanton, 1972).

- **Hidrotermal:** Significa aguas calientes. Pueden ser profundas circulaciones de aguas subterráneas en un área de alta temperatura por gradiente geotérmico o aguas con componentes juveniles provenientes de actividad ígnea (Stanton, 1972).
- **Bitumen:** Término genérico aplicado a las sustancias inflamables, de colores, dureza, y volatibilidad variables. Compuestas esencialmente de hidrocarburos, tales como petróleo, carbón, asfaltos, ceras naturales y asfaltitas (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación Geográfica

El Distrito Minero Cerro Negro se ubica geopolíticamente en los límites de las Comunas de San Felipe - Provincia de Aconcagua y Cabildo - Provincia de Petorca, ambas dispuestas en la Región de Valparaíso – Chile – América del Sur (Figura N°19).

El proyecto Los Mantos se encuentra emplazado en la Cordillera de la Costa Central y al flanco Oeste de la Cordillera de Los Andes, en la franja metalogénica Cretácica del Centro de Chile, formada por los yacimientos estratoligados de Cu-Ag de El Soldado, Cerro Negro, Los Mantos de Catemú, entre otros cuerpos mineralizados menores vetiformes de Cu-Ag±Au; entre las siguientes coordenadas (Tabla N°02):

Tabla N°02 – Coordenadas en DATUM PSAD56 – ZONA 19S del proyecto Los Mantos

		ESTE	NORTE
VÉRTICE	NW	321500	6389500
VÉRTICE	SE	324500	6385000

Abarca un área promedio de 944 Ha y está ubicada a 100 Km al norte de la ciudad de Santiago de Chile y a 37 Km al sureste del pueblo de Cabildo.

3.2. Accesibilidad

El acceso al proyecto es a través de la siguiente ruta (Tabla N°03 – Figura N°20).

Tabla N°03 – Tramos y distancias desde Santiago de Chile hacia proyecto Los Mantos

Ruta	Kilómetros	Tiempo	Tipo de Camino
Santiago de Chile – La Ligua	120	2h 00'	Autopista (ruta 5)
La Ligua – Cabildo – Dv. Guayacán	65	1h 15'	Asfaltado (Ruta E-35)
Dv. Guayacán – Cerro Negro	10	0h 20'	Afirmado (Ruta E-41)
Cerro Negro – Proyecto Los Mantos	15	0h 45'	Trocha (Ruta E-461)
TOTAL	210 Km	4h 20'	

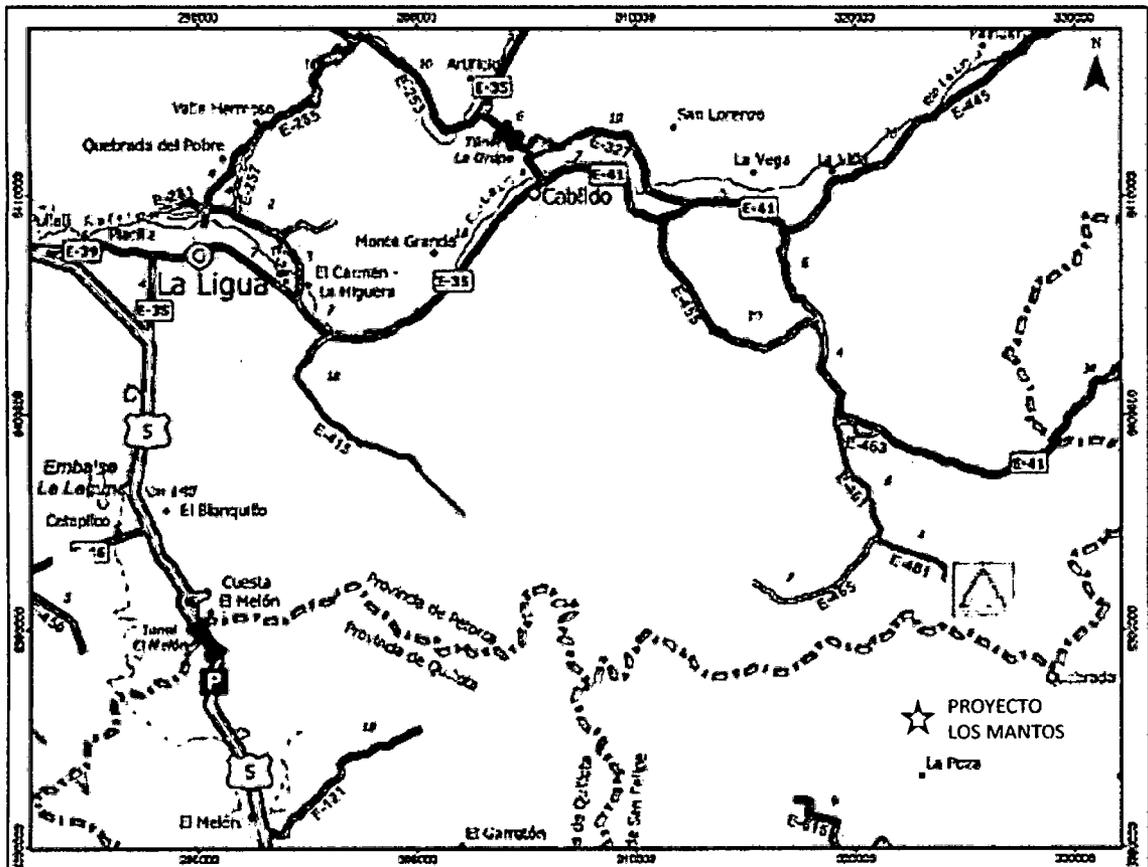


Figura N°20 – Vías de acceso al Distrito Minero Cerro Negro – EIA Cerro Negro, 2012

3.3. Clima y Vegetación

3.3.1. Clima

Según las clasificaciones de la Dirección Meteorológica de Chile, las características de la región de Valparaíso están marcadas por la influencia de un clima seco de estepa que es la continuación del existente en la región Coquimbo (al norte), y tres climas templados que se diferencian entre sí por las características de nubosidad y la duración del periodo seco (EIA – Cerro Negro, 2012).

El clima del área corresponde a un “clima de estepa con gran sequedad atmosférica” (Fuenzalida, 1965). Es en general seco y luminoso con temperaturas agradables durante la mayor parte del año. La temperatura media anual es de alrededor 15°C y varía a 35°C en los meses de verano (Enero a Marzo) y 8°C en los meses de invierno (Junio a Agosto) (EIA – Cerro Negro, 2012).

La humedad relativa tiene un promedio bajo que llega a valores no superiores a 50%. Las lluvias son extremadamente variables y se reducen principalmente a los meses de invierno. En promedio anual de precipitación para el sector es de 311 mm (hasta el año 2005) (EIA – Cerro Negro, 2012).

La aridez del área se debería a que las neblinas provenientes de la costa y que se internan en los valles interiores al atardecer, son bloqueados por el cordón montañoso del Cerro Chache (cadena longitudinal al oriente del poblado de Cabildo), cuya altitud sobrepasa los 2000 msnm, estando de esta manera impedidas de alcanzar valles más alejados como son los de Catemú y Guayacán (Carter y Aliste, 1962).

3.3.2. Vegetación y Fauna

La vegetación está controlada fuertemente por la orientación de las quebradas, de manera que cactus (Cactaceae), espinos (*Crataegus monogyna*) y guayacanes (*Guaiacum officinale*) son predominantes en las laderas más iluminadas y litres (*Lithraea caustica*), peumos (*Cryptocarya alba*), quillayes (*Cryptocarya alba*), colliguayes (*Colliguaja odorífera*) y palquis (*Cestrum parqui*) dominan

principalmente las laderas norte y fondos de quebradas más protegidas de los rayos solares (EIA – Cerro Negro, 2012).

La fauna se reduce a pumas (*Puma concolor*), cóndores (*Vultur gryphus*), zorros (*Vulpes vulpes*), vizcachas (*Lagidium viscacia*), pequeños roedores y animales de pastoreo, principalmente cabras (*Capra aegagrus hircus*). Mención especial merece la presencia de vinchucas (*Triatoma infestans*), especialmente abundantes en los sectores más áridos y cercanos a corrales (EIA – Cerro Negro, 2012).

3.4. Geomorfología

La zona de este estudio se ubica en un sector del país donde no existe el Valle Central. Dentro del esquema morfo-estructural, esta región se sitúa en la Cordillera de la Costa - Cordones Transversales (Figura N°21), conformado por una meseta de morfología madura, con suaves colinas, con altura media de 1300 msnm. En su extremo Norte se encuentran farellones de abrupta pendiente, que descienden hasta 600 msnm a la quebrada Pitipeumo. Al Sur ocurre lo mismo, descendiendo hasta 700 y 400 msnm, al estero Catemú. Hacia el Oeste una pendiente similar, baja al Cajón El Sauce. Al Este se levanta una cadena de cerros, de dirección Norte-Sur, que asciende con fuerte pendiente hasta 2300msnm; Cerro Blanco, La Bandera, Tabaco, Botija y Puerta del Alto. En la llanura los drenajes se desenvuelven en valles poco profundos, distinguiéndose solamente la Quebrada el Durazno, profunda al Sureste del área. La fisiografía y morfología descritas corresponden a terreno formado por rocas estratificadas, con tectónica orogénica, de bloques en escalón, del alzamiento de los Andes (Maksaev & Piraces, 1977).

El proyecto Los Mantos al estar emplazado en la Cordillera de la Costa Central de Chile, comprende las siguientes estructuras geomorfológicas regionales: La Cuenca del Aconcagua y Sistema montañoso semi-árido.

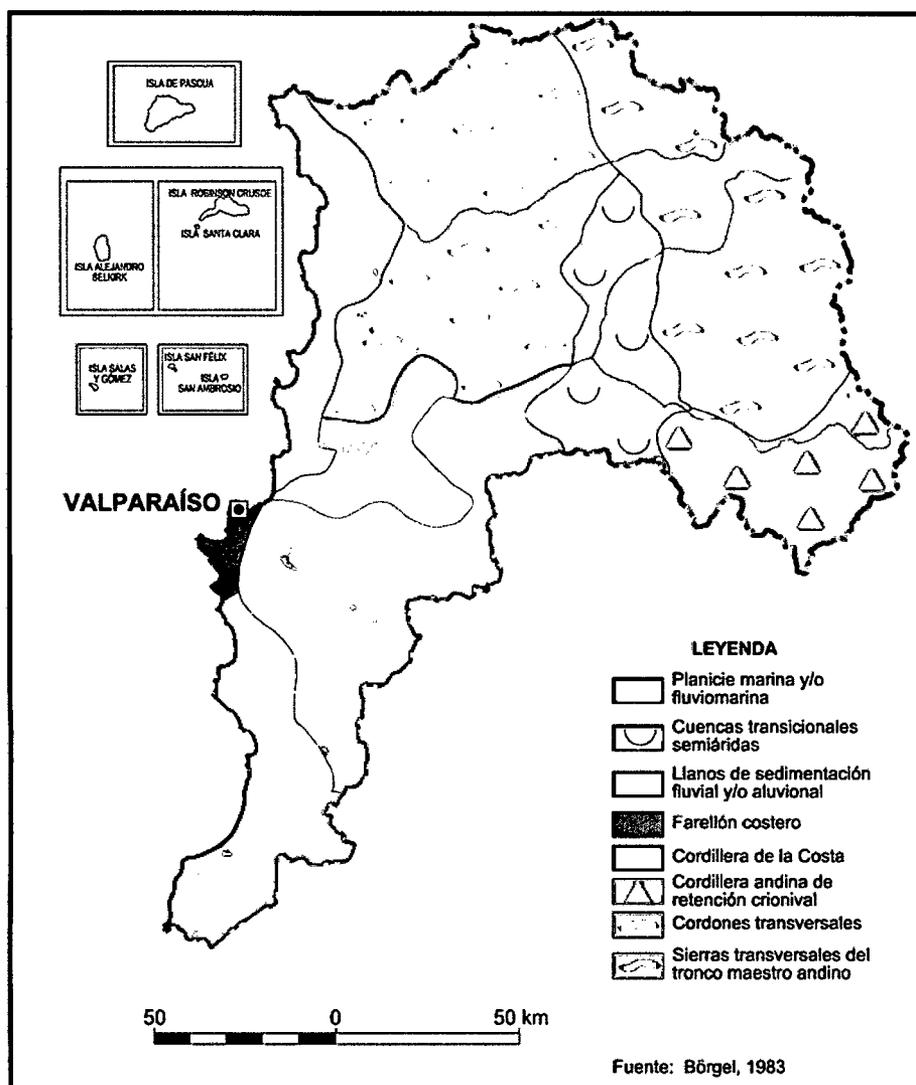


Figura N°21 – Distribución Geomorfológica de la Región de Valparaíso – (IGM Borgel, 1983; EIA Cerro Negro, 2012).

3.4.1. La Cuenca del Aconcagua

Esta zona comprende el valle y la cuenca del río Aconcagua, el más importante de la región y que concentra aproximadamente el 70% de los recursos hídricos de la zona (Fotografía N°01). Los ríos determinan la morfología de la zona. Los cursos de agua, los valles, terrazas, lomas y serranías, son los principales elementos geomorfológicos de la región, y conforman el valle principal, valles laterales, además de cuencas menores y rinconadas. La Cuenca del Valle del Aconcagua corta la región y sus principales unidades morfológicas, atraviesa la Cordillera de la Costa y divide la depresión intermedia dejando la zona desértica al norte.



Fotografía N°01 – Valle del Aconcagua – Estero Catemú, Vista al Sur

3.4.2. *Sistema montañoso Semiárido*

Representa la transición entre el paisaje árido del norte chileno y de clima mediterráneo de Chile central (Fotografía N°02). El relieve de esta zona está conformado por la Cordillera de la Costa y los dos valles transversales de Petorca y La Ligua que la disectan, desde la Cordillera de los Andes hacia la costa. La Cordillera de la Costa alcanza su máxima altura en esta zona, con cerros que sobrepasan los 2.000 m.s.n.m. Las cuencas de los ríos Petorca y La Ligua se caracterizan por su relieve con pendientes muy pronunciadas y marcado encajonamiento en la mayor parte de su extensión. En su desembocadura se forman terrazas litorales y zonas de dunas. Entre el valle de La Ligua y el Aconcagua el relieve se presenta como una cadena de cerros y la Cordillera de la Costa se divide en dos ejes: los Altos de Putaendo y los Altos de Catemú.

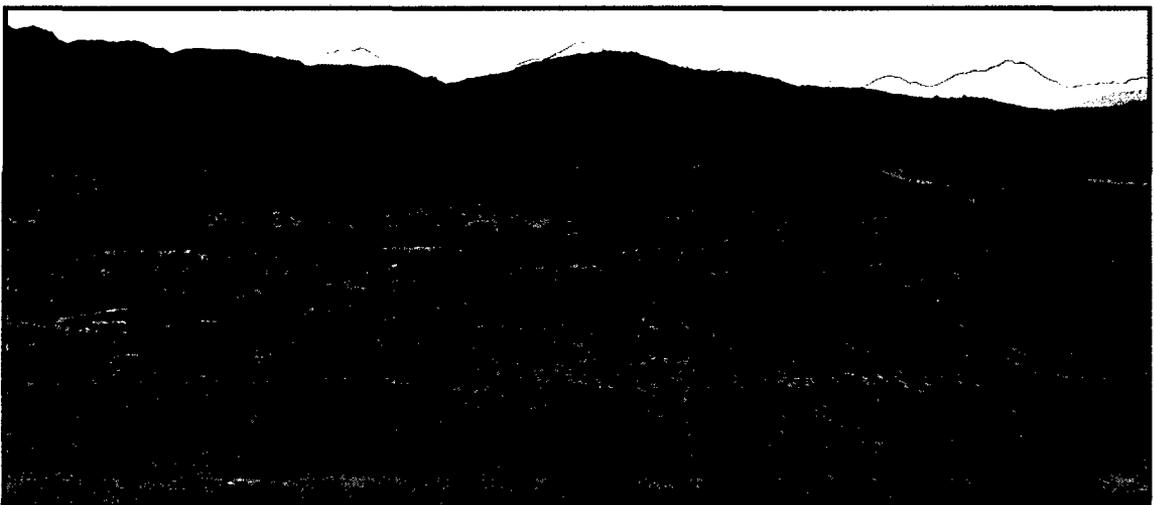


Fotografía N°02 – Cordillera de la Costa (Cerro Tabaco), Vista al Este

Dentro de las estructuras geomorfológicas menores en el sector de Los mantos, se tiene:

- a) **Montañas:** Corresponden a los relieves más resaltantes, conformados por cadenas de cerros, entre los principales se tiene: Tabaco, Portales, Alto de Catemú, Botija y La Teta que se hallan hacia los extremos del Proyecto Los Mantos (Fotografía N°02 y N°04).

- b) **Meseta:** Corresponde a la una meseta madura (sector denominado La Majada), originado por procesos orogénicos del levantamiento y formación de la Cordillera de los andes, esta meseta se encuentra rodeada por colinas y remanentes de quebradas (Fotografía N°03), se encuentra cortada y desplazada por lineamientos, teniendo así una amplia distribución en el sector de estudio.



Fotografía N°03 – Sector La Majada – Proyecto Los Mantos, meseta madura rodeada de colinas, foto con vista al Sur

- c) **Colinas:** Estas geoformas tienen una geometría ovalada con dimensiones de hasta 500m de longitud, presentando pendientes de bajo ángulo (15%-45%) y las elevaciones no superan los 1300m, estas colinas se encuentran en los alrededores de mesetas y en la intercepción de quebradas aluviales. Estas colinas se encuentran cubierta de manera dispersa por espinos en su mayoría (Fotografía N° 04).



Fotografía N°04 – Colinas, poseen poca pendiente y elevación, hacia el fondo Cadena Montañosa Cajón del Sauce, foto vista al oeste.

- d) **Quebradas – Cuencas Menores:** Presentan un patrón dendrítico, principalmente son remanentes de actividad fluvial del sector, se hallan antiguas quebradas, que en la actualidad no presentan carga hídrica (salvo en caso de precipitación – Fotografía N° 05). En lo que fue su cauce se encuentran vegetación como quillayes y litres principalmente.



Fotografía N°05 – Quebradas menores con carga pluvial, vista al oeste

3.5. Geología Regional

La geología en los alrededores del Distrito Minero Cerro Negro consiste de secuencias volcano-sedimentarias Mesozoicas del Cretácico Inferior al Superior, así como de algunas intrusiones locales de composición granodiorítica, monzonítica y andesítica (Maksaev & Piracés, 1977). Estas unidades están dispuestas en franjas de alcance regional y orientación N-S (Injoque, 1993) (Plano N°01).

3.5.1. Formación Lo Prado

La formación Lo Prado fue definida originalmente por Thomas, H. (1958) para designar a una secuencia de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones volcánicas, cuyo límite inferior corresponde a “la serie transgresiva del Neocomiano” y la cual infrayace concordantemente a la formación Veta Negra (Thomas 1958). La definición de la formación Patagua de edad Neocomiana por parte de Aliste et al (1960) planteó el problema referente a la correlación de las unidades que representan el Neocomiano en la Cordillera de la Costa al norte del Río Aconcagua y la formación Lo Prado de Thomas en su localidad tipo.

Basado en lo anterior Piracés (1976) denominó Formación Lo Prado al conjunto litoestratigráfico representado en el sector al norte del Río Aconcagua por la formación Patagua definida por Aliste et al (1960) y las formaciones Pachacama y Lo Prado, definidas por Thomas (1958).

3.5.1.1. Definición y Relaciones Estratigráficas

Piracés subdivide a la formación Lo Prado en tres miembros denominados respectivamente inferior, medio y superior. Siendo concordantes entre sí.

Miembro Inferior: Constituido por intercalación de rocas andesíticas y queratofiricas. Los colores predominantes son grises oscuros, especialmente gris pardo y gris verdoso. En la región de Cabildo predominan las calizas y lutitas calcáreas; hacia el sur en la región de los

valles del Cobre y del Carretón predominan las areniscas finas y lutitas arenosas presentando solo algunas intercalaciones de calizas hacia el techo (Maksaev & Piracés, 1977).

Miembro Medio: Está constituido por brechas, lavas y tobas de composición andesítica y queratofirica de color predominante gris verdoso, pero también de colores gris azulado, gris morado y pardo rojizo. Corresponden a depósitos de rocas efusivas continentales, los cuales presentan gran des-uniformidad litológica lateral (Maksaev & Piracés, 1977).

Miembro Superior: Representado por lentes de varios tipos litológicos tales como calizas, areniscas, andesitas, tobas, brechas, conglomerados y traquitas. La de más amplia distribución, es una secuencia de calizas finamente estratificadas, margas, areniscas y conglomerados. Esta se encuentra en la parte basal de este miembro y generalmente marca el contacto con el miembro medio. Su espesor varía entre algunas decenas de metros a varios cientos de metros. Al norte del valle de La Ligua el miembro Superior está constituido exclusivamente por una secuencia de rocas sedimentarias marinas, mientras que hacia el sur predominan las rocas volcánicas. Al sur del Río Aconcagua presenta rocas volcánicas y rocas calcáreas marmorizadas (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.1.2. Espesor

El espesor de la formación lo Prado en el área es relativamente uniforme. En el sector de Cabildo es de aproximadamente 2 970m; más al sur en la localidad de Purehue presenta aproximadamente 2 370m (Maksaev & Piracés, 1977).

El miembro Inferior presenta un espesor de 1 200m en el sector de Cabildo, disminuyendo a 700m en el sector de Purehue y acuniándose en el sector del cerro La Campana, al sur del Río Aconcagua. El miembro Medio presenta un espesor relativamente uniforme y varía entre 850 y

900m. El miembro Superior presenta aproximadamente 900m de espesor al norte del Valle de La Ligua y 770m en la localidad de Purehue (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.1.3. Edad y Correlación

Las rocas de la Fm. Lo Prado presentan escasa fauna fósil, sin embargo se han encontrado niveles fosilíferos, en el miembro Inferior y Superior de esta unidad, los cuales han permitido establecer la edad Neocomiana de estas rocas (Maksaev & Piracés, 1977).

En el miembro Inferior de esta formación se han encontrado, restos de ammonites en mal estado de conservación, en los cuales se identificaron los siguientes: *Argentincerias malargüense* (Steuer), *Cuyanicerias acanthiam* Leanza, *Favrella*, *Olcostephanys*, *SPiticerias* y *Thurmanicerias*, los cuales indicarían una edad Barresiano – Valanginiano para esta unidad (Aliste, et al 1960).

En el miembro Superior de la formación Lo Prado se ha localizado fauna fósil en dos niveles fosilíferos presentes en el Cordón de Chacana; en el nivel inferior se presentan: *Hexacorales*, *Trigonia Sp.* *Exogyra*, *Pecten* y *Panopea*. Asociación típica del Neocomiano. En el nivel fosilífero superior aparecen: *Hexacorales (Astrocoenia?)*, *Panopaea Sp.* Y *Exogyra* (Levi, 1958).

En la cuesta de Lo Prado, Tavera (1952) encontró *Holcoptychites neuquensis* Douvillé, ammonite que indica una edad Hauteriviano inferior.

Estos antecedentes permiten asignar una edad Valanginiano – Hauteriviano al miembro Superior de la Formación Lo Prado. El miembro Medio de la formación Lo Prado, de carácter volcánico, no presenta fauna fósil, pero por su posición estratigráfica tiene una edad Valanginiano (Maksaev & Piracés, 1977).

Los afloramientos de rocas Neocomianas en la Cordillera de la Costa, continúan hacia el norte en forma de una franja discontinúa de rumbo norte, interrumpida por la presencia de intrusivos graníticos pertenecientes al batolito andino (Maksaev & Piracés, 1977).

En la IV Región de Chile el Neocomiano aparece representado por las siguientes unidades lito-estratigráficas definidas por Thomas (1967): Estratos de El Reloj; constituidos por rocas volcánicas andesíticas, en su parte superior y calizas marinas en su parte inferior cuya edad es Valanginiana. Formación Arqueros; constituida por rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas andesíticas (Thomas, 1967), de edad Hauteriviano – Barremiano (Aguirre y Egert, 1965; Moscoso, 1974).

En la III Región la franja de rocas Neocomianas continúa y aparece representada por una secuencia de rocas predominantemente sedimentarias marinas que corresponden al Grupo Chañarcillo definido por Segerstrom & Parker (1959).

Hacia el sur la franja de rocas Neocomianas es más discontinúa y parte de la secuencia desaparece en algunos sectores debido a la presencia de intrusivos graníticos pertenecientes al batolito andino (Maksaev & Piracés, 1977).

Los afloramientos más australes, conocidos hasta la fecha, de rocas Neocomianas en la Cordillera de la Costa, aparecen en la localidad de Santa Cruz, a 40 Km al oeste de San Fernando. En este sector ha sido definida la formación La Lajuela (Charrier, 1973) constituida principalmente por vulcanitas queratofíricas y andesíticas; engranando con los depósitos volcánicos se encuentran potentes intercalaciones sedimentarias continentales y marinas constituidas por Calizas, lutitas, areniscas y conglomerados (Charrier, 1973).

3.5.1.4. Condiciones de Depositación

El miembro Inferior de la formación Lo Prado presenta caracteres litológicos y paleontológicos que permiten definir un ambiente de depositación de plataforma marina o sub-litoral y más específicamente del tipo infra-litoral (Maksaev & Piracés, 1977).

Las condiciones de depositación del miembro Medio corresponden a un ambiente de tipo continental volcánico (Maksaev & Piracés, 1977).

El miembro Superior de la formación Lo Prado, corresponde a la transición entre un ambiente marino de escasa profundidad a un ambiente continental volcánico. Las características litológicas y paleontológicas indican que las rocas sedimentarias presentes en esta unidad se depositaron en un ambiente de tipo marino probablemente medio-litoral a infra-litoral. El carácter lenticular de los estratos componentes de esta unidad permite suponer que la depositación ocurrió en una zona de islas volcánicas en un mar somero, cuadro que corresponde a una plataforma volcánica subsidente (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.2. *Formación Veta Negra*

La Formación Veta Negra fue definida por Thomas (1958), distinguiendo 2 miembros en ella; un miembro inferior denominado Purehue y un miembro superior denominado Ocoa.

3.5.2.1. Definición y Relaciones Estratigráficas

Esta formación sobryace concordantemente a la formación Lo Prado y subyace a la formación Las Chilcas de la cual está separada por una discordancia de erosión (Maksaev & Piracés, 1977).

Miembro Purehue: Está constituido predominantemente por lavas andesíticas, frecuentemente brechosas y vesiculares de colores púrpura,

rojo, violeta, gris y pardo; presenta intercalaciones de rocas sedimentarias rojas constituidas por areniscas, conglomerados y brechas (Maksaev & Piracés, 1977).

Son frecuentes en esta unidad los cambios litológicos laterales que incluyen cambios texturales en las lavas, cambios de color y cambios laterales de facies sedimentarias a volcánicas (Maksaev & Piracés, 1977).

Miembro Ocoa: Esta unidad está constituida casi exclusivamente por mantos efusivos de andesitas caracterizadas por una textura porfírica gruesa definida por fenocristales de plagioclasa que alcanzan a más de 2cm de largo y una masa fundamental andesítica fina. Por ser muy característico este tipo de lavas han recibido el nombre de “Ocoitas”. Se presentan en forma de una sucesión de potentes coladas de ocoitas de 10 a 30 m de potencia con intercalaciones de andesitas porfíricas finas. Las intercalaciones sedimentarias son muy escasas, no alcanzan gran espesor y están constituidas por areniscas gruesas, conglomerados y brecha con clastos de ocoitas y colores rojizos (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.2.2. Espesor

El espesor de la formación Veta Negra, en el área, es relativamente constante y alcanza aproximadamente 6000m. El miembro Purehue varía entre aproximadamente 300m (zona de Cabildo) a 2500m en la localidad tipo (Purehue). La potencia predominante del miembro Ocoa es de 4000 m alcanzado a 5000 en la parte central del área (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.2.3. Edad y Correlaciones

La formación Veta Negra por su posición estratigráfica sobre capas Neocomianas, es correlacionable con la formación Colimapu, definida por C. Klohn (1956) en la Cordillera Principal, esta última formación también se apoya sobre rocas Neocomianas marinas y consiste en un gran

conjunto de rocas de origen continental; principalmente areniscas y conglomerados rojos a los que Klohn asignó una edad Barremiana - Coniaciana inferior (Klohn, 1960). También la formación Veta Negra es correlacionable con la formación Cristo Redentor definida por Aguirre (1960) en la Cordillera Principal de la V Región, esta formación está constituida por rocas de origen continental a las cuales Aguirre asignó una edad Hauteriviana inferior a Albiano superior. En la cordillera de la Costa de la IV Región, el equivalente de la formación Veta Negra lo constituye la formación Quebrada Marqueza definida por Aguirre y Egert (1962), constituida por lavas y brechas andesíticas y rocas sedimentarias clásticas. Esta formación es de origen continental, con excepción de una delgada secuencia de areniscas marinas que se encuentran en la base. Aguirre y Egert (1962) han asignado una edad Aptiano – Albiano a la formación Quebrada Marqueza (Maksaev & Piracés, 1977).

A la formación Veta Negra, en base a los antecedentes expuestos y a la ausencia de fauna fósil de valor cronoestratigráfico se le asigna una edad Barremiano – Albiano (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.2.4. Condiciones de Depositación

Las condiciones de depositación de la formación Veta Negra corresponden predominantemente a un ambiente de tipo continental volcánico (Maksaev & Piracés, 1977).

Las intercalaciones sedimentarias presentes en el miembro Purehue son de origen continental; como lo indica el color rojo de los mismos y el hallazgo de restos vegetales, vertebrados y ostrácodos, en areniscas y lutitas en el sector de la mina Veta Negra (Muños Cristi, 1943).

Las potentes coladas de ocoitas y el gran espesor del miembro Ocoa, sugieren que este representa la manifestación de un vulcanismo de tipo fisural (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.3. *Formación Las Chilcas*

La formación Las Chilcas fue definida por Thomas (1958). Esta unidad se dispone en aparente discordancia erosiva sobre la formación Veta Negra e infrayace con discordancia angular a la formación Lo Valle.

De acuerdo a Carter y Aliste (1962) la base de la formación Las Chilcas (denominada por ellos formación Cerro Morado) es una superficie de erosión que aparece caracterizada por la presencia de lentes de conglomerado grueso variable entre cero a varias decenas de metros de espesor. Este conglomerado presenta clastos de ocoitas provenientes del infrayacente miembro Ocoa de la formación Veta Negra y presenta una matriz tobácea.

3.5.3.1. Definición y Relaciones estratigráficas

Esta formación está constituida predominantemente por rocas volcánicas o vulcano-clásticas con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales (Maksaev & Piracés, 1977).

En el sector norte del área predominan lavas andesíticas generalmente brechosas de colores pardo rojizas, grises, azulados, verdes y morados, alternando con brechas, brechas/tobáceas y tobas de composición andesítica y color verde o gris. Se presentan intercalaciones de conglomerados y brechas verdes areniscas gruesas y conglomerados rojos. Presentan clastos de andesitas y matriz arenoso-tobácea gruesa. En el sector sur del área la Formación Las Chilcas presenta una mayor proporción de rocas sedimentarias, con respecto al sector norte. Teniendo estas mayor desarrollo en la parte superior de esta unidad. En este sector la formación Las Chilcas está constituida en su porción basal predominantemente por brechas y tobas andesíticas de color verde y gris, con intercalaciones de areniscas y conglomerados rojos. La porción superior está constituida por conglomerados y areniscas rojas, limolitas rojas, calizas grises y negras (de origen continental), areniscas grises y pardas intercaladas con lavas andesíticas grises, tobas y brechas rojas.

Esta formación se caracteriza por los rápidos cambios litológicos laterales y cambios de facies volcánicas a sedimentarias (Maksaev y Piracés, 1977).

3.5.3.2. Espesor

El espesor de la formación Las Chilcas en la parte norte del área alcanza aproximadamente 5700m; más al sur en el cordón entre el valle de Catemú y Putaendo, se puede calcular potencias de 3200 a 3500 m; espesor que aumentaría a 6500 m en la localidad tipo de Las Chilcas (Maksaev & Piracés, 1977).

3.5.3.3. Edad y Correlación

En la formación Las Chilcas no se ha encontrado material fosilífero que permita una datación relativa de esta unidad. Thomas (1958) menciona el hallazgo de algunos ejemplares de alga de agua dulce llamada *Pucalitus* (Steinmann, 1923), la cual probablemente representa el Turoniano. La formación Las Chilcas por su posición estratigráfica y caracteres litológicos es correlacionable con la formación Cerrillos definida por Segerstrom y Parker (1959), también es correlacionable con la formación Viñita (Aguirre y Egert, 1965) y con la formación Abanico (Klohn, 1957; Aguirre, 1960).

En base a lo expresado se concluye que la edad de la formación Las Chilcas es Cretácico superior probablemente un lapso de tiempo comprendido entre el Cenomaniano y el Santoniano (Maksaev y Piracés, 1977).

3.5.3.4. Condiciones de Depositación

Thomas (1958) menciona el hallazgo, en la formación Las Chilcas de flora y fauna fósil que permite determinar con certeza el carácter continental de estas rocas. Esta unidad representa una zona limítrofe

entre un área volcánica continental con una cuenca de depositación aluvial. Hecho que se deduce de la lenticularidad de sus estratos y los marcados cambios litológicos laterales que la caracterizan (Maksaev y Piracés, 1977).

3.5.4. *Rocas Intrusivas*

Los intrusivos están representados por stocks de diorita y monzonita de textura granular, con gradación a textura porfirica hacia los bordes. Estos intrusivos son de grano fino a medio y definen un batolito en la zona central de la Hoja de Quillota (Plano N°01), al cual se le denomina “Batolito de Cabildo” (Injoque, 1993).

Algunos de estos stocks, vecinos a Cerro Negro, cortan la formación Las Chilcas y por sus edades Aptianas a Cenomanianas (118-92 Ma, Rivano et al, 1985), es muy posible que estén relacionados a las etapas tardías del vulcanismo de esta misma formación, sugiriendo que los stocks del Batolito de Cabildo son núcleos plutónicos asociados hacia la superficie, en por lo menos algunos casos a complejos volcánicos erodados. Otros más bien, cortan la formación Lo Valle y serían de edad Paleógena. Dataciones practicadas en rocas similares a las del distrito, en un pórfido diorítico que aflora al E del sector Los Mantos, arrojaron valores de 95.9 ± 3.1 y 92.0 ± 3.0 Ma (K-Ar; duplicados en roca total) (Rivano et al, 1986).

3.5.5. *Estructuras Regionales*

Se describe la presencia de algunos pliegues menores en la zona. Pero esta área, básicamente está caracterizada por la presencia de un monoclinal buzante 15° - 20° al S-SE. El fallamiento regional es de tendencia N-S, habiendo dos lineamientos principales, denominados Lineamientos Oeste y Lineamiento Este (Injoque, 1993) (Plano N°01).

3.6. Procedimiento

Las etapas para la recolección de datos fue la siguiente:

- Etapa de preliminar de gabinete: Elaboración del plan de trabajo; recolección, estructuración, diseño, análisis y procesamiento de la información. Confección de planos de terreno utilizando software ArcGis 10.2 – SAS Planet – Surpac 6.3.
- Etapa de campo: Recolección de datos geológicos (litología, alteración, mineralización, estructuras), los que serán analizados y comparados, permitiéndonos definir el comportamiento geológico del lugar. Toma de muestras para análisis de geoquímica (Cu/Ag) y para análisis microscópico (sección pulida y microsonda).

3.6.1. Técnicas e Instrumentos de Recolección:

Las técnicas empleadas en la recolección de información fueron: Cartografiado geológico, muestreo geoquímico y muestreo para microscopía.

3.6.1.1. Cartografiado Geológico:

A la hora de realizar el cartografiado en campo (Fotografía N°06) se tiene que tener mucha atención y ser lo más minucioso posible, no importa tomarse un buen tiempo en un afloramiento, siempre y cuando saquemos los máximos datos posibles de él a fin de que a la hora de la interpretación, sea la riqueza de los datos adquiridos en campo la que le dé mayor peso a nuestro modelo del yacimiento; el método de cartografiado utilizado es el de cartografiado por afloramientos (método anaconda), el cual consiste en anotar la información de campo en planos a manera de capas, elaborando un folio del Proyecto.



Fotografía N°06 – Observación de afloramientos volcano-sedimentarios. Los Mantos, vista al SE

El cartografiado por afloramientos consiste en utilizar una Ortofoto (Figura N°22) a escala adecuada al trabajo, en este caso se consideró la escala 1:10,000, sobre la cual se coloca un capa (papel mate a transparente) para contornear los afloramientos que se muestran en la imagen; identificando el tipo de roca, rumbo y buzamiento, y asignándole un color según el código de colores que se maneja en Cerro Negro, en el caso de existir estructuras sean pliegues, fallas o lineamientos se las plasmas con color azul y los vetas con color rojo.



Figura N°22 – Ortofoto del proyecto Los Mantos (en rojo) – Extracción del sector usando SAS Planet.

En la segunda capa colocan las alteraciones identificadas en el proyecto, en Los Mantos principalmente se ha encontrado alteración Sílice – Baritina y Carbonatos a manera de venillas e inyección en las rocas, dando énfasis a la relación de corte entre los minerales en terreno.

Finalmente la última capa es en el cual se coloca la mineralización para el caso del proyecto Los Mantos se tiene: Sulfuros (Calcopirita, Bornita, Calcosina, Galena y Pirita), Sulfatos (Baritina) y Óxidos (Limonita, Hematita, Malaquita, Crisocola, Tenorita y Copper Wad), obteniendo así un conjunto de datos lo suficientemente ricos y abundantes para facilitar la interpretación en gabinete de la zona de exploración.

3.6.1.2. Muestreo Geoquímico

El objetivo de un plan de muestreo es obtener un ejemplar representativo de la población de donde proviene, y en una cantidad suficientemente pequeña para que pueda ser transportada fácilmente al sitio donde va a ser analizada. Para lo cual la muestra debe poseer 3 parámetros:

- a) REPRESENTATIVIDAD: La muestra debe simbolizar la constitución del depósito en cuanto a elementos económicos y no económicos.
- b) PROPORCIONALIDAD: Los integrantes del depósito, económico o no deben estar presentes en la misma proporción que tiene en el terreno.
- c) PUREZA: La muestra no debe contener elementos que no sean del sitio donde se toma.

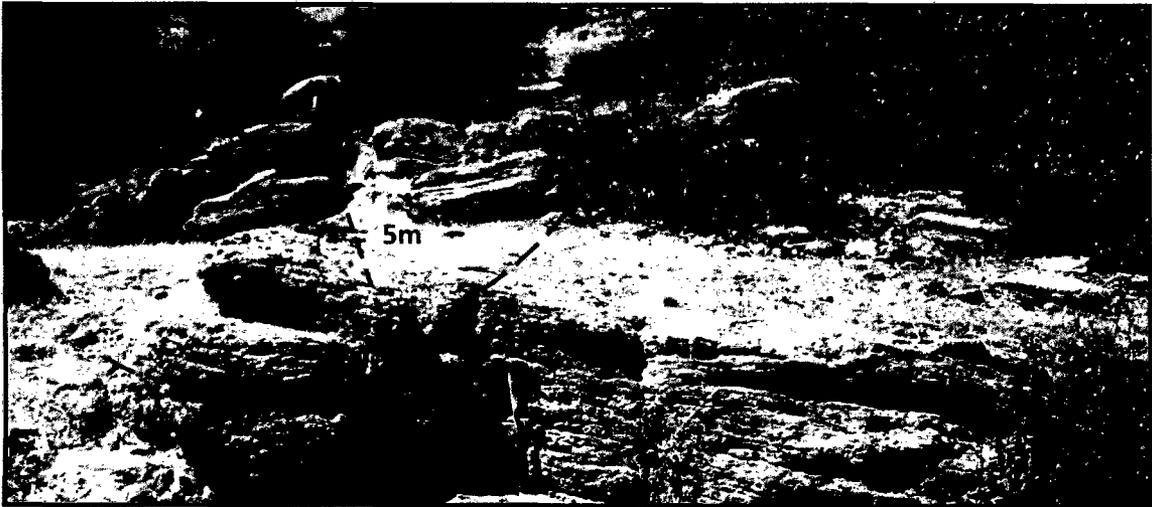
En lo concerniente al muestreo Geoquímico en el Proyecto Los Mantos se ha utilizado 2 tipos métodos Rock Chip y Canales, con el objetivo de determinar los elementos presentes en las rocas (Cu/Ag); se

considerando un universo de 73 muestras, las cuales contemplaron las zonas de mayor prioridad (selectivo) para toma de ejemplares de roca ya que posteriormente con los datos de análisis obtenidos, en el caso de ser valores anómalos altos se procedería a un muestreo más intenso y al detalle (sistemático).

3.6.1.2.1. Muestreo Rock Chip

Este tipo de muestreo se realiza en afloramientos amplios donde las variaciones pueden ser puntuales; los pasos a la hora de realizar el muestreo por rockchip son los siguientes:

- Reconocimiento del afloramiento.
- En el punto del afloramiento se “dibuja” una circunferencia de aproximadamente 5m, extrayendo muestras de cualquiera de los puntos contenidos en esos 5m. de radio (Fotografía N°07).
- Con martillo y punta sacar toda la roca superficial o intemperizada, dejándolo limpio para luego muestrear.
- Se realizará la toma de coordenadas de y descripción respectiva del afloramiento del cual se está tomando la muestra.
- Muestrear la roca limpia con un peso aproximado de 2kg., colocando en las bolsas de muestreo los códigos y cartillas respectivas.
- La codificación de las bolsas es según sistema de Cerro Negro.
- Si dentro del cuerpo aparecen zonas de diferente característica ya sea en forma de venillas o fracturas, esta se muestrea como selectivo.



Fotografía N°07 – Toma de Muestras de afloramiento – Rock Chip.

3.6.1.2.2. Muestreo Por Canales

Este tipo de muestreo se realiza en accesos y/o en afloramientos que presenten muchas estructuras en un área pequeña (enjambres de venillas, grupo de diques, brechas) y con la finalidad de cortar estructuras, la recolección de muestras se da con el cambio de litologías, estructuras, alteraciones y en el caso de ser uniforme el tramo, se considera una distancia de 3m para la toma de muestras; se utilizó este método para tomar muestras de vetas que cortaban secuencias volcano-sedimentarias; los pasos a la hora de realizar el muestreo por canales son los siguientes:

- Reconocimiento de la estructura.
- Trazar canales perpendiculares a los cuerpos tipo veta (Fotografía N°08), en caso de encontrarse muchas estructuras el canal tendrá que cortarlas a todas se debe de anotar las coordenadas de tramo inicial y tramo final y la longitud del canal. Los canales son en promedio de 3m (se considera como mínimo 2m y como máximo 5m), y se mide de acuerdo al cambio de alteración y/o roca.

- Con martillo y punta sacar toda la roca superficial o intemperizada, dejándolo limpio para luego muestrear.
- Muestrear la roca limpia ya sea gruesos y finos aproximadamente 2kg., colocar dentro de las bolsas de muestreo codificadas.
- La codificación de las bolsas es según sistema de Cerro Negro.



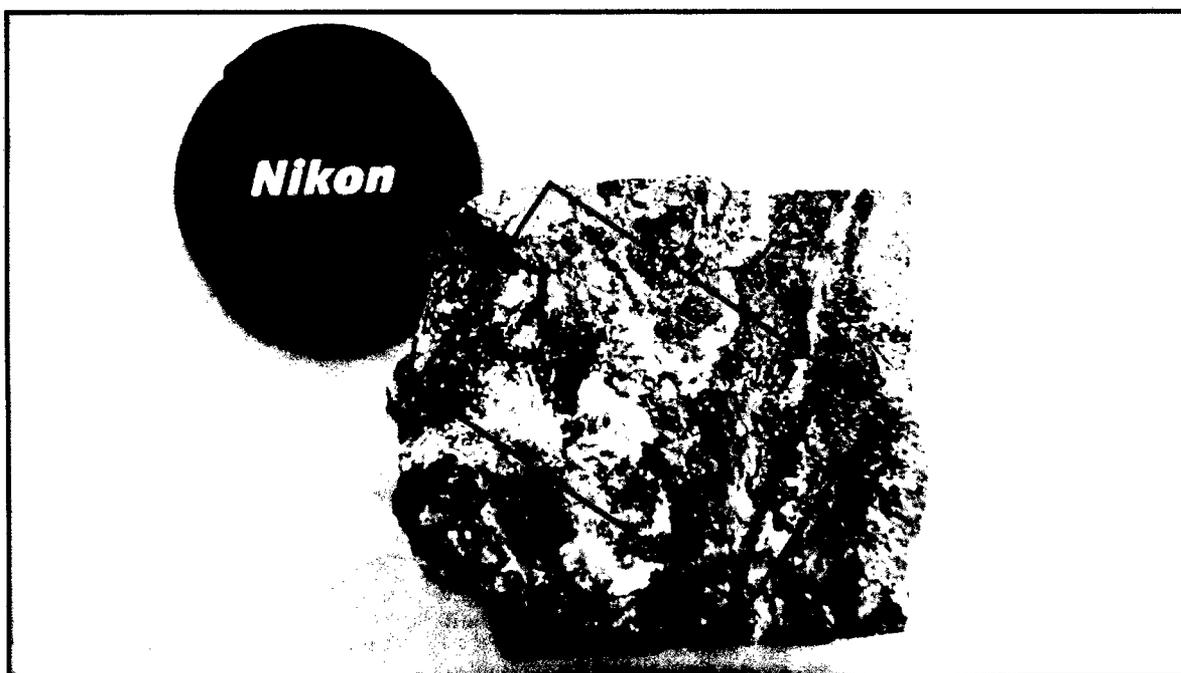
Fotografía N°08 – Venillas de sílice cortando derrames lávicos andesíticos (En amarillo orientación de canal de muestreo; perpendicular a las vetas de calcita).

Finalmente ya en gabinete se realiza la guía respectiva para cada una de las muestras geoquímicas siguiendo los formatos respectivos, indicando el tipo de ensayo correspondiente; para el caso del Proyecto Los Mantos éstas fueron analizadas por Cu y Ag en el laboratorio de Compañía Minera Cerro Negro, por el método de digestión en agua regia y lectura por AAS (espectrómetro de adsorción atómica).

Los datos de las cartillas de muestreo luego al final del día se pasan a una base de datos (EXCEL), indicando los datos obtenidos en campo (textura, litología, alteraciones, mineralización, tipo de muestra, coordenadas, etc).

3.6.1.3. Muestreo para estudio de microscopía (Secciones pulidas y Microsonda)

Se recolectaron 5 muestras de rocas mineralizadas (zona de sulfuros principalmente) para estudio de secciones pulidas, con la finalidad de identificar minerales, formas y texturas para definir las relaciones de paragénesis mineral. Dentro de las muestras se procede a marcar la zona de interés para la elaboración del corte (Fotografía N°09) y posterior observación al microscopio. Las muestras fueron enviadas a Canadá a la Universidad de Dalhousie para el respectivo estudio a cargo del Dr. Marcos Zentilli.



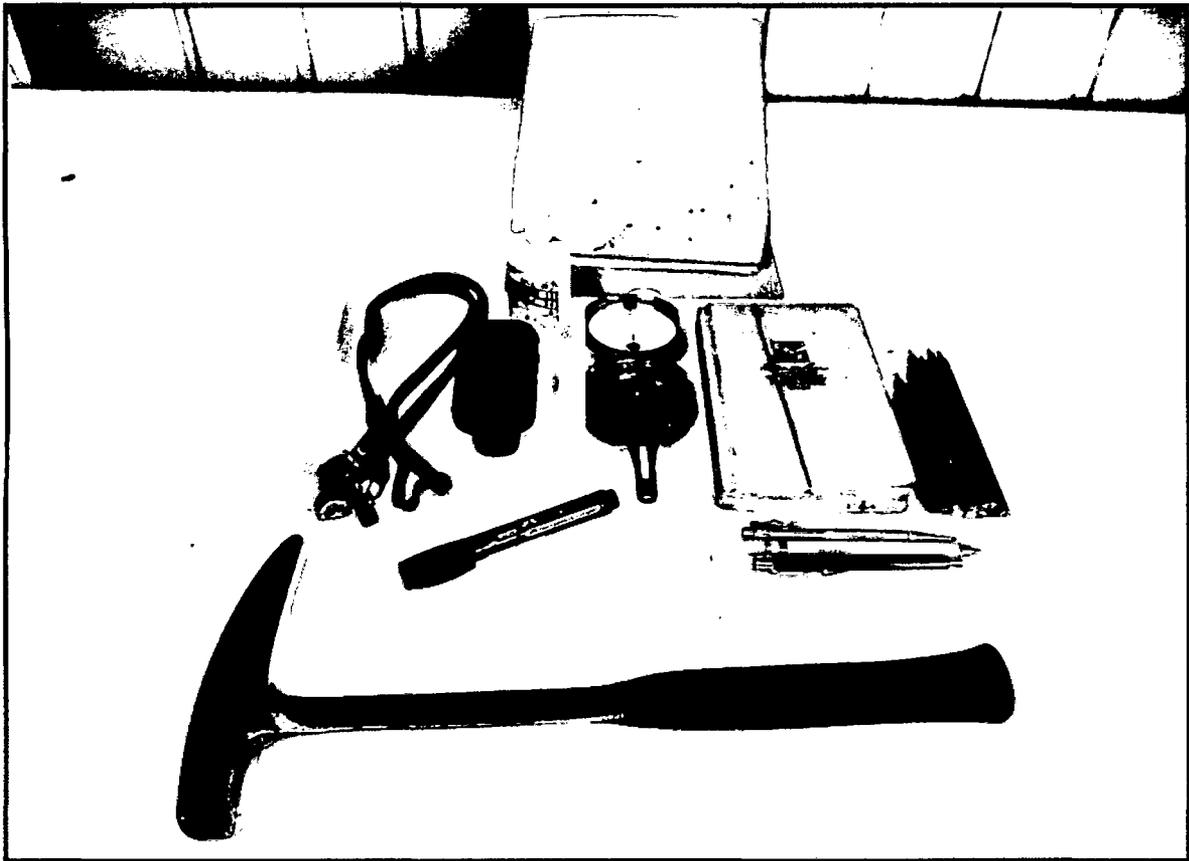
Fotografía N°09 – Muestra de mano Andesita vesicular cortada por vetilla de bornita acompañada por sílice, feldespato potásico y malaquita (En rojo sector de corte).

3.6.1.4. Instrumentos de medición

Los siguientes materiales han sido empleados en la presente tesis (Fotografía N°10):

- GPS (Garmin eTrex).
- Libreta geológica
- Martillo de Geólogo.

- Brújula tipo Brunton azimutal.
- Lupas Baush and Lomb de 10X, 14X y 20X.
- Lápiz metálico para determinar dureza de minerales.
- Lápiz Magnético.
- Geoflex (protactor) de escalas 1:500 y 1:100.
- Bases topográficas a escala 1:10,000 del Instituto Geográfico Militar.
- Imagen Satelital (Geoview 2.0)
- Colores, Portaminas, Borrador.
- Rotulador indeleble.
- Cartilla de muestreo.
- Ácido Clorhídrico dilucido al 10%.
- Bolsas de muestreo.
- Cámara Fotográfica Nikon D5100.
- Tarjetas de Identificación de Rocas (Streckeisen)
- Porta planos
- Tablero
- Laptop
- Ploter
- Impresora - Scanner
- Software Geológico (ArcGis 10.2; SAS Planet; Surpac 6.3)
- Excel, Corel Draw X6



Fotografía N°10 - Instrumentos de medición utilizados en la presente tesis

3.7. Tratamiento, Análisis de Datos y Presentación de Resultados

La información obtenida en campo es procesada e interpretada en gabinete; haciendo uso de Software especializados y criterios geológicos se logrará delinear y construir el modelo geológico del sector. Serán elaborados los planos temáticos definitivos, que servirán para la construcción de los folios y el informe final de la Tesis.

Para el procesamiento de datos se utilizó data de terreno (cartografiado), análisis de química ensayos de Cu y Ag y estudio de microscopía (secciones pulidas y microsonda); para esto fue necesario tomar 350 puntos de terreno, 73 muestras de geoquímica y 5 para microscopía.

La data obtenida en terreno, plasmada en planos de terreno y almacenada en libreta, migrará a formato digital para la elaboración de planos de litología, estructuras, alteración, mineralización, isoleyes (Cu y Ag) y secciones; mediante el uso de software

como ArcGis 10.2, SAS Planet y Surpac 6.3. Los datos de geoquímica serán procesados en Excel con la finalidad de generar tablas y cuadros de análisis químico comparativo con los controles de litologías y alteraciones.

Para el estudio de microscopía, se utilizarán software y propia metodología del Laboratorio de la Universidad de Dalhousie; obteniéndose como resultado final un reporte con tablas e imágenes de microscopio a diferente magnificación, resultados que se correlacionará con las hipótesis y data de terreno.

El tipo de Análisis es descriptivo ya que a partir de los estudios de microscopía y cartografiado de terreno se determinará las características geológicas del proyecto; comparando esta información con los ensayos de química se podrá a priori determinar los mecanismos implicados en la mineralización de Cu y Ag.

Los resultados serán presentados en imágenes y como gráficas, así como planos (litologías, estructuras, alteraciones, mineralización, isoleyes de Cu y Ag y secciones); de los resultados obtenidos y la correlación de los parámetros geológicos, estructurales, de alteración y mineralización; se podrá en esta etapa definir un modelo geológico para el proyecto Los Mantos e identificar el tipo de depósito existente.

3.7.1. *Software*

Con la información recolectada en terreno, se diseñó una base de datos (EXCEL) con la finalidad que estos datos sean trabajados en SAS PLANET - ARCGIS 10.2 – COREL DRAW X6 – SURPAC 6.3 – STERONET.

- **EXCEL:** Los datos de terreno son ingresados en coordenadas (N, E, Z) con una descripción geológica, estos datos son añadidos luego a los resultados de química, con los cuales se elabora una base de datos, la que luego puede ser procesada de manera estadística para elaboración de tablas y gráficas.
- **SAS PLANET:** Mediante esta aplicación se pudo extraer una imagen satelital del área de trabajo para utilizarla en conjunto con la topografía del área en el

cartografiado geológico; para poder realizar la extracción es necesario tener las coordenadas del área, así como el sistema de coordenadas y zona, para el caso del proyecto las coordenadas son UTM PSAD56 y la zona 19S.

- **ARCGIS 10.2:** Herramienta para la visualización, creación, manipulación y gestionamiento de información geográfica en el cual media una base de datos, se puede proyectar espacialmente información proveniente de data geológica, química, topográfica; mediante este software se realizaron los planos geológicos, secciones, las cuales se proyectan en capas (layer) para su posterior impresión.
- **COREL DRAW X6:** Programa de diseño gráfico, mediante este programa se pudo editar las fotografías para poder darles mayor contraste y balance de colores, así como editar y elaborar las figuras mostradas en la presente tesis.
- **SURPAC 6.3:** Software de modelamiento geológico, utilizado en el diseño de cuerpos mineralizados, modelos de bloques y cálculo de reservas; para la presente tesis se utilizó para generar un modelo digital del terreno (en base a curvas de nivel), con el que posteriormente se realizaron las secciones geológicas.
- **STEREONET:** Software geológico aplicado al análisis estructural, mediante el cual se pueden realizar diagrama de rosas y polos; con los que se plasma la dirección preferencial de estructuras, régimen estructural del sector y distribución de esfuerzos.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de Información

El trabajo de cartografiado de superficie a escala 1:10,000 sirvió para definir las unidades estratigráficas, alteraciones, estructuras y mineralizaciones en el proyecto Los Mantos; esto con la finalidad de definir la características implicadas en la génesis de mineralización.

4.1.1. *Geología Local*

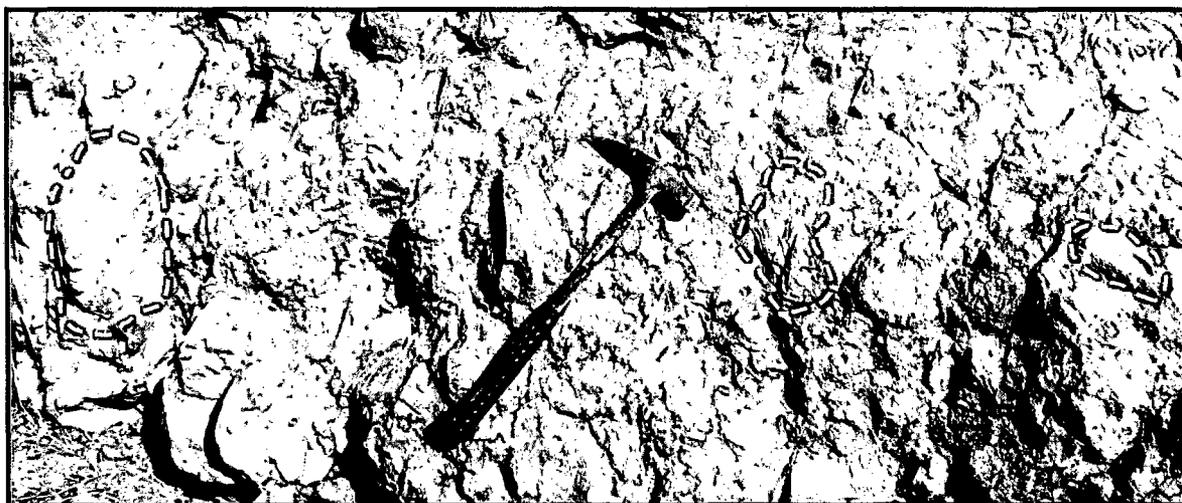
Las secuencias volcano-sedimentarias aflorantes en el Proyecto Los Mantos, son de edad Cretácica Inferior a Superior (Fm. Las Chilcas). Las cuales comprenden brechas volcánicas de composición andesítica, lavas andesíticas, areniscas pardas intercaladas con niveles de brecha y horizontes locales de lutitas y calizas con sílice sedimentaria (chert), ésta se haya cortada e intruída por rocas hipabisales de composición intermedia (Dioritas a Monzonitas), que se presentan a manera de diques o stocks de rumbo N30E y N30W (Injoque, 1993) (Figura N°23 y Plano N°02).

4.1.1.1. Rocas Volcano-Sedimentarias

Representan estadios de volcanismo continental con episodios sedimentarios lagunares a clásticos, según los afloramientos identificados en terreno se definen las siguientes unidades de base a techo:

i) Aglomerado Basal

Unidad de mayor distribución en la zona de estudio, corresponden a rocas mal clasificadas con fragmentos y cantos polimícticos sub-angulosos y sub-redondeados, englobados en una matriz porfirica fina a granular color parda con fenos anhedrales de plagioclasa; Aglomerado Andesítico (Fotografía N° 11). Presenta episodios de coladas lávicas potentes ($\pm 50\text{m}$) de textura afanítica a porfirica fina con fenos de plagioclasa y piroxenos (cristales subhedrales), presenta débil magnetismo, de composición intermedia (andesítica) además de horizontes lenticulares de volcarenitas (arenas volcánicas). No se ha identificado su base, asumiendo su potencia en más de 700m.



Fotografía N°11 – Aglomerado con fragmentos sub-redondeados polimícticos, clasto soportado, matriz fina granular de plagioclasas.

ii) Lava Gris – Inferior

Derrames lávicos de textura porfirica media con fenos de plagioclasa subhedral y óxidos de hierro (goethita – hematita) con matriz granular fina de color gris; lavas andesíticas (Fotografía N°12). Hacia el tope de esta unidad localmente presenta niveles brechados (con fragmentos líticos) a aglomerádicos y en el piso de la misma tiene vesículas de clorita. Presenta débil alteración de clorita – epidota – prehnita, su afloramiento es muy focalizado en el NE de la zona de estudio por lo

que se supone puede tratarse de un nivel lávico irregular, potencia promedio de 100m.



Fotografía N°12 – Afloramiento de lavas andesíticas grises, afectado por intemperismo, inyecciones de calcita en fracturas.

iii) Lahares – Andesita autobrechada – Andesita vesicular

Suprayace de manera concordante a los horizontes lávicos grises y aglomerado basal; esta unidad en su parte inferior se encuentra representada por derrames lávicos andesíticos de textura porfírica fina con vesículas rellenas por cloritas y en casos por bornita y calcopirita; en su parte intermedia hay intercalación con niveles autobrecha, fragmentos monomícticos sub-angulares clasto-soportados de diámetros mayores a 50cm englobados en una escasa matriz andesítica granular fina, hacia su tope presenta intercalaciones con lahares, fragmentos heterolíticos sub-angulares mal clasificados en una matriz verdosa granular. Hacia el sector SE de la zona de trabajo hay un cambio lateral de este nivel lávico a una roca andesítica brechosa (polimíctica) con clastos y fragmentos sub-angulares y estratos de lapilli a toba verdosa fuertemente cloritizada poco potentes (5m) y a la base la misma secuencia lávica vesicular.

Este horizonte se encuentra fuertemente afectado por presencia de cuarzo – calcedonia, baritina, carbonatos – ankerita y en menor

medida feldespatos potásico a manera de relleno en fracturas y relleno de cavidades; debido a la alteración, los afloramientos expuestos en superficie su matriz es casi irreconocible (Fotografía N°13). Se asume para esta unidad una potencia promedio de 80m.

Aflora principalmente en el sector NE y centro de la zona de trabajo, hallándose infrayacente a la secuencia sedimentaria lagunar calcáreo superior, presenta la principal evidencia de mineralización en el proyecto Los Mantos. Este horizonte las rocas presentan evidencia de mineralización de óxidos de cobre como crisocola, malaquita, tenorita y escasamente azurita en superficie.

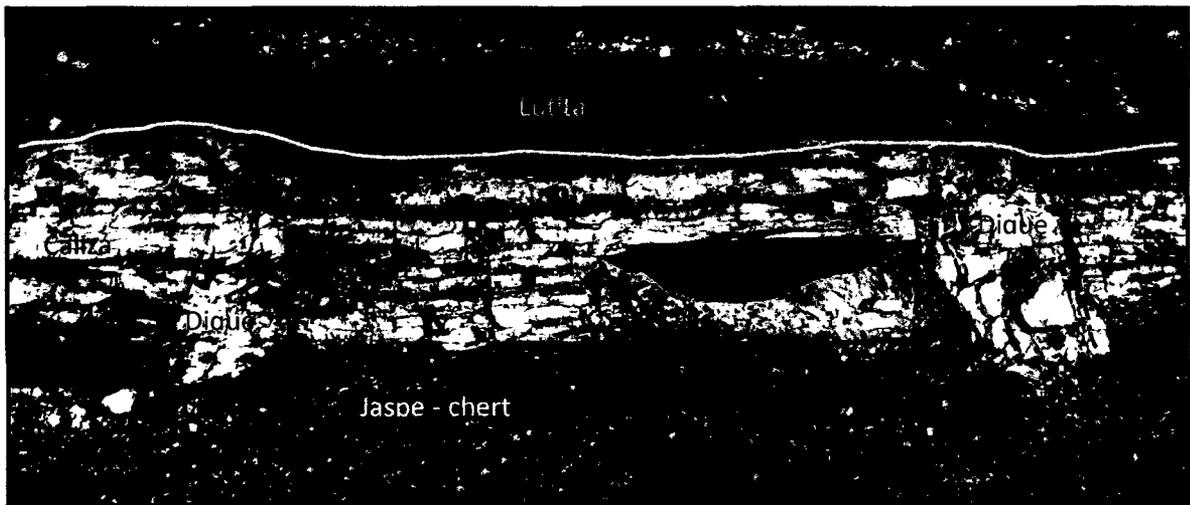


Fotografía N°13– Afloramiento de andesitas autobrechadas con inyección de Sílice (si), carbonatos (cb) y baritina (bar) con crisocola (crsc), zona de oxidación; vista al Norte.

iv) Secuencia sedimentaria lagunar calcárea

Se dispone de manera concordante suprayacente con los estratos de lavas autobrechadas andesíticas, presenta una distribución relativamente uniforme en el área de estudio (con variaciones locales) (Fotografía N°14). Generalmente presenta a la base horizontes de calizas tabulares bituminosas en parte silicificadas (paquetes centimétricos) con restos de vegetación (troncos y cortezas) de hasta 10 – 20 cm, los niveles superiores están conformados por chert

blanquecino en estratos compactos 1m de potencia, cerca al techo se tiene capas de limolitas calcáreas color crema con presencia de pelecípodos?. Hacia el tope de esta unidad en el sector centro presenta capas de ignimbrita y caliza silicea color parda. Esta serie sedimentaria se encuentra parcialmente mineralizada con óxidos de cobre (malaquita – tenorita ± azurita) en los estratos de caliza bituminosa silicificada y cerca al contacto chert – limolita calcárea. La secuencia sedimentaria tiene variaciones de potencia (en promedio 50m), haciéndose más potente hacia el extremo Norte (Portales) y Sur (Catemú) ambos fuera del área de estudio.



Fotografía N°14 – Mina Portales, extremo norte de la zona de estudio. Afloramiento de lutitas en contacto con calizas laminares suprayaciendo horizontes de chert y jaspe, cortadas por diques andesíticos de 1m de potencia, vista al Sur.

v) Lava Gris – Superior

Derrame lávico de composición intermedia solo expuesto en el sector NE del área de estudio se encuentra conformado por fenos subhedrales milimétricos de plagioclasa englobados en una matriz granular con óxido de fierro (hematita). Esta unidad tiene una potencia promedio de 20m (Fotografía N°15).



Fotografía N°15 – Afloramiento de andesita gris (suprayaciendo horizontes calcáreos lagunares), sector Noreste del proyecto Los Mantos, vista al Sur.

vi) Aglomerado volcánico

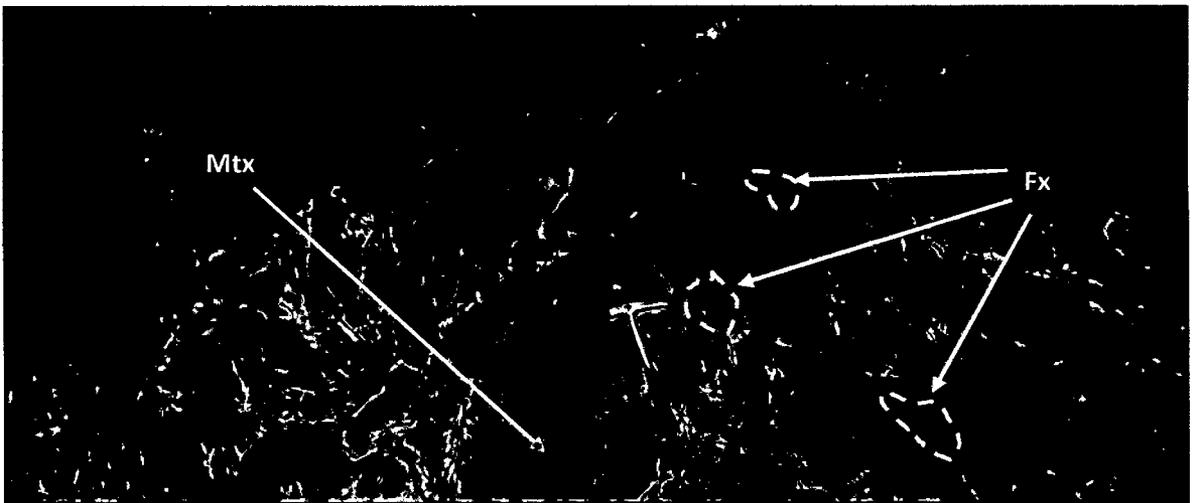
Se disponen de manera discordante sobre los horizontes sedimentarios lagunares, presenta mayor potencia hacia el NE, por el contrario hacia el Sur llega a desaparecer. Este aglomerado de composición andesítica presenta una matriz rojiza a violeta con fragmentos, cantos y bloques monomícticos sub-angulares y sub-redondeados, en esta secuencia se hallan lentes de arenisca volcánica de potencia variable (2-5m) con poca continuidad lateral, a manera de intercalaciones en el aglomerado también se encuentran derrames lávicos de composición intermedia (andesítica). Esta secuencia tiene una potencia promedio de 230m (Fotografía N°16).



Fotografía N°16 – Afloramiento de aglomerado volcánico andesítico rojizo, fragmentos sub-angulosos de diferente diámetro, vista al Suroeste.

vii) Andesita brechosa gris

Descansa concordante con las capas de aglomerado violeta infrayacentes. Presenta una matriz porfirica fina a media de color gris con fenocristales de plagioclasa milimétricos y piroxenos subhedrales (Fotografía N°17) con fragmentos y cantos polimícticos subangulosos, brecha matriz soportada, tiene intercalaciones con lavas andesíticas afaníticas y en parte lentes de arenisca volcánica. Tiene evidencia de metamorfismo de bajo grado encontrándose clorita – epidota y prehnita reemplazando plagioclasas, posee una potencia de 110m.



Fotografía N°17 – Afloramiento de andesita brechosa grisácea, fragmentos líticos angulosos, vista al Sur.

viii) Lava Parda – Tobas

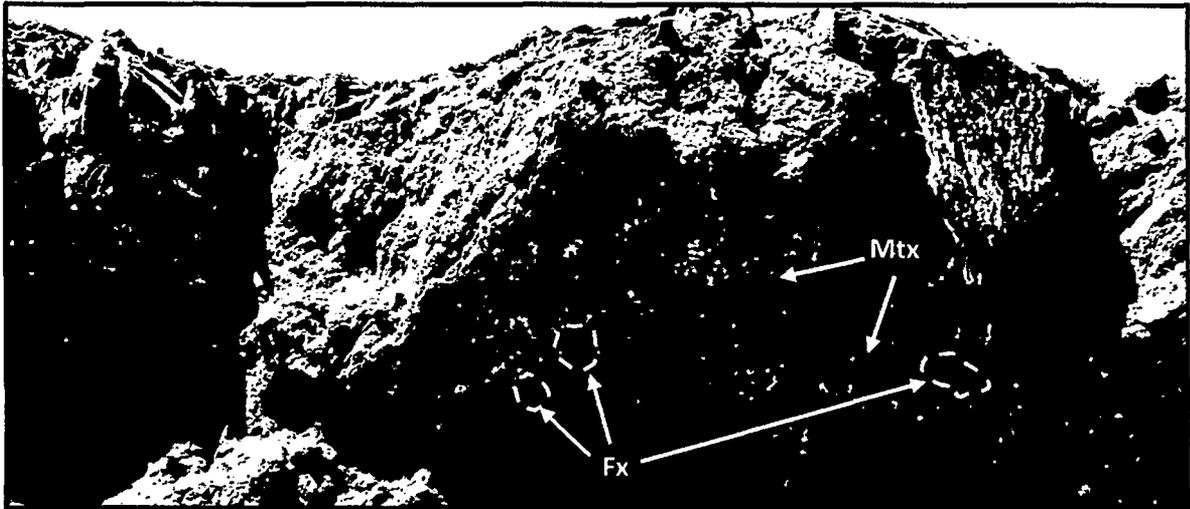
Potente secuencia de coladas lávicas de textura afanítica a porfirica fina con fenocristales de plagioclasa anhedral y composición intermedia (andesítica), presentan una coloración rojiza (Fotografía N°18), se encuentra intercalada con horizontes de toba y lapilli (en menor medida) de color crema, con débil presencia de óxidos en su matriz. Incrementa su potencia hacia el NE (400m).



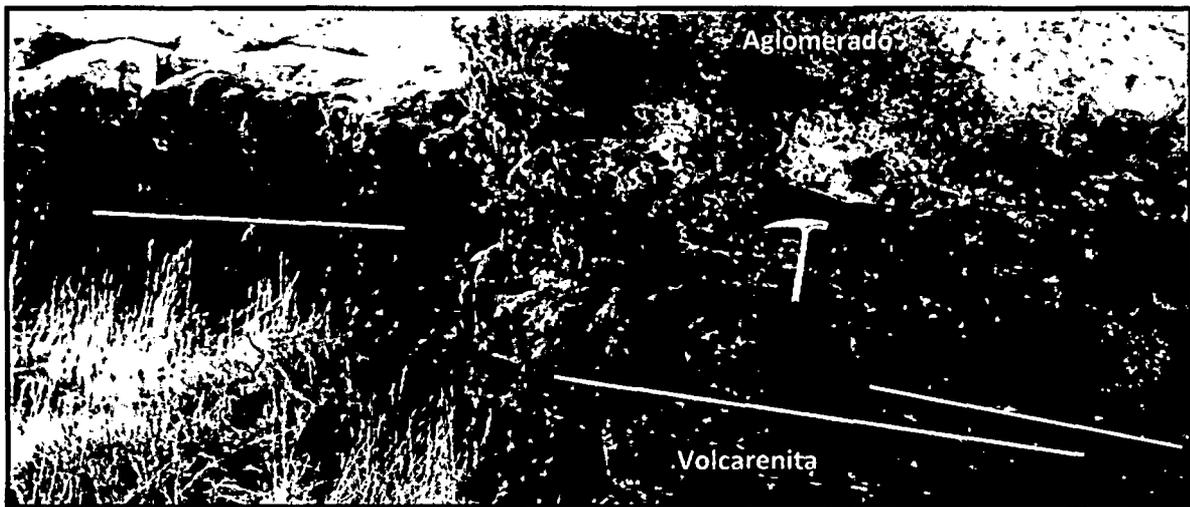
Fotografía N°18 – Coladas andesíticas de color pardo, afloramiento fuertemente fracturado ubicado al Oeste del proyecto Los Mantos, vista al Norte.

ix) Aglomerado – Volcarenita

Estratos concordantes a lavas infrayacentes, representada por conglomerados volcánicos con fragmentos monomícticos englobados en una matriz de textura porfírica fina a granular de plagioclasas y óxidos de hierro, adoptando una coloración parda, es del tipo matriz soportado (Fotografía N°19). En parte los estratos de aglomerado gradan a volcarenitas, desarrollándose lentes con potencia variable de hasta 5m y con poca continuidad lateral (Fotografía N°20). Adicional, presenta derrames andesíticos de color verdoso y textura afanítica. No se identificó su techo en terreno, pero se asume una potencia mayor a 300m para esta secuencia.



Fotografía N°19 – Aglomerado volcánico andesítico matriz (mtx) soportado, fragmentos (fx) sub-redondeados vista al Sur.



Fotografía N°20 - Línea de contacto en color rojo, horizontes de volcarenitas pardas en estratos laminares en contacto con aglomerado andesítico, vista al Norte.

4.1.1.2. Rocas Intrusivas

Esta secuencia vulcano - sedimentaria se encuentra cortada por cuerpos intrusivos de composición intermedia a ácida (Diorita y Monzonita).

i) Diorita

Roca de textura porfirica media a fina con cristales euhedrales de plagioclasas – piroxenos – hornblenda ± magnetita; matriz cristalina fina cloritizada principalmente, pero en algunos sectores con fuerte

contenido de Epidota. Se disponen a manera de diques de rumbo NE-SW y NW-SE con espesores de 2 a 5m y corridas mapeables de hasta 300m (Fotografía N°21), no presentan alteración ni asociación mineral en superficie, por lo que podrían tratarse de pulsos tardíos a los eventos de mineralización.



Fotografía N°21 - Dique diorítico cortando coladas andesíticas grisáceas, vista al Sur.

ii) Pórfidos Monzoníticos

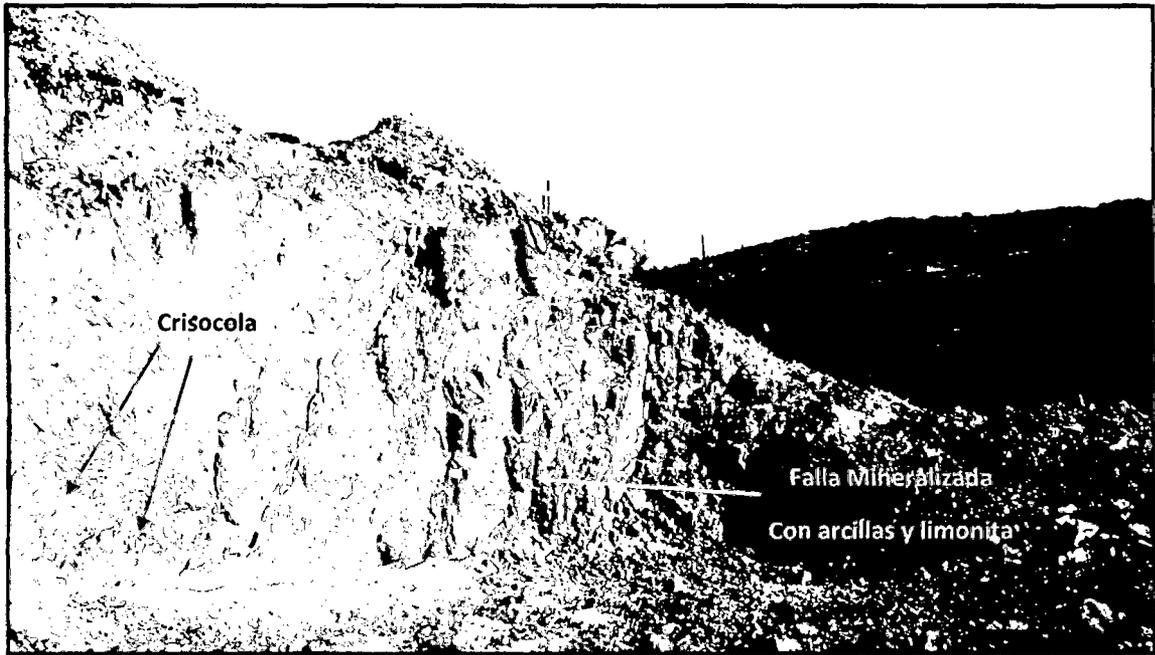
Roca de textura porfírica media con cristales euhedrales – subhedrales milimétricos de plagioclasas –hornblenda \pm magnetita y una matriz de ortoclasa con débil alteración clorítica. Afloran en el sector Central y W de la zona de estudio. Representan pulsos tardíos por la débil alteración y por no presentar una asociación mineral, presentan una ocurrencia principalmente como pequeños stock de dirección NE-SW y NNE-SSW. Podrían representar a pulsaciones tardías o emparentadas con el batolito de Cabildo; responsable del metasomatismo del área de estudio.

4.1.2. *Geología Estructural*

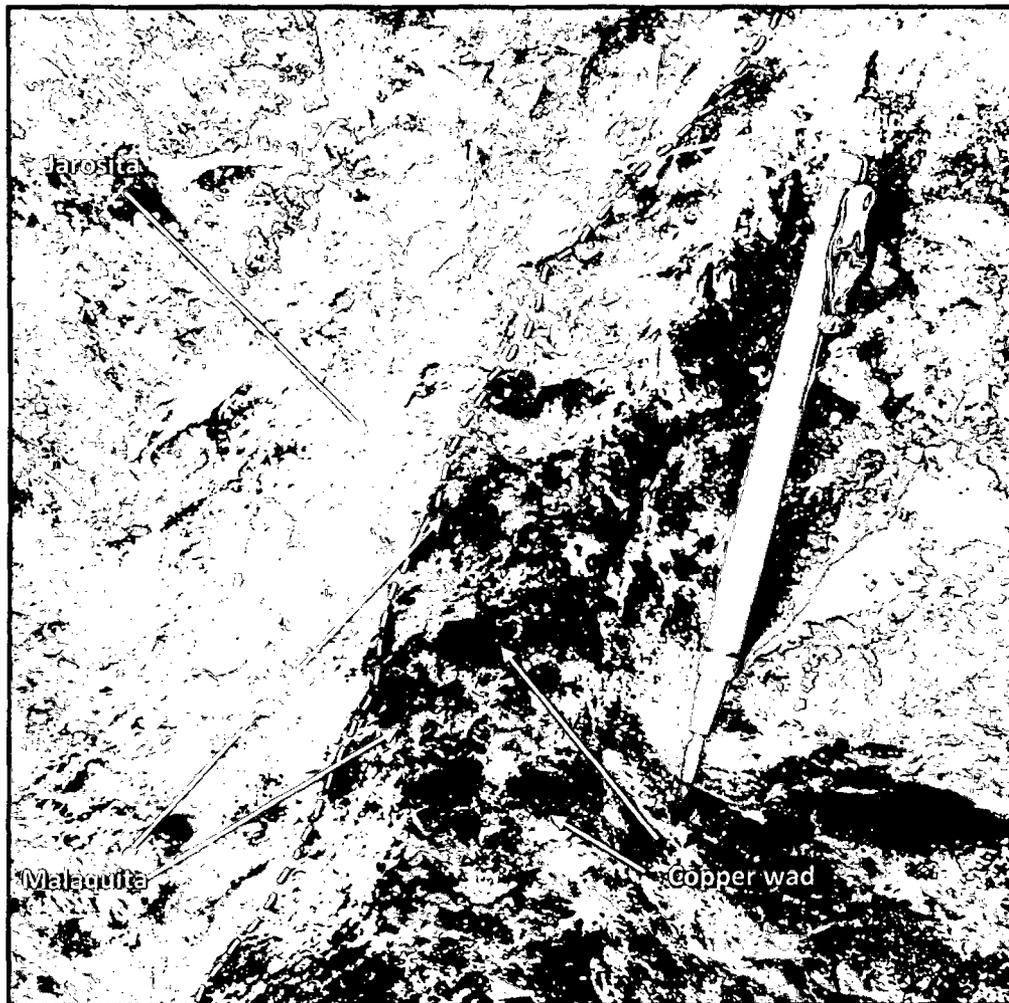
El dominio estructural principal identificado en terreno es del tipo tensional, representado por 2 familias NE-SW y NW-SE, adicional se identificó un sistema de lineamientos de rumbo E-W (Plano N°03). Es importante indicar que los estratos no se encuentran plegados, poseen una dirección regional NE-SW, con un manto de bajo ángulo hacia el E (5° a 10°), presentando variaciones locales por fallamiento.

El sistema de fallas locales presenta un patrón de basculamiento de bloques tipo horst – graven, dislocando cuerpos, generando contactos irregulares de litologías, cambios bruscos de los ángulos y direcciones de buzamiento. Propiciando de esta manera la generación de espacios para el emplazamiento posterior de cuerpos intrusivos (diques, stocks) así como un conducto de escape o migración de fluidos mineralizantes.

El principal sistema es el NE-SW, el cual genera fallas normales y fallas con relleno de mineralización encontrándose oxidadas hacia superficie, presenta sílice – arcillas con limonita y crisocola – malaquita, tiene potencias promedio de hasta 2m (Fotografía N°22); se asume que esta familia desarrolla un sistema tensional E-W que se evidencia como vetas centimétricas de sílice con malaquita principalmente (Fotografía N°23). Todo el sistema se encuentra afectado por lineamientos E-W y fallas NW-SE que se asume son posteriores a estos eventos de mineralización, inclusive reactivando los sistemas de fallas pre-existentes.



Fotografía N°22 – Falla de rumbo NE-SW mineralizada potencia de 2m en promedio, oxidada y argilizada con desarrollo de crisocola, aflora en el sector SE del proyecto Los Mantos, vista hacia el N.



Fotografía N°23 – Veta mineralizada de 10cm potencia (en blanco), presenta malaquita y copper wad acompañada por sílice y jarosita, alojada en andesitas autobrechadas. Vista al NW

Los datos obtenidos en terreno se tabularon en Excel, así como se dio formato adecuado para poder trabajarlos en StereoNet, las mediciones en terreno fueron en total 25, las que se presentan en el Tabla N°04

Tabla N°04 – Datos de estructuras medidas en terreno, en total 25 datos; para análisis de fallas solo se consideraron fallas y lineamientos, no fracturas (joints).

Id field	East	North	Elevation	Type	Strike	Dip	Dipstrike	Rhr	Wide cm
CA-19	324113	6389168	1270	Joint	324	55	54	0	0
CA-33	323960	6388752	1291	Falla	245	84	335	88	200
CA-47	323645	6388403	1270	Falla Inversa	65	31	155	60	15
CA-52	322707	6387032	1280	Falla	240	90	330	89	10
CA-55	321945	6385156	1323	Falla	270	70	0	90	10
CON-1	323201	6387050	1360	Falla	140	87	230	230	15
CON-2	323205	6387049	1250	Falla	150	60	240	240	12
CON-3	323205	6387062	1228	Cizalla	207	80	297	0	20
CON-4	323227	6387059	1227	Joint	235	80	325	0	0
CON-5	323252	6387092	1223	Falla	157	75	247	247	20
CON-7	323222	6387127	1234	Falla	320	66	50	50	30
CON-8	323223	6387134	1234	Falla	100	89	190	190	25
T-123A	323202	6387007	1230	Falla	25	82	115	90	500
T-17B	324347	6389771	1310	Falla	146	78	236	89	5
T-274	322024	6385957	1242	Falla	6	80	96	88	8
T-29	324010	6389401	1270	Lineamiento	250	90	340	0	0
T-3	323805	6388657	1296	Falla Inversa	42	37	132	85	25
T-310	323626	6387198	1250	Falla	30	85	120	180	30
T-312	323475	6387271	1231	Falla	125	60	215	90	27
T-317	323893	6387032	1257	Falla	267	85	357	88	29
T-317	323893	6387032	1257	Falla	40	82	130	87	16
T-40	323120	6386993	1216	Falla	41	88	131	90	9
T-57	322045	6384450	1284	Joint	251	79	341	89	15
T-6	321817	6385625	1306	Falla	50	87	140	10	12
TM-7	321941	6385151	1321	Falla	265	75	355	90	10

La clasificación de fallas fue obtenida a partir de observación directa en los afloramientos y posteriormente mediante histogramas de orientación (rosas estructurales) e inclinación. Para el caso de fallas se consideraron 25 mediciones representadas en la Figura N°22.

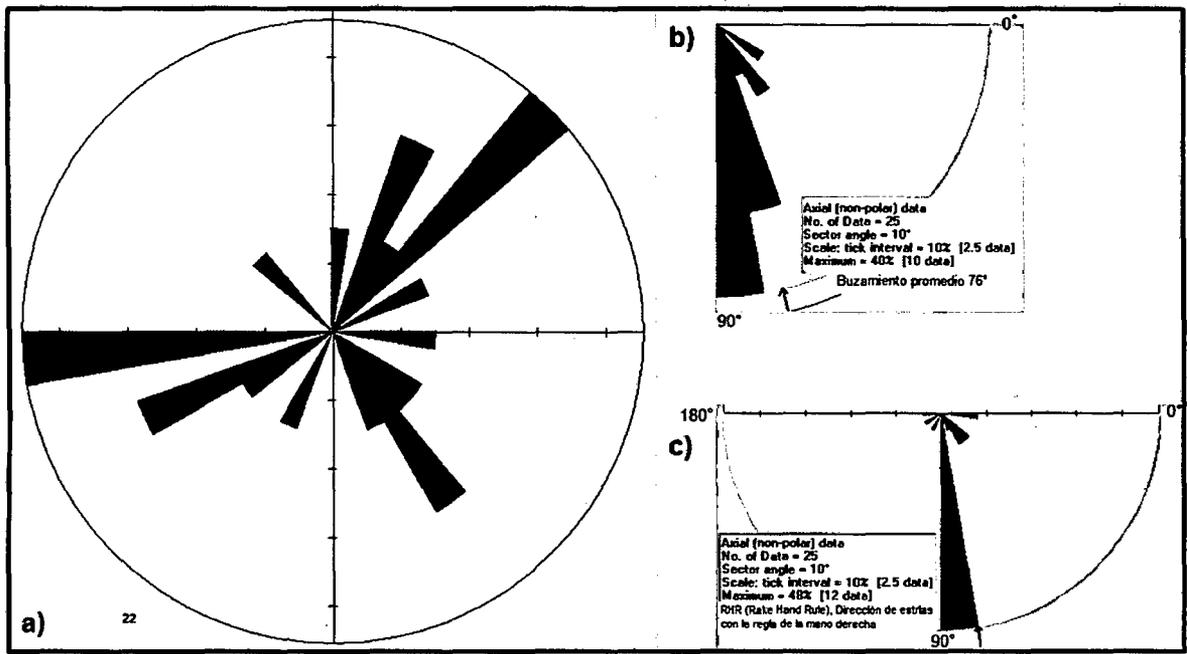


Figura N°24 – Principales características de fallamiento en Los Mantos, datos de falla n = 25. a) Rosetas unidireccionales de azimut, b) buzamientos y c) ángulo de rake (estrias) de fallas.

En la figura 24a) se muestra la tendencia de las fallas, siendo predominantemente NE-SW, en menor proporción estructuras NW-SE y E-W, en la figura 24b) se observa que las estructuras poseen un buzamiento sub-vertical a vertical (promedio de 76°SE). En la gráfica 24c) se muestra el ángulo de rake (estrias) de los planos de falla, donde se observa que la mayoría tiene una componente sub-vertical y en menor medida sub-horizontal, que corresponden a fallas normales y lineamientos sinestrales respectivamente.

En el plano estructural (Plano N°03), se muestran las fallas reconocidas en terreno, siendo dominante el desplazamiento sub-vertical y estando supeditado a lineamientos el desplazamiento sub-horizontal.

Las principales características de los planos de falla y desplazamientos relativos fueron graficados en los estereogramas de la Figura N°25, identificándose estructuras del tipo normal en su mayoría y en menor medida fallas de desgarre (horizontal) con movimiento sinistral.

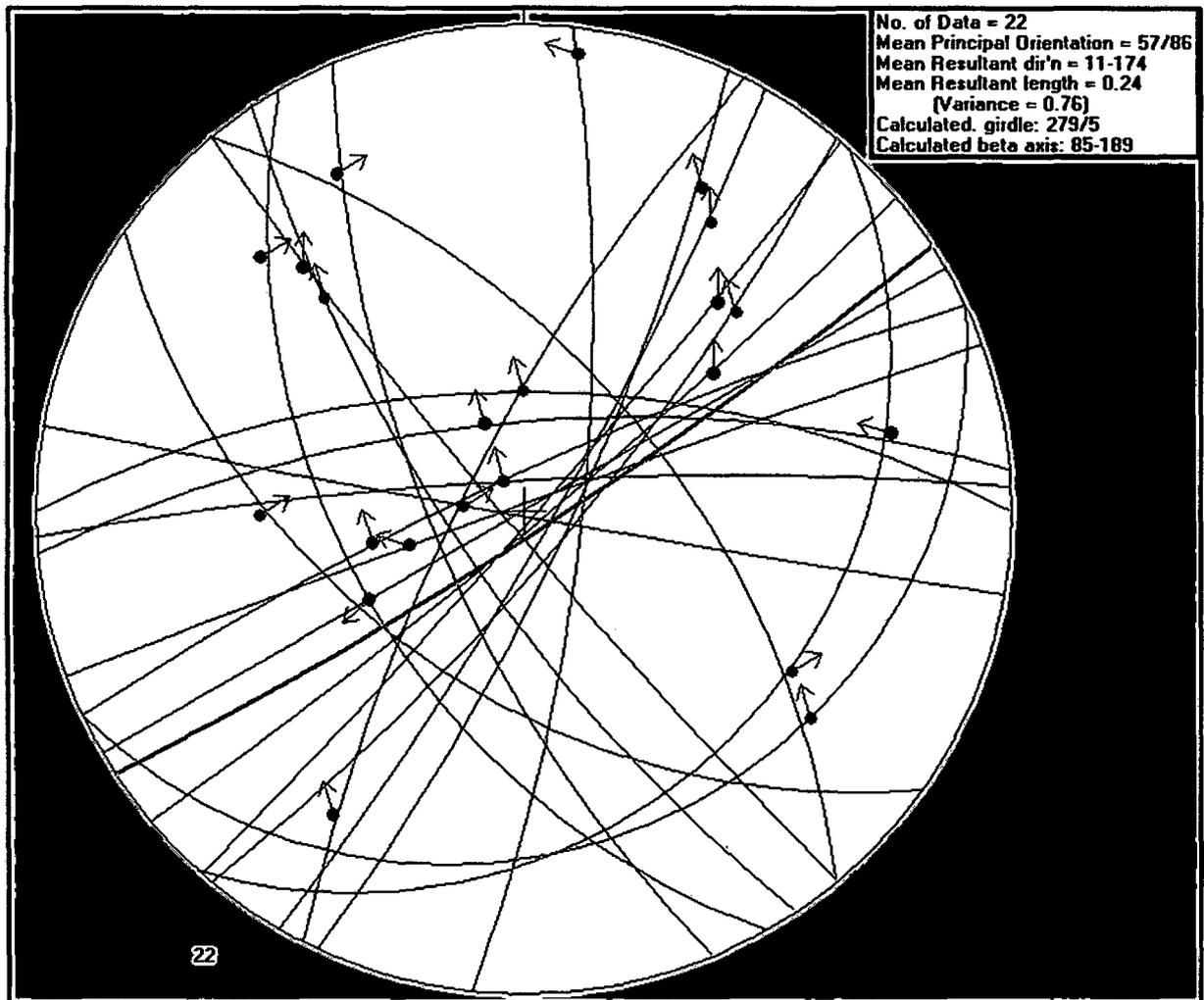


Figura N°25 – Círculos mayores con dirección de movimiento de fallas en el proyecto Los Mantos; en color rojo dirección principal de estructuras (086/57).

El gráfico de polos con distribución de puntos hacia los bordes da razón de un régimen estructural tensional. Con un esfuerzo mayor (σ_1) con dirección NE-SW y buzamiento vertical, σ_2 y σ_3 de tendencia NW-SE y N-S respectivamente (Figura N°26).

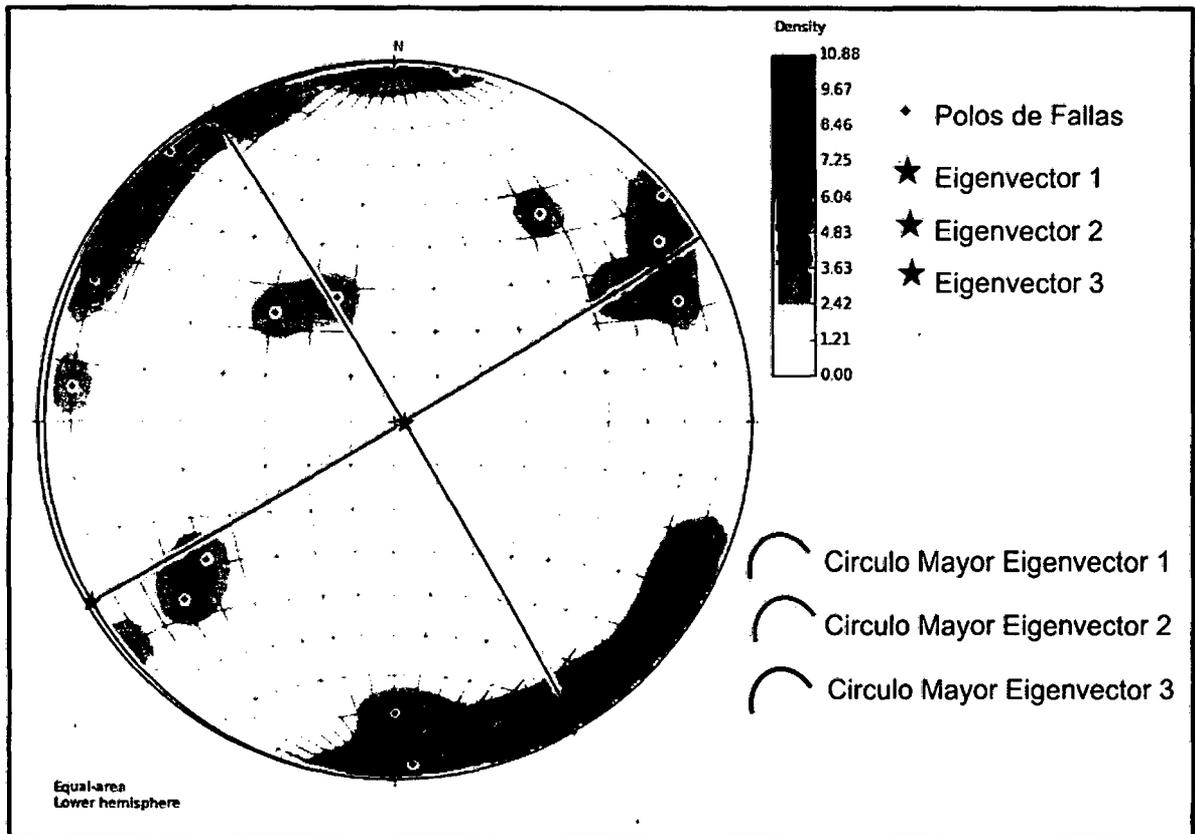


Figura N°26 – Diagrama de Polos de fallas del Proyecto los Mantos, concentración hacia los bordes indica un régimen tensional, en color verde, rojo y azul vectores de esfuerzo σ_1 , σ_2 y σ_3 respectivamente.

Se identificaron en terreno estructuras centimétricas (20-30cm) a métricas (1.5m) con longitud no definida debido a la escases de cuerpos expuesto de este tipo, las cuales corresponden a vetas de sílice lechosa a hialina que se encuentra asociada a presencia de mineralización de óxidos de cobre principalmente malaquita, crisocola y escasamente tenorita. La Figura N°27 muestra un diagrama de rosas donde se aprecia que la tendencia estructural de las vetas en el proyecto Los Mantos está dividida en 3 sistemas, el principal de rumbo NE-SW, los secundarios E-W y NW-SE.

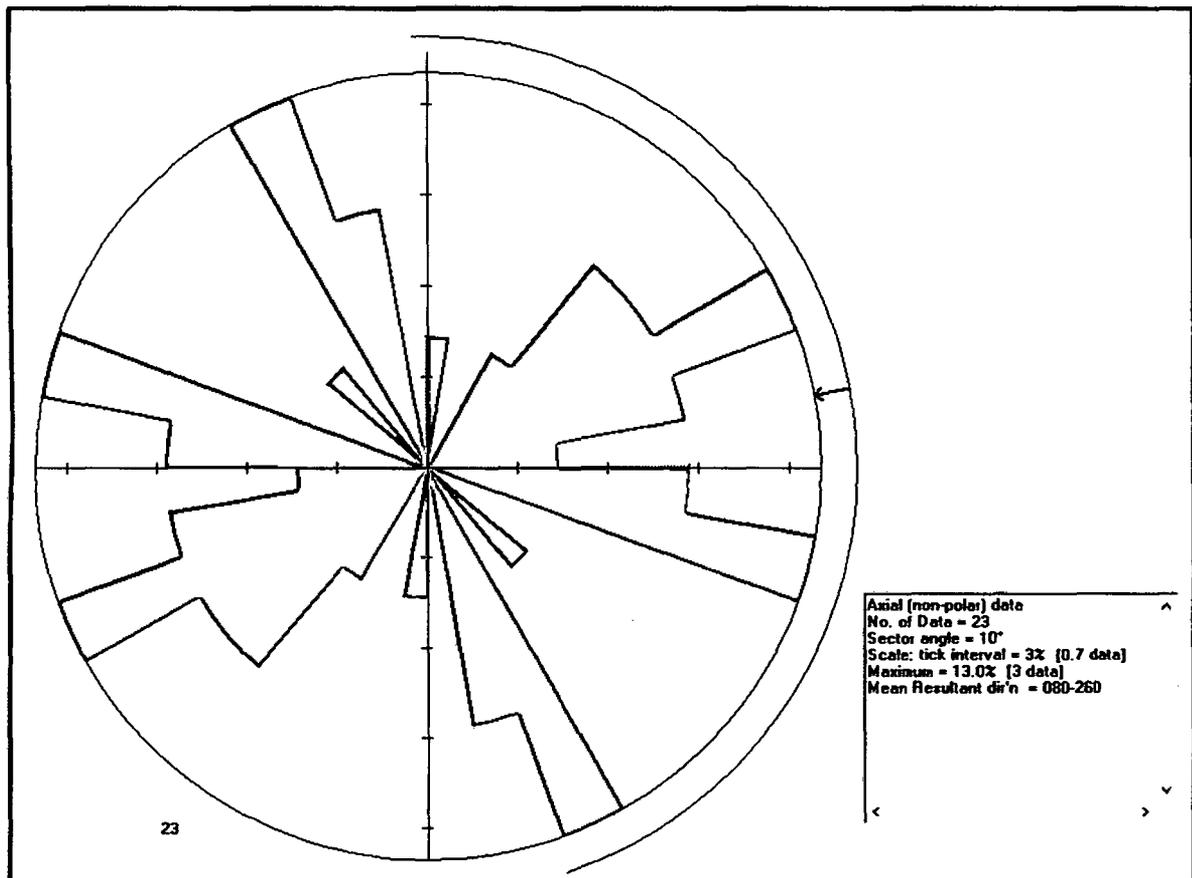


Figura N°27 – Diagrama de rosas de las vetas del Proyecto Los Mantos, total de datos de vetas n = 23.

Los datos de las vetas y vetillas mineralizadas en terreno dibujadas en el diagrama de polos de la Figura N°28, muestran la agrupación de los datos hacia el borde, evidenciando un régimen extensivo, el esfuerzo principal (σ_1) se sitúa hacia el ecuador E-W, el esfuerzo secundario (σ_2) es de rumbo N-S y el terciario (σ_3) vertical; de esto se desprende que en las vetas mineralizadas tienen una tendencia principal E-W y desarrollan un sistema tensional de rumbo NE-SW que corresponden al rumbo principal medido e identificado en terreno.

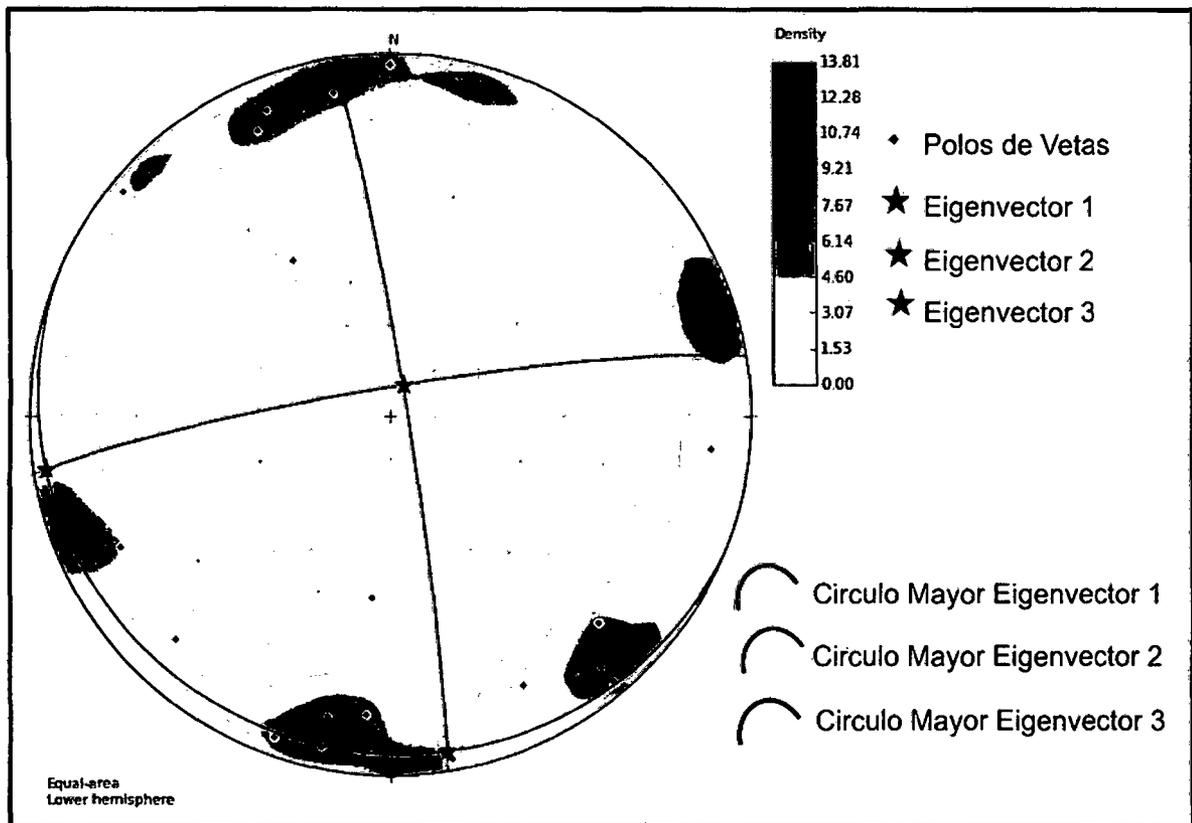


Figura N°28 – Diagrama de polos de las vetas del proyecto Los Mantos, en color verde, rojo y azul vectores de esfuerzo σ_1 , σ_2 y σ_3 respectivamente total de datos de vetas $n=23$.

Las fallas y vetas se encuentran emparentadas, debido a que en terreno se identificó estructuras mineralizadas emplazadas en fallas de rumbo NE-SW, así como vetas pertenecientes a este sistema; el análisis de datos entre ambas muestra que si bien es cierto no poseen el mismo sistema sí se complementan, es decir las fallas NE-SW representan los conductos (alimentadores) que favorecieron la migración de fluidos mineralizantes, mientras que las vetas corresponderían al sistema tensional de estas fallas, alojando las vetas en estructuras principalmente E-W y en menor medida NW-SE.

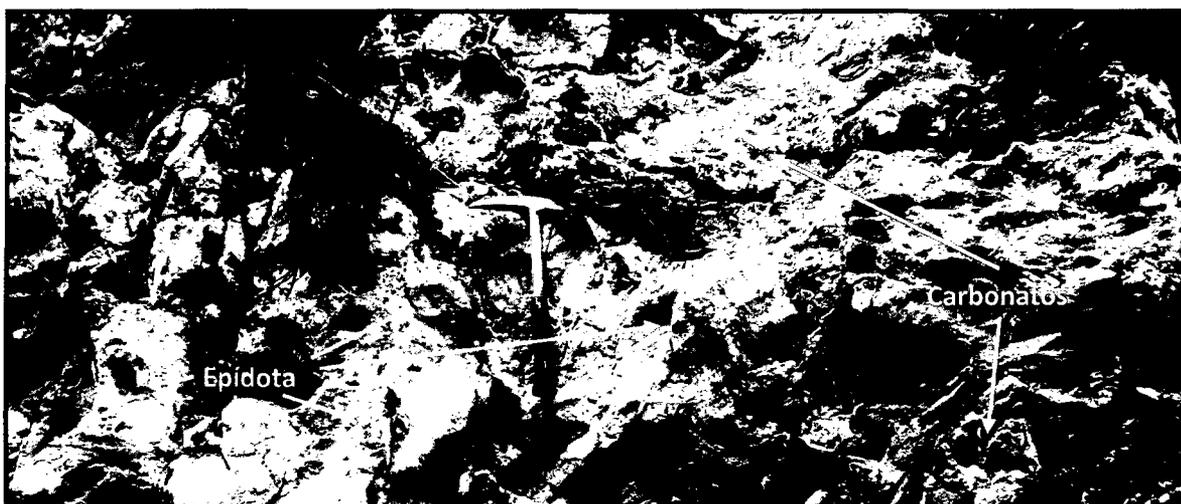
Para el caso de estructuras pertenecientes a la familia NW-SE, en terreno no se logró identificar asociación alguna a mineralización y en la mayoría de casos estas estructuras cortan y desplazan la mineralización con un movimiento principalmente horizontal (sinestrales), por lo que se asume que son posteriores a los eventos de mineralización y forman parte del evento tectónico que genera los mayores desplazamientos y basculamientos en el área de estudio.

4.1.3. Alteraciones

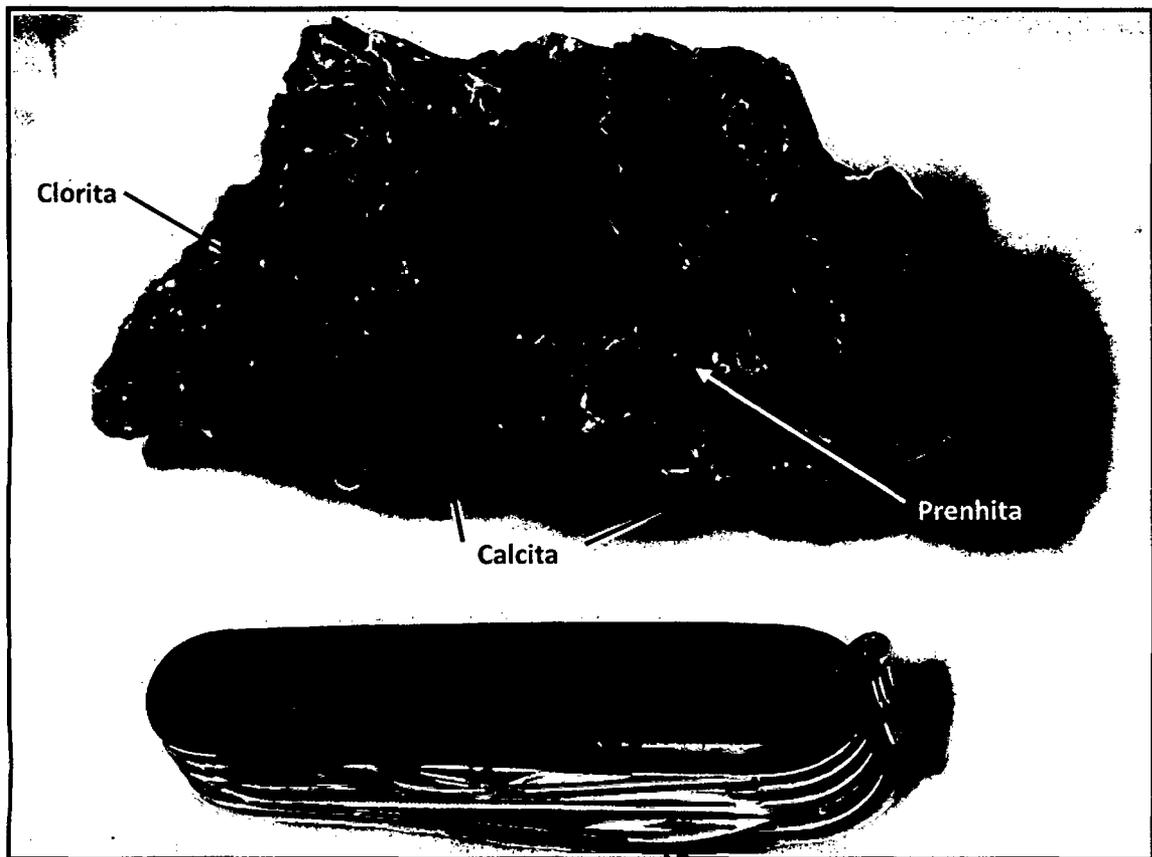
Dentro de las alteraciones identificadas en terreno (Plano N°04), el rasgo resaltante es la presencia de alteración Clorita – Epídota ± Prehnita que posee una extensión predominante en el área de trabajo. Las alteraciones de Sílice – Feldespato potásico / Baritina – Calcita ± Arcillas es más restringida y menos abundante.

4.1.3.1. Clorita – Epídota ± Prehnita

Alteración de gran dispersión en la zona de estudio y corresponde a una alteración de baja temperatura, caracterizada por el ensamblaje Clorita – Epídota ± Prehnita con ocurrencia muy escasa de Zeolitas, probablemente asociada a los eventos pre – minerales de metamorfismo de bajo grado (o de metasomatismo por emplazamiento de intrusivo profundo). Se desarrolla en las rocas volcánicas (Lavas, tobas y andesitas brechosas), afectando escasamente a los horizontes aglomerádicos presentándose a manera de bandeamientos o parches en las rocas (Fotografía N°24 y N°25), pero también posee un carácter selectivo, afectando principalmente a los fenocristales máficos y plagioclasas. Esta alteración no está asociada a presencia de mineralización.



Fotografía N°24 – Lavas andesíticas de textura porfírica fina a afaníticas, presentan parches de epidota y vetillas irregulares de carbonatos, aflora en el sector W del proyecto, Vista hacia el SW.



Fotografía N°25 – Muestra de mano de lava andesítica con alteración de calcita – clorita y prenhita, la alteración se presenta a manera de parche y rellenando oquedades de la roca.

4.1.3.2. Sílice ± Feldespato Potásico:

Esta alteración se presenta a manera de vetas y vetillas de sílice lechosa a hialina (Fotografía N°26 y N°27), desarrollando en ocasiones drusas, acompañada por escasa presencia de feldespato potásico rellenando oquedades ó como sutura en venillas.

Corresponden a inyecciones de sílice lechosa (calcedonia) en su mayoría, las cuales se presentan a manera de parches y vetas principalmente de hasta 1.5m de potencia (Fotografía N°28), con poco desarrollo de halo de alteración (halo argílico de 2m). Los cuerpos vetiformes presentan una dirección principal NE-SW y en menor medida NW-SE; las vetas se presentan cortando las secuencias de lavas andesíticas (autobrechas) principalmente, aunque hay ocurrencias menores de emplazamiento de las mismas en los horizontes aglomerádicos superiores.

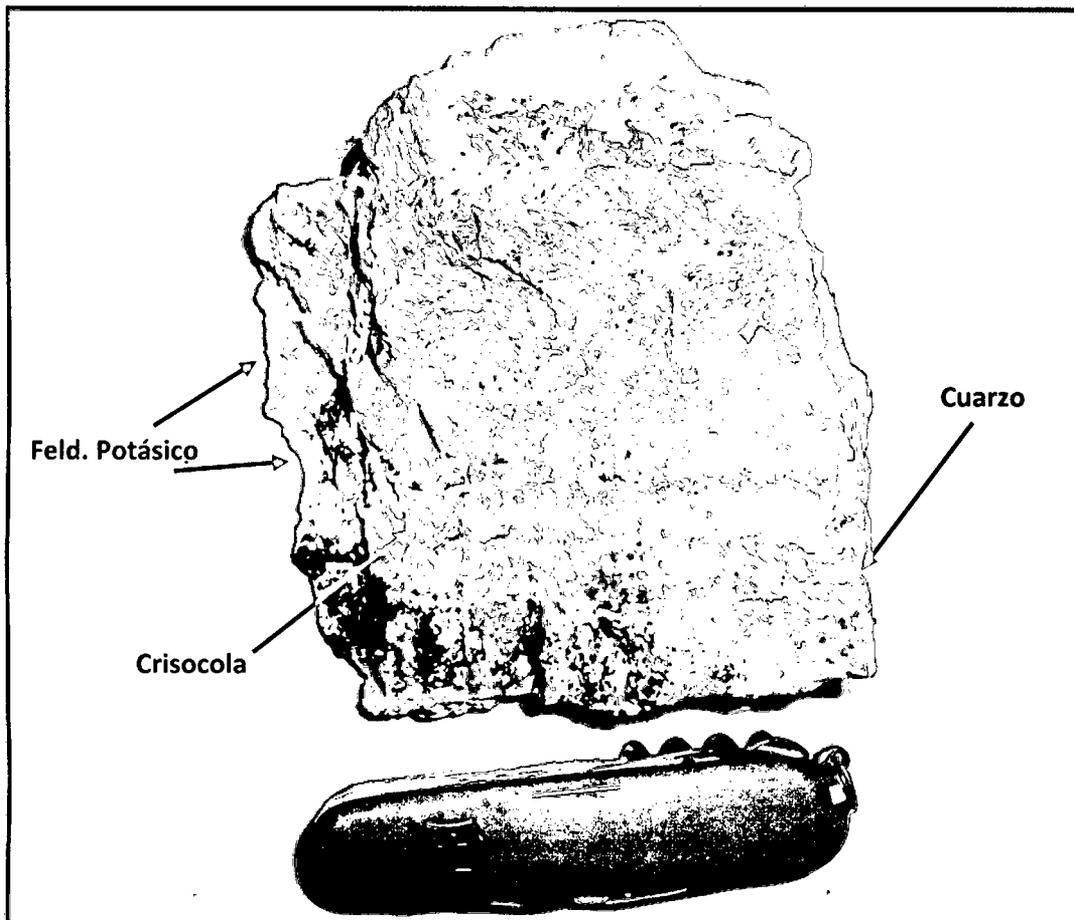
Esta alteración ocurre principalmente en el sector norte y suroeste de la zona de estudio. Las vetas se alojan en autobrechas y andesitas lávicas vesiculares, se estipula que esta alteración representa un evento asociado a mineralización ya que se encuentra en zonas donde están presentes óxidos de cobre (malaquita – crisocola – tenorita, etc).



Fotografía N°26 – Afloramiento de andesitas vesiculares con inyección de sílice lechosa y óxidos de hierro (hematita), expuesto hacia el NE Los Mantos, vista hacia el NE.



Fotografía N°27 – Inyección de sílice lechosa con feldespato potásico, genera brechamiento e inyección de crisocola, la potencia de estas vetillas es de 10 a 15cm en promedio, vista al S.

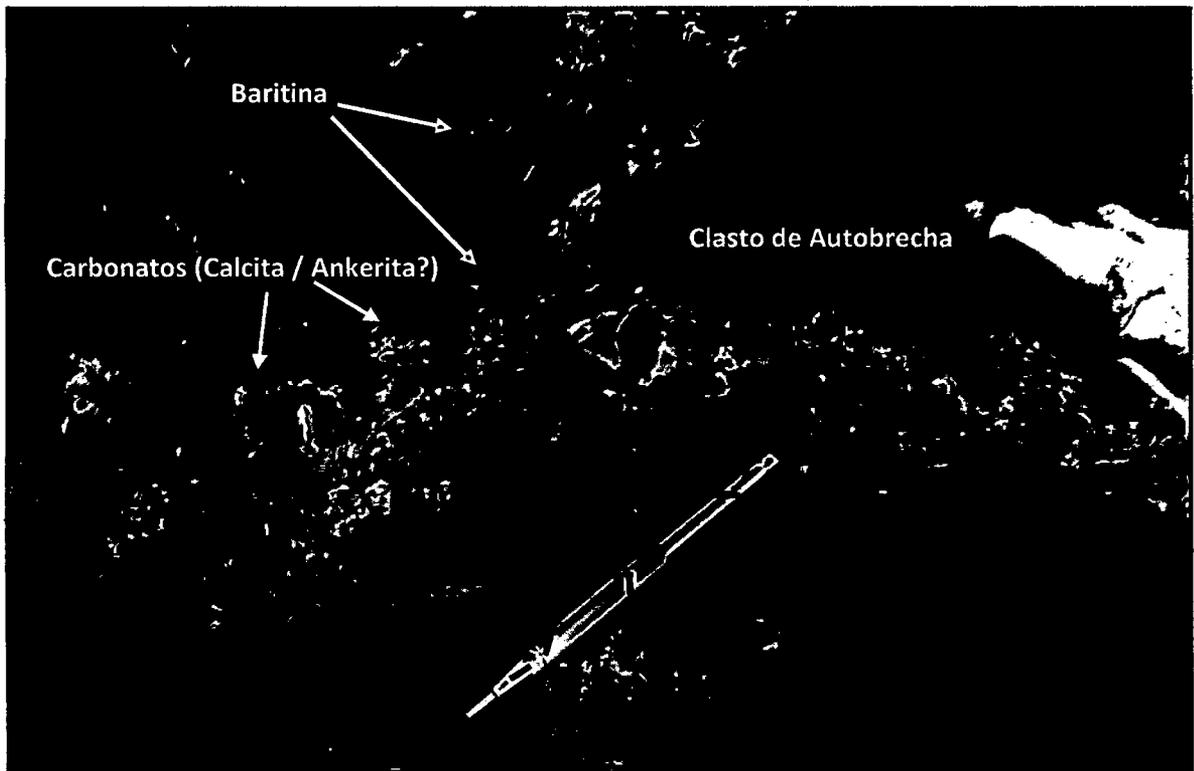


Fotografía N°28 – Muestra de mano, andesita gris cortada por vetilla de cuarzo (en rojo) con ortosa, presencia de crisocola fina en vetilla, la sílice también se encuentra rellenando oquedades de la roca.

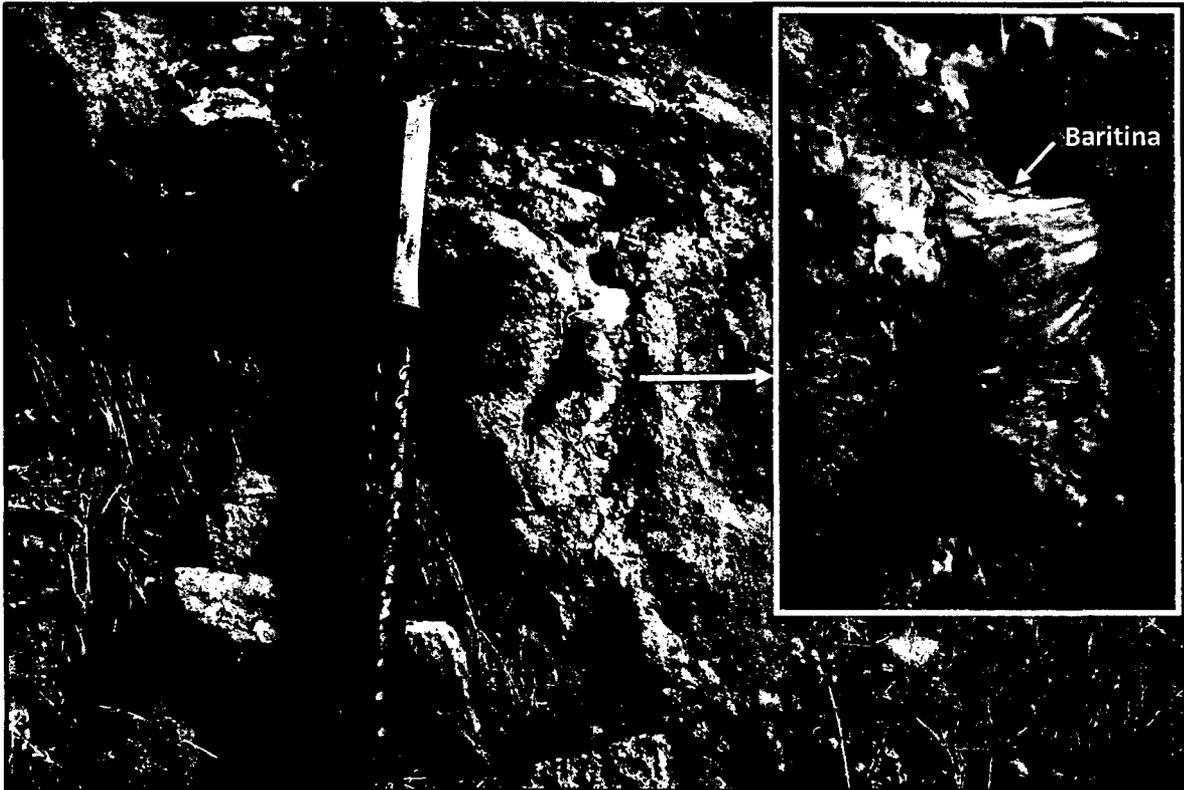
4.1.3.3. Baritina – Carbonatos ± Arcilla

Se observa esta asociación mineral a manera de relleno en fracturas y oquedades principalmente y/o como parches (Fotografía N°29 y N°30), alojados en la secuencia de lavas andesíticas autobrechadas, vesiculares y lahares en el sector norte y centro de la zona de estudio; se presenta de manera tabular cerca al contacto con los niveles calcáreos sedimentarios (Fotografía N°13). En observación macroscópica se identificó que baritina ocurre entre las inyecciones de sílice y en parte se encuentra sola; siendo a veces acompañada por calcita y arcillas (kaolinita, illita), por lo que podría tratarse de un evento diferente o posterior al de sílice ± feldespato potásico; donde ocurre baritina se tiene presencia de crisocola en mayor medida que malaquita (Fotografía N°31) y hacia los niveles inferiores aparece trazas de bornita; en análisis químico se identificó

contenidos altos de plata, pudiendo representar una asociación a eventos de mineralización de Cu y Ag. La potencia de esta zona de alteración es de 2 a 5m, el espesor en las venillas es centimétrico desarrollándose baritina a manera de suturas en estructuras de sílice y bornita relacionada a baritina.



Fotografía N°29 – Afloramiento de andesita Autobrechada, inyección de carbonatos-baritina y óxidos de hierro en matriz de roca (en rojo), crisocola presente a manera de parches dentro de las inyecciones, vista al NW.



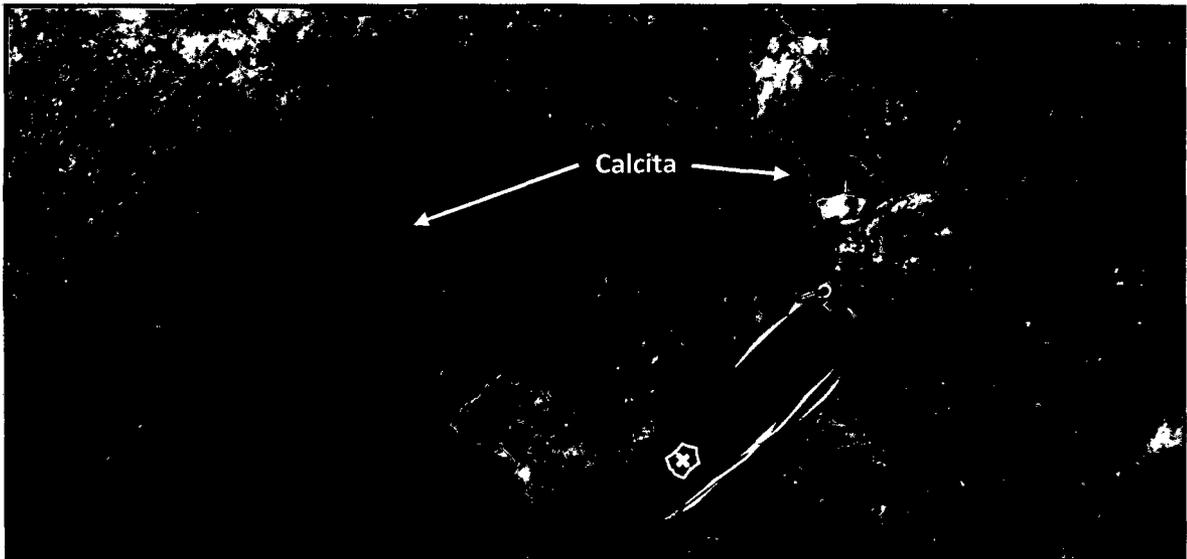
Fotografía N°30 – Andesita gris inferior, presenta baritina relleno oquedades acompañada por trazas de malaquita, afloramiento observado en zona central, vista al S.



Fotografía N°31 – Andesita vesicular, presenta relleno de oquedades por calcita y baritina, con inyección de calcopirita a manera de parches acompañada por galena. Sector central, vista al N.

4.1.3.4. Calcita

Se encuentran ocurrencias vetiformes aisladas en afloramientos volcano-sedimentarios (lavas y andesitas brechosas), se presenta a manera de parches y como vetas de rumbo N-S al este y suroeste de la zona de estudio, también se encuentran presentes en la zona de inyección (relleno de cavidades) al N y centro de Los Mantos; aparece a veces acompañando a baritina, pero la relación con la presencia de este mineral no es clara, generalmente se encuentra sola (Fotografía N°32); presumiblemente representa los últimos estadios de mineralización o un evento posterior.



Fotografía N°32 – Afloramiento de andesita lávica de textura porfirica fina, roca moderadamente cloritizada, presenta parches de calcita, expuesta en el sector W de Los Mantos, vista al N.

4.1.4. Mineralización

La mineralización en su mayoría se encuentra representada por óxidos de cobre como crisocola, malaquita, tenorita y azurita, en menor grado minerales sulfurados representados por calcopirita, bornita y galena (Plano N°05); asociada principalmente a zonas de ocurrencia de inyección y vetas irregulares de sílice, baritina y calcita, como sobreimposición a la alteración Clorita – Epidota.

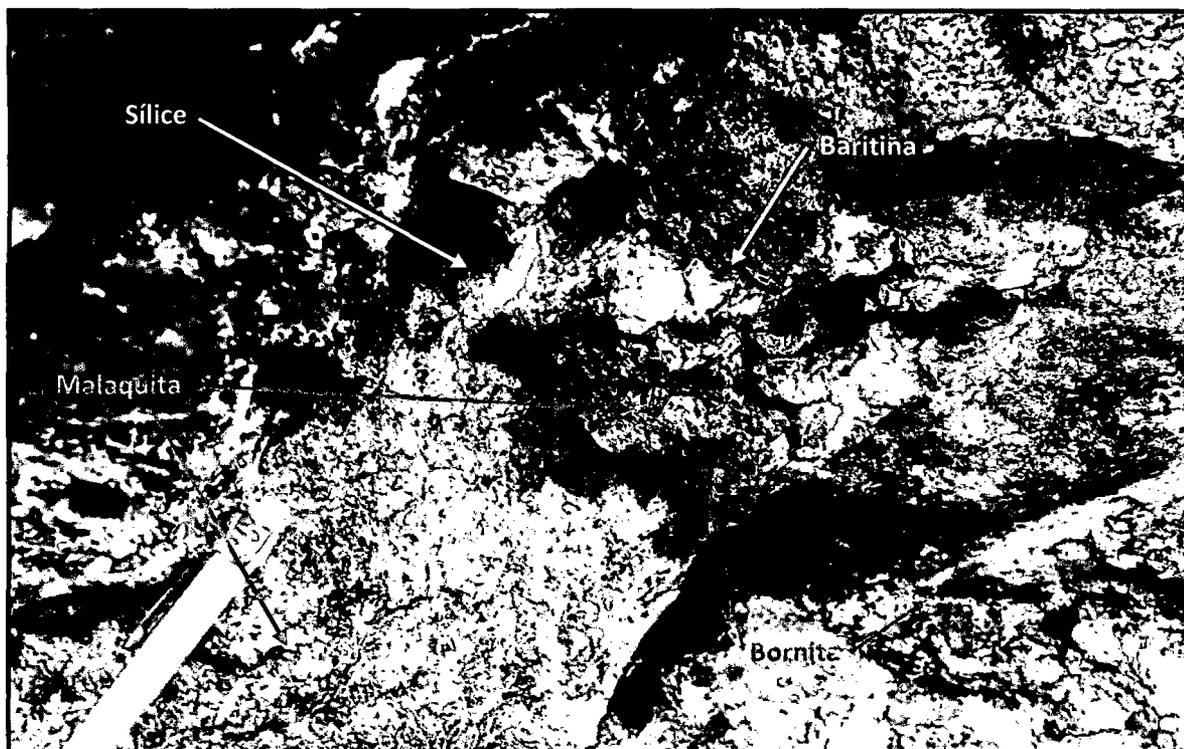
4.1.4.1. Óxidos de Cobre

La ocurrencia de óxidos de cobre se encuentra distribuida de manera mantiforme (sub-horizontal) regular, alojada en la secuencia de lavas andesíticas vesiculares y autobrechadas; esta zona está asociada a alteración de sílice \pm feldespato potásico y Baritina \pm Carbonatos, la cual se presenta a manera de inyección (relleno de oquedades), parches y venillas centimétricas irregulares en el contacto superior de esta litología (coladas lávicas vesiculares y autobrechadas) con los horizontes sedimentarios lagunares (calizas y lutitas) (Fotografía N°33).



Fotografía N°33 – Mineralización de crisocola en andesita Autobrechada, matriz afectada por inyección de sílice, baritina y carbonatos, desarrollo de cuerpo mantiforme (4m potencia) hacia el contacto suprayacente con secuencias lagunares calcáreas; afloramiento en zona central, vista al NW.

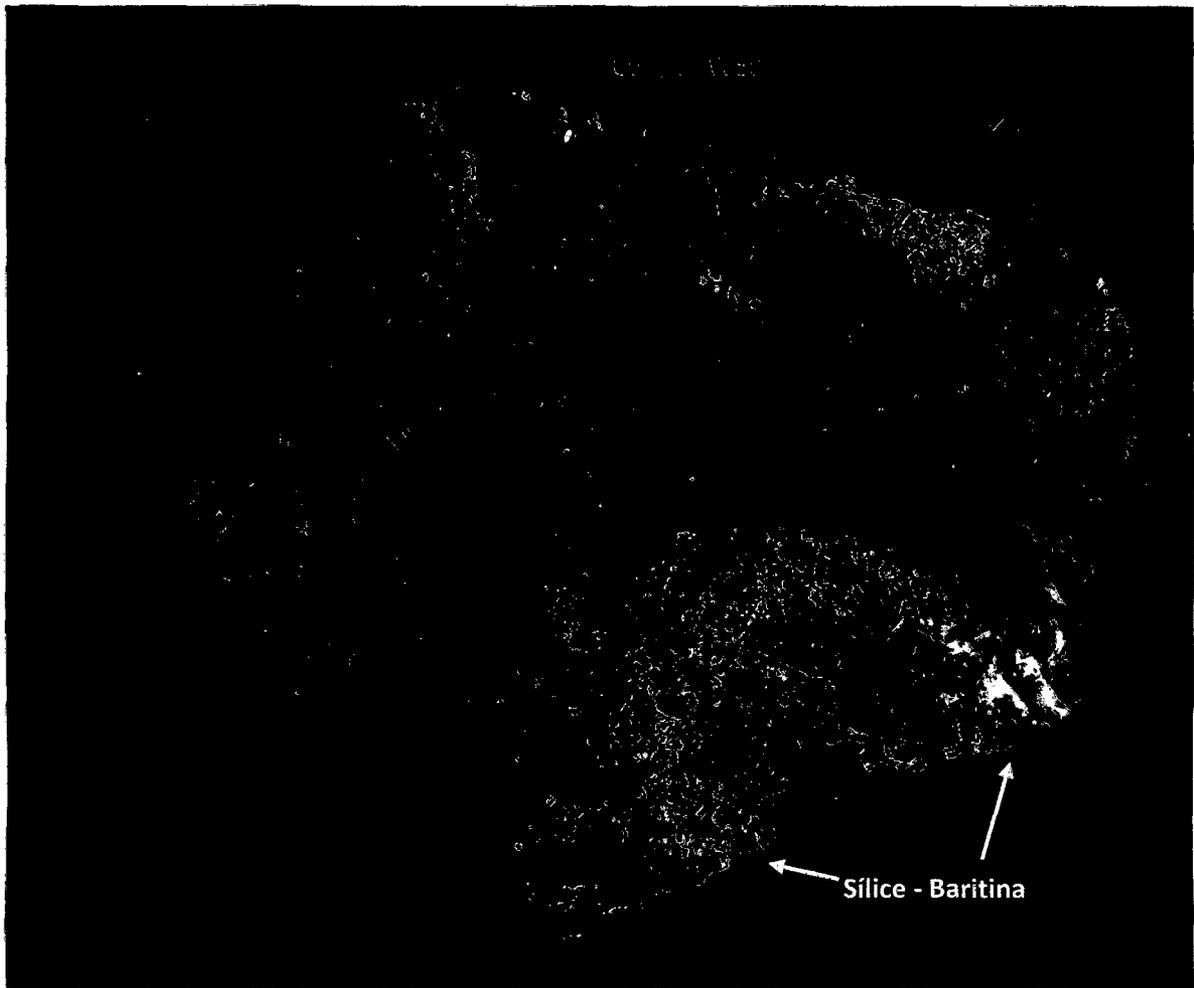
En estos cuerpos mantiformes la mena de óxidos de cobre es en gran parte representada crisocola y en menor medida malaquita (Fotografía N°34), encontrándose escasamente azurita, tenorita y copper wad.



Fotografía N°34 – Malaquita reemplazando a bornita en parches sílice – baritina acompañado por jarosita y hematita, afloramiento de andesita brechosa en el sector SW de Los Mantos, vista al NE.

El cuerpo mantiforme de óxidos tiene una geometría regular con una potencia variable de 2 – 5m. Fueron identificados gracias a trabajos extractivos de mineros artesanales, que trabajaron estas zonas en búsqueda de minerales de alta ley ($>1.5\%$ Cu), los trabajadores denominaron a las zonas productivas Cardonal y Cony (a la zona NE y SW respectivamente, dentro del sector de trabajo).

Los ejemplares de óxidos identificados corresponden a crisocola > malaquita y poca presencia de azurita, tenorita y copper wad (Fotografía N°35); estas zonas de óxidos no profundizan más allá de la zona de alteración de sílice-baritina-calcita (potencia de 5m).



Fotografía N°35 – Muestra de mano, de afloramiento de Foto N°34, venilla de sílice - baritina con bornita, reemplazamiento de esta última por malaquita y copper wad, el reemplazamiento es a manera de parches (rellenos); afloramiento al SW.

4.1.4.2. Sulfuros

Al igual que la zona de óxidos, los sulfuros se alojan en andesitas autobrechadas y andesitas vesiculares. Se encuentra infrayaciendo los cuerpos de óxidos, la transición hacia esta zona está marcada por un débil desarrollo de horizonte mixto (sulfuros y óxidos) de 1m de potencia. Los ejemplares de sulfuros identificados por métodos macroscópicos están dados en proporción por bornita, calcopirita, galena, pirita y esfalerita.

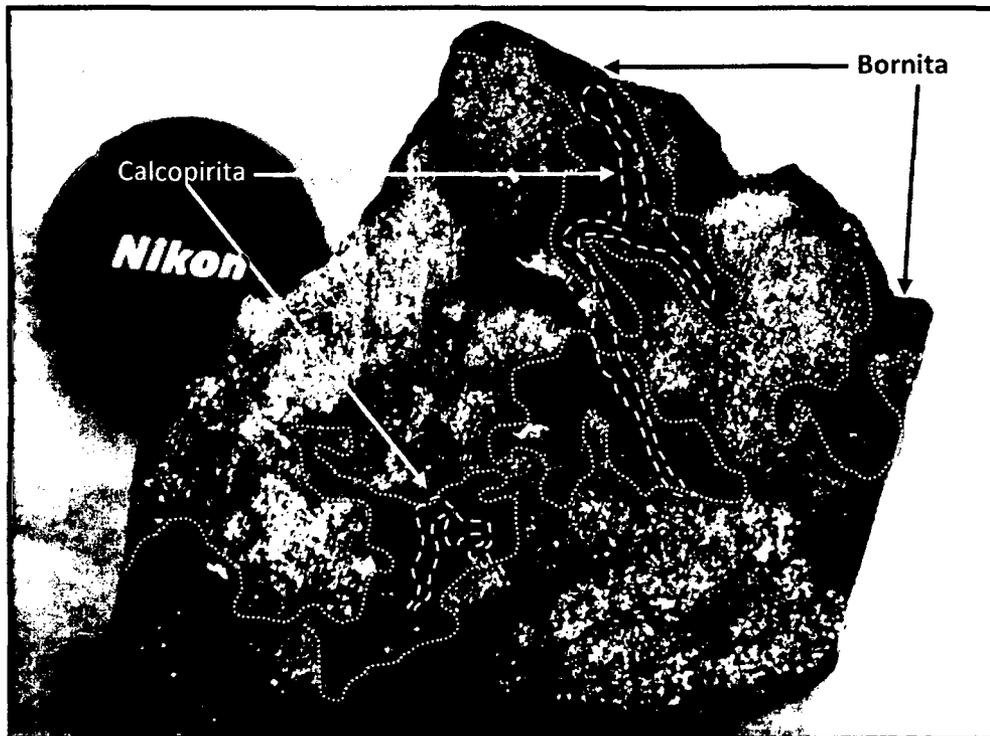
La alteración que acompaña la ocurrencia de estos minerales es principalmente sílice \pm feldespato potásico (escasa ocurrencia) y baritina; se presenta a manera de vetillas (Fotografía N°36), parches (Fotografía N°37) y en menor medida como diseminación. La tendencia estructural

preferencial identificada en terreno corresponde al sistema NE-SW y en menor medida E-W. En base a observación macroscópica se logra definir que las menas sulfuradas de bornita – calcopirita están relacionadas a la presencia de sílice ± feldespato potásico – baritina; por ello se consideran los eventos principales de mineralización, mientras que la presencia de galena ± esfalerita está relacionada a calcita ± sílice principalmente, implicando eventos o estadios diferentes de mineralización.

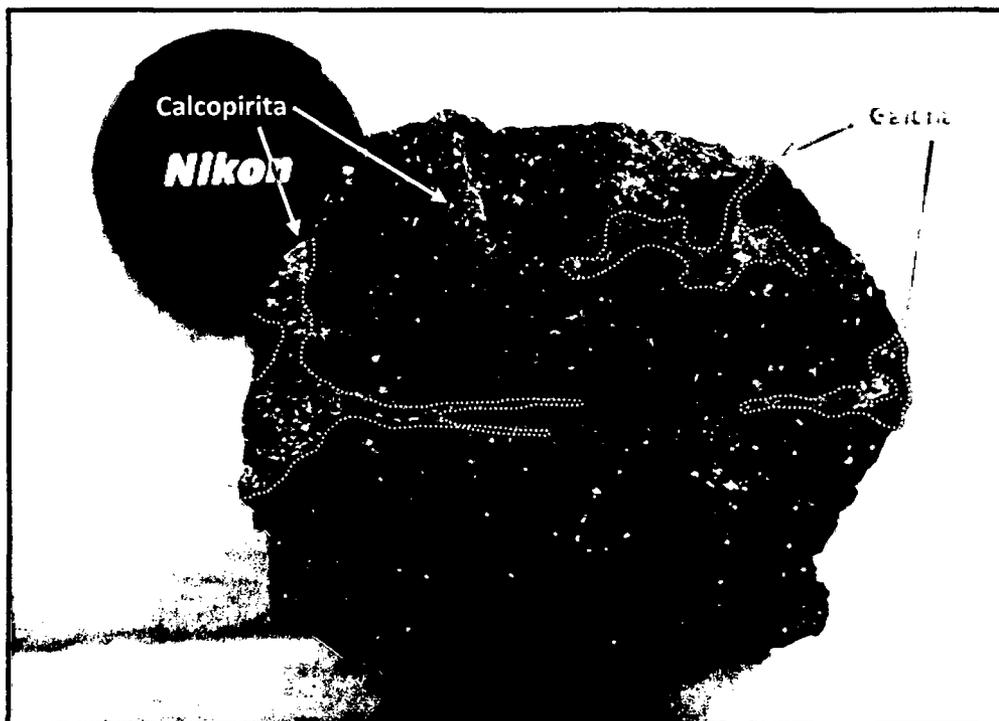


Fotografía N°36 – Veta de calcopirita masiva con cuarzo en andesita vesicular, la veta se encuentra cortada por vetillas de calcita, afloramiento sector central Los Mantos, vista al N.

El zonamiento está definido por una región de bornita central concéntrica y de alta ley (muestras puntales de 6% Cu), hacia el exterior se tiene un sector donde aparece calcopirita (bornita >> calcopirita), inclusive llegando a ser la concentración de esta última mayor conforme nos alejamos de la zona central (calcopirita >> pirita) (Fotografía N°38), la ocurrencia de galena ± esfalerita está presente en el sector de calcopirita y hacia el exterior de la misma inclusive, la presencia de pirita indica regiones distales del sistema.



Fotografía N°37 – Muestra de mano de andesita vesicular propilitizada con parches de bornita y reemplazamiento de calcopirita.



Fotografía N°38 – Ejemplar de mano de andesita vesicular verdosa cortada por vetilla centimétrica de galena con halos de calcopirita, se encuentra calcopirita disseminada, reemplazando cristales máficos.

El rasgo más resaltante en la zona de sulfuros es la exclusividad de menas de Cu (bornita, calcopirita) encontrándose escasamente presencia de galena y esfalerita. Los ensayos químicos de Cu y Ag, muestran elevados valores para ambos elementos, pero no definiéndose de manera macroscópica la identidad de las menas involucradas en la presencia de plata, por lo que se presume, podrían tratarse de galenas argentíferas tan finas que escapan al análisis macroscópico.

4.1.5. Geoquímica

Para la geoquímica se consideran un análisis de roca por Cu y Ag por el método de digestión en agua regia y lectura mediante equipo de adsorción atómica (AAS) en laboratorio de Compañía Minera Cerro Negro; la población de datos corresponde a 73 muestras de afloramiento rocoso muestreados en chips y canales tomadas en campaña de muestreo selectivo; para la elaboración de los planos de isovalores se considera los rangos definidos por el área de geología de Compañía Minera Cerro Negro SA (Figura N°29) (Planos N°06 y N°07).

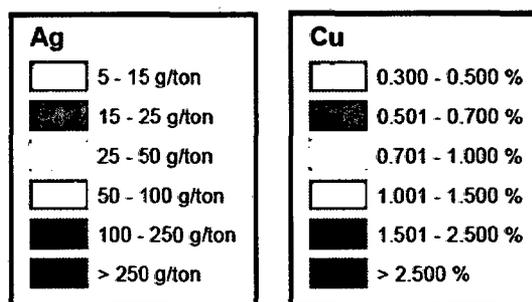


Figura N°29 – Rangos Geoquímicos de cobre (Cu) y plata (Ag)

También se hizo un análisis de litologías y alteraciones relacionadas con las mineralizaciones de Cu y Ag (Cuadros N°01 al N°04), para lo cual se utilizó Excel y la herramienta Spatial Analysis de ArcGis.

Cuadro N°01 – Datos de análisis de CuT, data distribuida estadísticamente por litologías;
min=mínimos, max=máximos, Q1=percentil 25, Q2=media, Q3= percentil 75.

CuT							
	Andesita	Autobx	Andesita Gris	Bx Volc	Caliza	Diorita	Monzonita
min	0.05	0.23	1.03	0.02	0.16	0.05	0.14
q1	0.16	0.945	1.115	0.14	1.825	0.071	0.163
q2	0.68	1.23	1.20	0.63	2.54	0.17	0.19
q3	1.62	1.535	2.715	1.4325	3.5675	0.346	0.38
max	3.81	5.20	4.23	3.37125	6.18125	0.58	0.57
max-q3	2.19	3.67	1.52	1.94	2.61	0.23	0.19
q1-min	0.11	0.71	0.09	0.12	1.67	0.02	0.03
max	6.33	5.20	4.23	7.60	6.20	0.58	0.57
lower limit	-2.03	0.06	-1.285	-1.79875	-0.78875	-0.3415	-0.1625
high limit	3.81	2.42	5.115	3.37125	6.18125	0.7585	0.7055

Cuadro N°02 – Análisis de Ag, data distribuida estadísticamente por litologías; min=mínimos,
max=máximos, Q1=percentil 25, Q2=media, Q3= percentil 75.

Ag							
	Andesita	Autobx	Andesita Gris	Bx Volc	Caliza	Diorita	Monzonita
min	2	11	19	3	27	5	3
q1	6	16.5	39	11	42.75	6	3.5
q2	13	28	59	24.5	63	8	4
q3	32.75	87.5	329.5	47.75	101.75	9	131.5
max	72.875	194	600	102.875	173	9	259
max-q3	40.125	106.5	270.5	55.125	71.25	0	127.5
q1-min	4	5.5	20	8	15.75	1	0.5
max	249	450	600	578	173	9	259
lower limit	-34.125	-90	-396.75	-44.125	-45.75	1.5	-188.5
high limit	72.875	194	765.25	102.875	190.25	13.5	323.5

Cuadro N°03 – Análisis de CuT, data distribuida estadísticamente por alteraciones, min=mínimo, max=máximo, q1= percentil 25, q2=media, q3= percentil 75.

CuT				
	Cl-Ep	Veta Si	Si-Bar-Clc	Si-Kspar
min	0.03	0.05	0.02	0.07
q1	0.06	0.288	0.345	0.296
q2	0.20	0.91	0.95	1.03
q3	1.23	3.625	1.2075	2.55
max	1.74	7.60	2.50125	5.2
max-q3	0.51	3.98	1.29	2.65
q1-min	0.03	0.24	0.33	0.23
max	1.74	7.60	4.30	5.20
lower limit	-1.695	-4.7175	-0.94875	-3.085
high limit	2.985	8.6305	2.50125	5.931

Cuadro N°04 – Análisis de Ag, data distribuida estadísticamente por alteraciones, min=mínimo, max=máximo, q1= percentil 25, q2=media, q3= percentil 75.

Ag				
	Cl-Ep	Veta Si	Si-Bar-Clc	Si-Kspar
min	2	3	3	5
q1	5	9.5	14	10.5
q2	6	17	25	19
q3	38	63	43	87
max	87.5	143.25	86.5	201.75
max-q3	49.5	80.25	43.5	114.75
q1-min	3	6.5	11	5.5
Max	100	600	249	450
lower limit	-44.5	-70.75	-29.5	-104.25
high limit	87.5	143.25	86.5	201.75

Se realizaron gráficas con la finalidad de definir la agrupación de valores o rangos de interés económico para el caso de Cu y Ag, con estos se crearon cuadros de comparación de rangos máximos y mínimos para definir la afinidad de estos elementos a los distintos tipos de litologías y alteración.

4.1.6. *Microscopía (Secciones pulidas y Microsonda)*

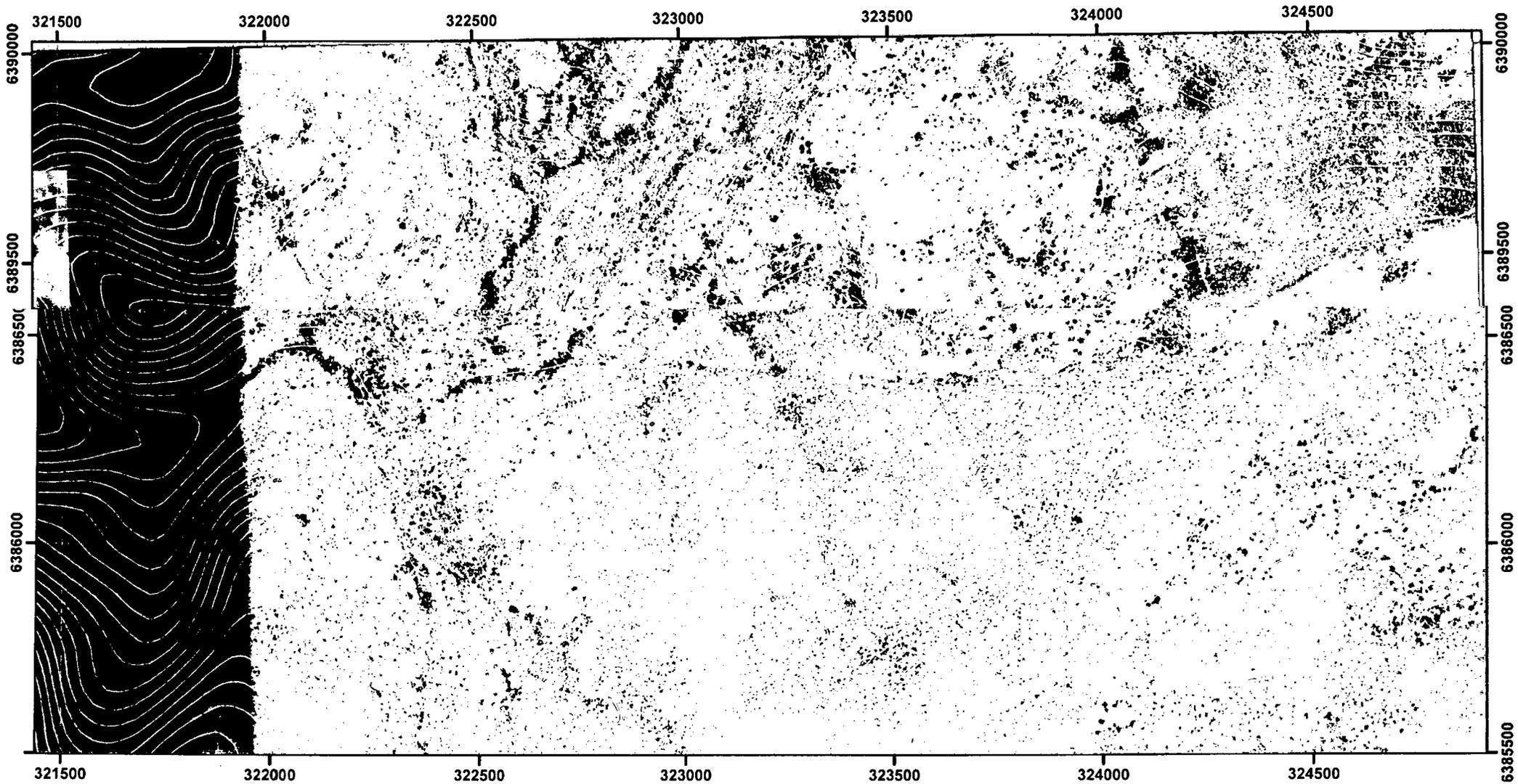
Se consideró una población de 5 muestras para estudio de microscopía (secciones pulidas); las muestras corresponden a ejemplares mineralizados (sulfuros principalmente) de las zonas más representativas halladas en el Proyecto Los Mantos (Tabla N°05, Plano N°08).

En la Tabla N°05 se muestra la ubicación de las muestras enviadas a análisis microscópico, así como su descripción macroscópica. Como parte adicional del trabajo de microscopía se pudo realizar estudio de Microsonda; el cual consiste en un barrido microscópico electrónico con la finalidad de obtener la composición química (análisis cuantitativo) de los minerales identificados en muestras microscópicas en una superficie muy pequeña (a escala micrométrica); lo cual permite un análisis in situ de granos minerales individuales, con la finalidad de determinar porcentaje y peso de las fases presentes en una muestra, así como la fórmula estequiométrica de cada una de ellas.

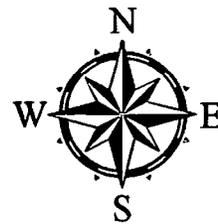
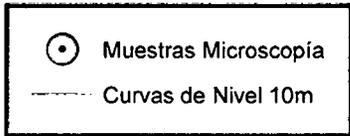
Tabla N°05 – Ubicación de muestras para estudio de microscopía y microsonda con descripción macroscópica

MUESTRA	SECTOR	E	N	Z	LITOLOGÍA	ALTERACIÓN	MINERALIZACIÓN	DESCRIPCIÓN
M-1	CONY	323158	6386633	1197	Andesita vesicular	Cl - Ep > Alb - Clc	Cp - Py - Sp	Roca de textura porfírica media con fenos subhedrales a euhedrales de plagioclasa, matriz granular fina color verdosa, presenta máficos (piroxenos?) cloritizados en su mayoría; nivel lávico andesítico de piroxenos? Alt. Ep-Cl, cortada por vetilla de Alb -Clc cortada por vetilla de sulfuros masivos amarillos (Cp-Py) con trazas de Sphal y Ga?
M-2	CARDONAL	323642	6388337	1263	Andesita autobrecha	Bar - Clc	Bo - Cv > Mq	Roca de textura porfírica fina fenos euhedrales de plagioclasa, matriz granular; Andesita autobrechada cortada por veta de Bar - Clc, debil alteración Clay con Bo y pátina de Cv, Mq y FeOx (Goe)
M-3	PORTALES	324498	6388990	1274	Caliza	Sl - Clc	Mq - Crs > Bo - Cp	Roca clástica carbonatada con bitumen, caliza arenosa fétida carbonosa, con CuOx (Mq > Crs) y trazas de Bo > Cp fina diseminada
M-4	CONY	323132	6386915	1220	Andesita vesicular	Cl - Ep	Bo - Cp > Py	Colada andesítica vesicular de piroxenos con veta de Bo y sulfuros masivos (Cp > Py), cortando estructuras de calcita
M-5	CONY	323260	6387318	1236	Andesita vesicular	Cl - Ep - Clc	Ga > Py - Cp	Andesita vesicular parda, debil argilización, alteración Cl - Ep - Clc (Metasomatismo?) cortada por vetilla de Ga > Py - Cp

Alb: Albita, Bar: Baritina, Bo: Bornita, Cl: Clorita, Clc: Calcita, Cp: Calcopirita, Crs: Crisocola, CuOx: Óxidos de Cobre, Ep: Epidota, FeOx: Óxidos de Hierro, Ga: Galena, Goe: Goethita, Mq: Malaquita, Py: Pirita, Sp: Esfalerita.

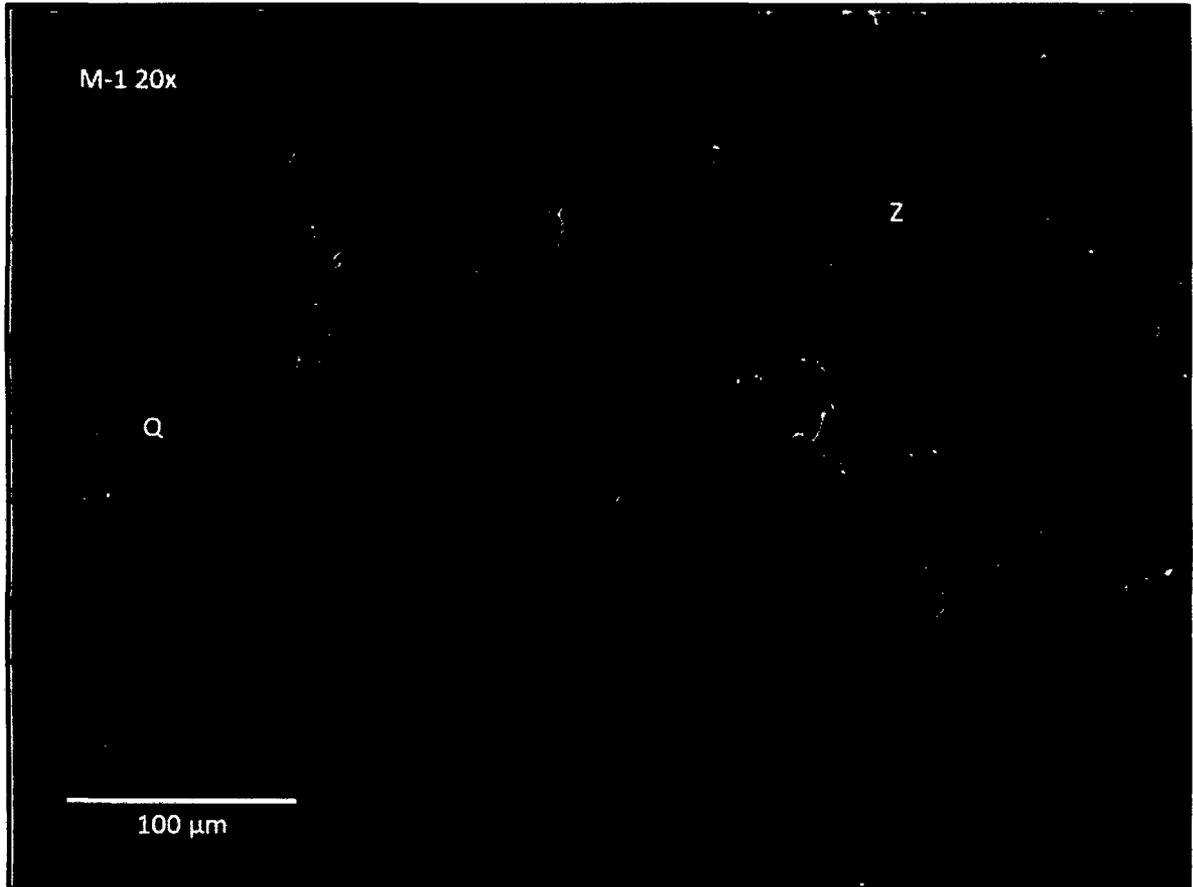


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA				
FACULTAD DE INGENIERÍA				
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA				
TESIS	"MODELO GENÉTICO DEL PROYECTO LOS MANTOS, PROVINCIA DE ACONCAGUA - REGIÓN DE VALPARAÍSO - CHILE"			
PLANO	UBICACIÓN DE MUESTRAS PARA MICROSCOPIA			
ASESOR	DR. ING. ALEJANDRO LAGOS MANRIQUE	PROVINCIA	ACONCAGUA	PLANO N°08
TESISTA	DAVID A. ARRIBASPLATA ROJAS	REGIÓN	VALPARAÍSO	
ESCALA	1: 12 500	PAÍS	CHILE	



Los resultados de laboratorio obtenidos se muestran a continuación:

M-1: Andesita Vesicular

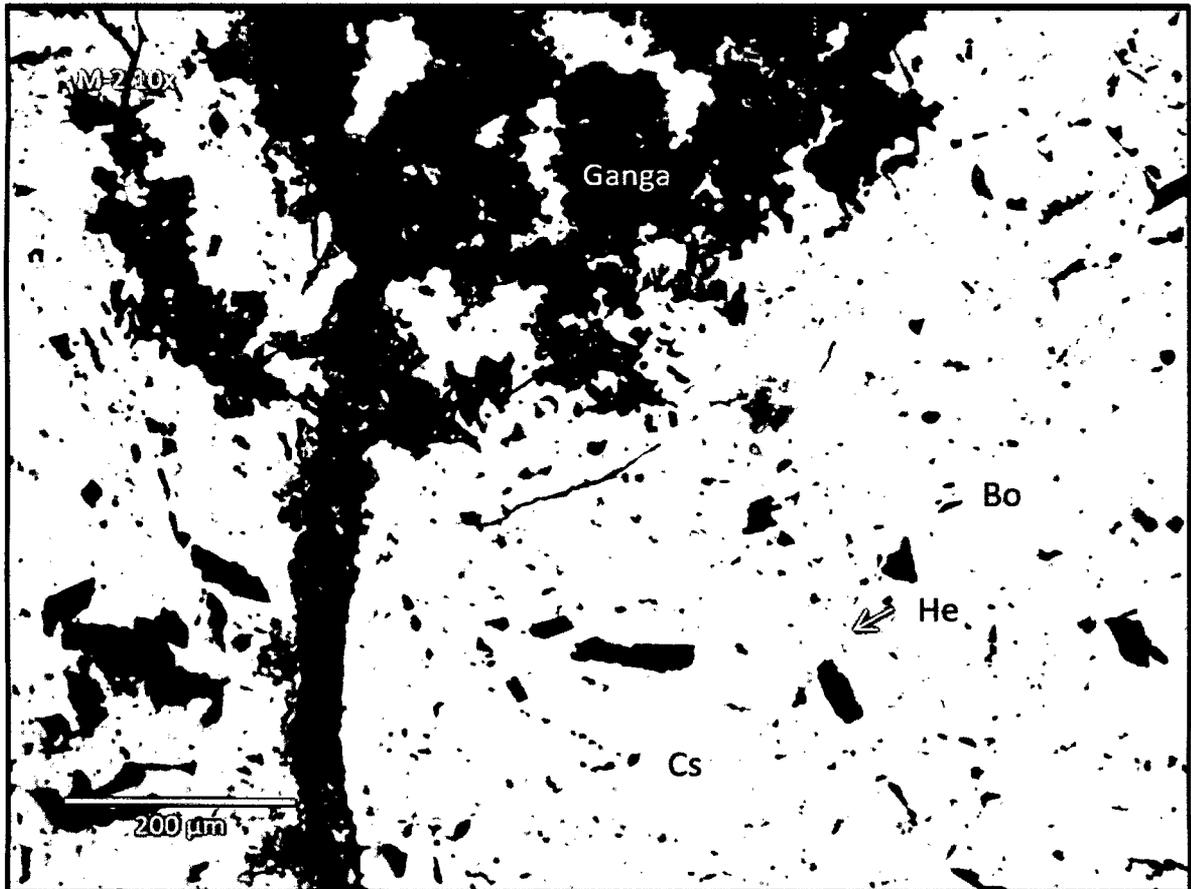


Microfotografía N°03 – Muestra M-1 sector SW de Los Mantos, veta de cuarzo con calcopirita cortada por vetillas de albita – carbonatos, sección pulida objetivo 20X.

Al microscopio con objetivo 20X se puede observar en la Microfotografía N°03 que el primer sulfuro depositado es Pirita FeS_2 (Py) blanco, de mayor reflectancia y dureza. Su textura (bandeamiento, estructura reniforme) indica cristalización de baja temperatura (menos o alrededor de 100°C) que podría haber sido el mineral marcasita FeS_2 (por los cristales originalmente tabulares, radiales), posiblemente de una solución coloidal (etapa diagenética). Pero ha sido recalentado y recristalizado, ya que es ahora isótropo, con la estructura de pirita. Calcopirita CuFeS_2 (Cp) de color amarillo, ha reemplazado parte de la pirita, que persiste como islas en la calcopirita. El mineral oscuro azulado es una zeolita o pumpellita $\text{Ca}_2\text{MgAl}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$, mineral de

metamorfismo de bajo grado. El mineral más tardío es cuarzo SiO_2 (Q), o calcita, en negro por no reflejar la luz.

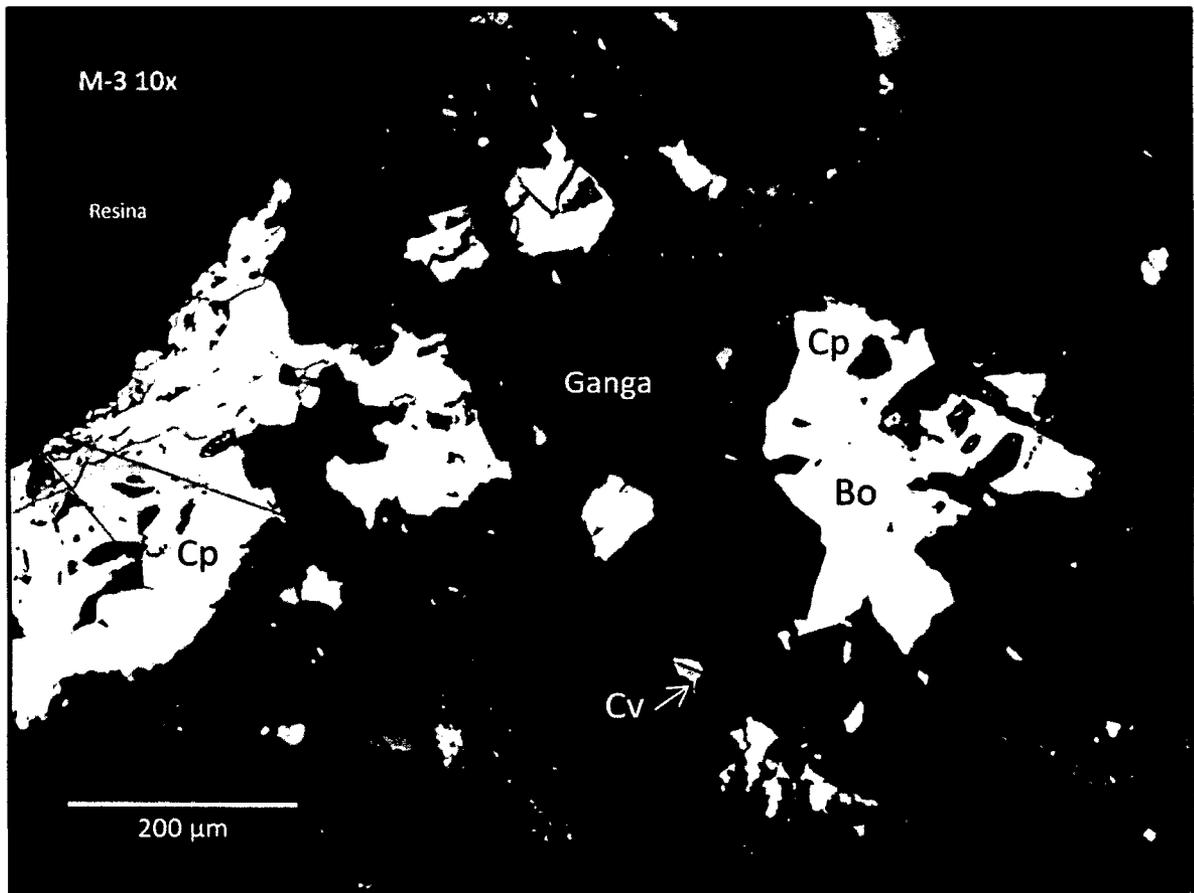
M-2: Andesita Autobrecha



Microfotografía N°04 – Muestra M-2, sector NW Los Mantos, vetilla centimétrica de bornita cortando andesita Autobrechada, sección pulida objetivo 10X.

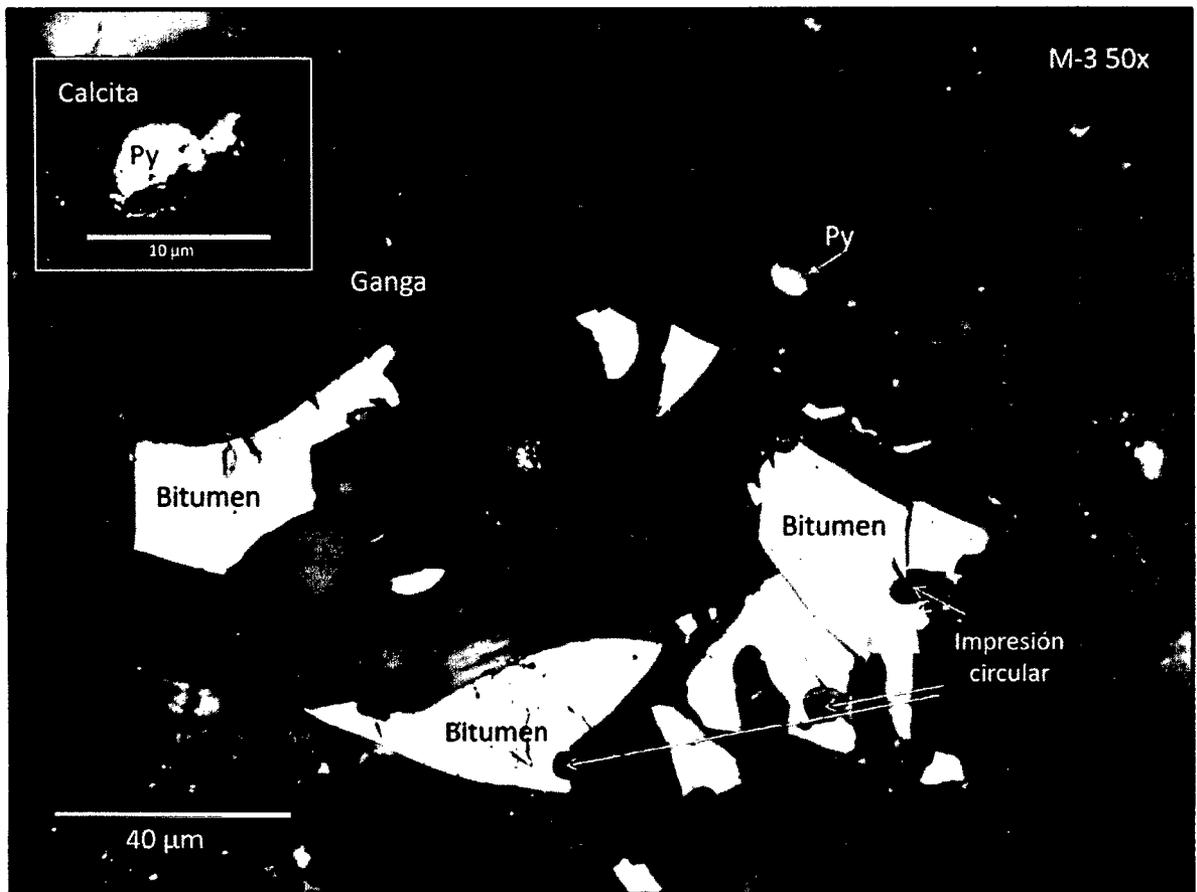
Microfotografía N°04 muestra Bornita Cu_5FeS_4 (Bo) de color pardo anaranjado, parcialmente reemplazada por Calcosina Cu_2S (Cs) azul, anisotrópico a lo largo de fracturas, probablemente un efecto tardío de oxidación. El exceso de Fe en la conversión de Bornita a Calcosina se expresa en la presencia de Hematita Fe_2O_3 (He) u óxidos hidratados de hierro.

M-3: Caliza



Microfotografía N°05 – Muestra M-3, extremo NE Los Mantos, sección pulida objetivo 10X.

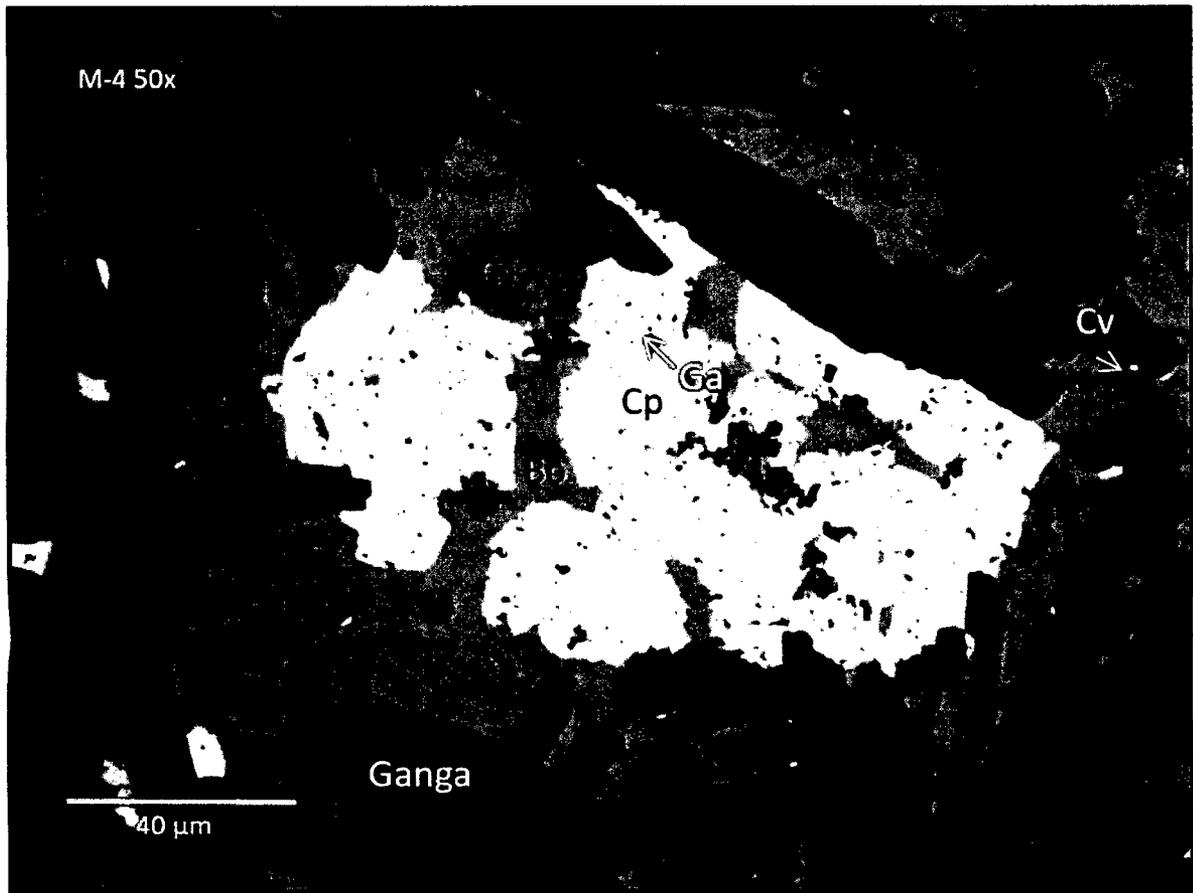
Microfotografía N°05 a objetivo 10X de mena con Bornita Cu_5FeS_4 (Bo) y Calcopirita CuFeS_2 (Cp). Ambos minerales parecen haber cristalizado simultáneamente, aunque es posible que la Calcopirita cristalizó primero (hay islas de Cp en Bo). Existe una pequeña proporción de Covelina (Cv) dentro de la ganga que puede ser cuarzo o calcita. La parte superior izquierda de la foto es resina (epoxy) del montaje.



Microfotografía N°06 – Muestra M-3, zona NE Los Mantos, Luz reflejada objetivo 50X.

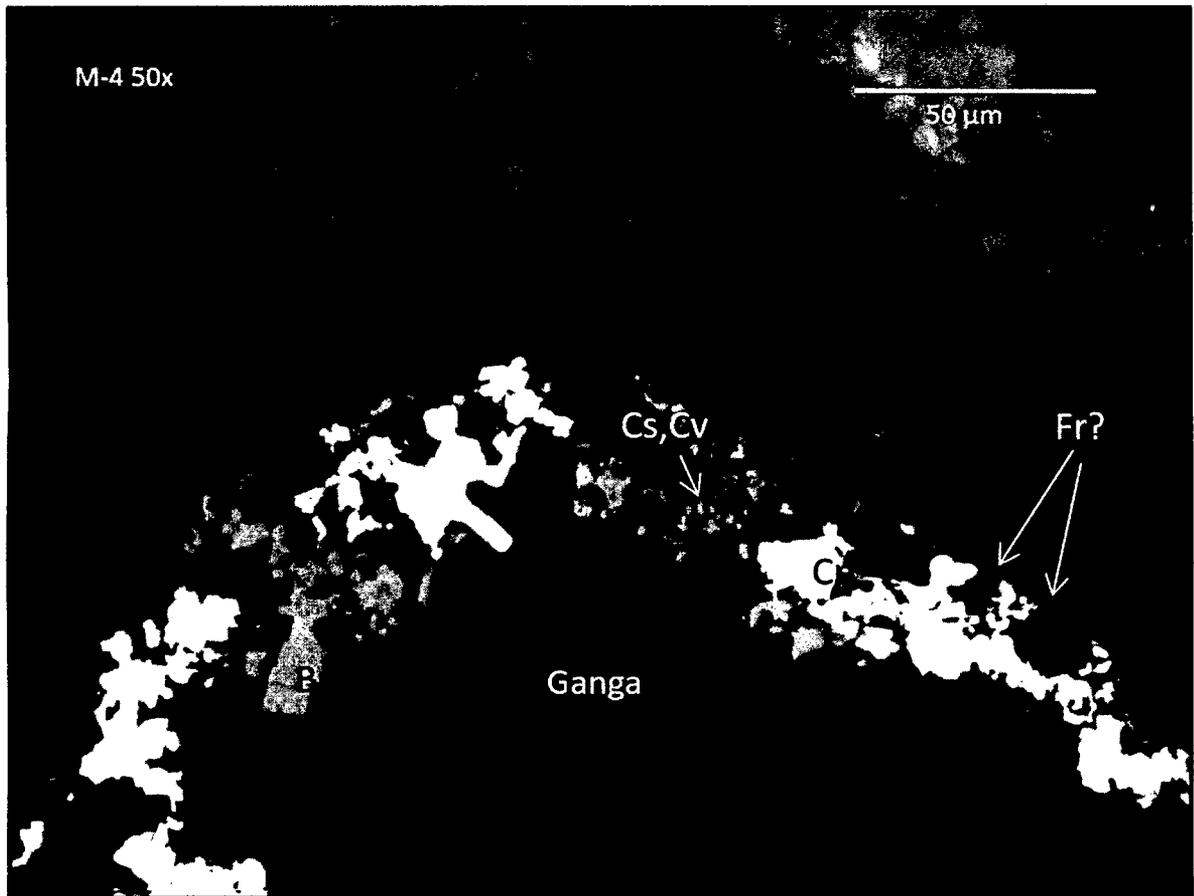
Microfotografía N°06 Luz reflejada de muestra M-3 con objetivo 50x. La fase gris claro es Bitumen (petróleo solidificado) en ganga gris oscuro (mayormente calcita). El bitumen es ópticamente isótropo, con reflectancia de aproximadamente 5%, indicando ha sido recalentado a más de 250°C. El bitumen ha sido fracturado (fractura concoidal) y dispersado antes de la cristalización de la calcita que lo envuelve. Impresiones circulares indican sitios donde previamente existían esferas de pirita framboidal de uno 6µm de diámetro. Fragmentos de esta pirita (Py) se encuentran flotando en la calcita ganga.

M-4: Andesita Vesicular



Microfotografía N°07 – Muestra M-4, sector SW Los Mantos, sección pulida objetivo 50X.

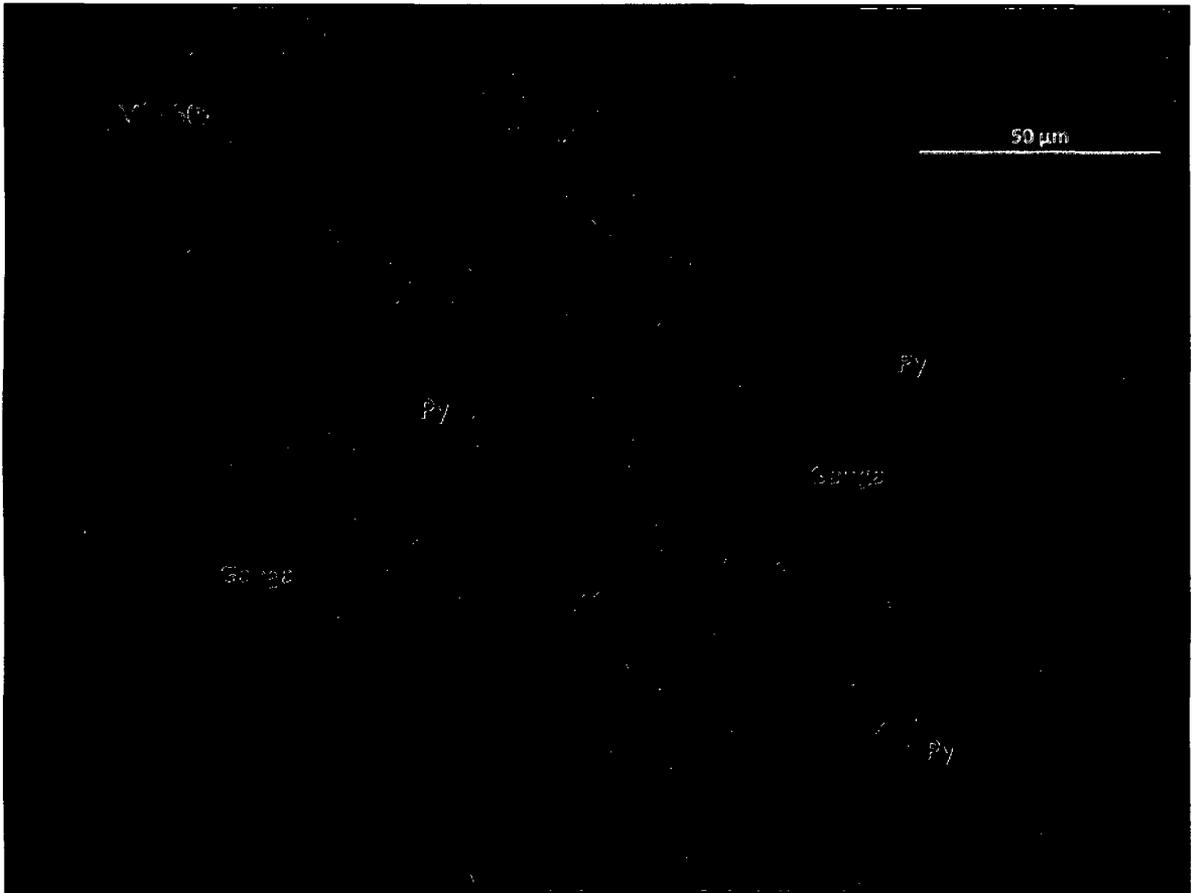
Microfotografía N°07 de mena con Bornita Cu_5FeS_4 (Bo) pardo anaranjado con Calcopirita CuFeS_2 (Cp) amarillo con minúsculas inclusiones de Galena PbS (Ga). La Bornita ha sido reemplazada por Calcosina Cu_2S (Cs) gris azulado, que contiene pequeñas inclusiones de Hematita Fe_2O_3 de color blanco. La Calcosina también ha sido alterada en partes a Covelina CuS (Cv). La Ganga oscura forma cristales tabulares o prismáticos, probablemente un silicato (cuarzo).



Microfotografía N°08 – Muestra M-4, sector SW Los Mantos, sección pulida objetivo 50X.

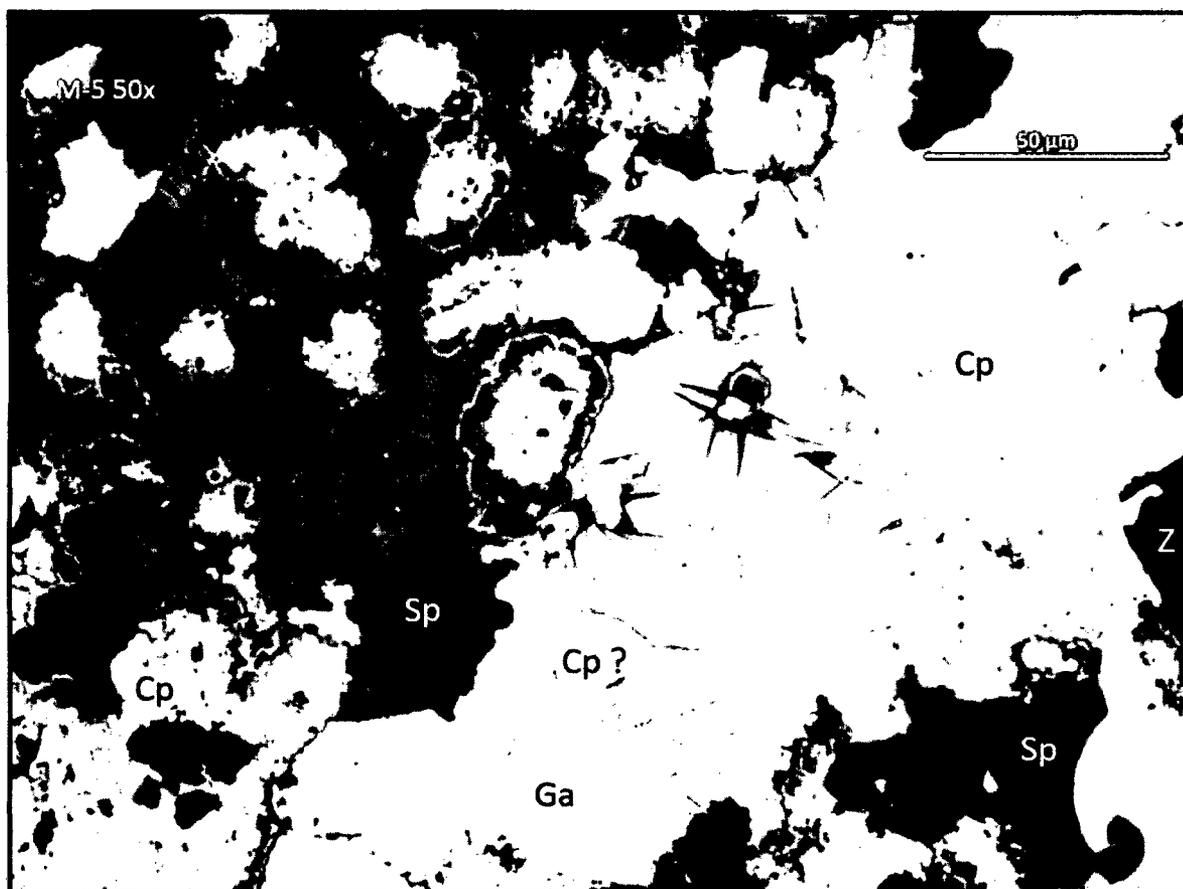
Microfotografía N°08 de mena a gran aumento (50x) una vetilla de Calcopirita CuFeS_2 (Cp) y Bornita Cu_5FeS_4 (Bo) reemplazada por Calcosina Cu_2S (Cs) y Covelina CuS (Cv). La forma esferoidal de muchos granos sugieren que la Calcopirita ha reemplazado estructuras framboidales (Fr) originalmente de Pirita FeS_2 .

M-5: Andesita Vesicular



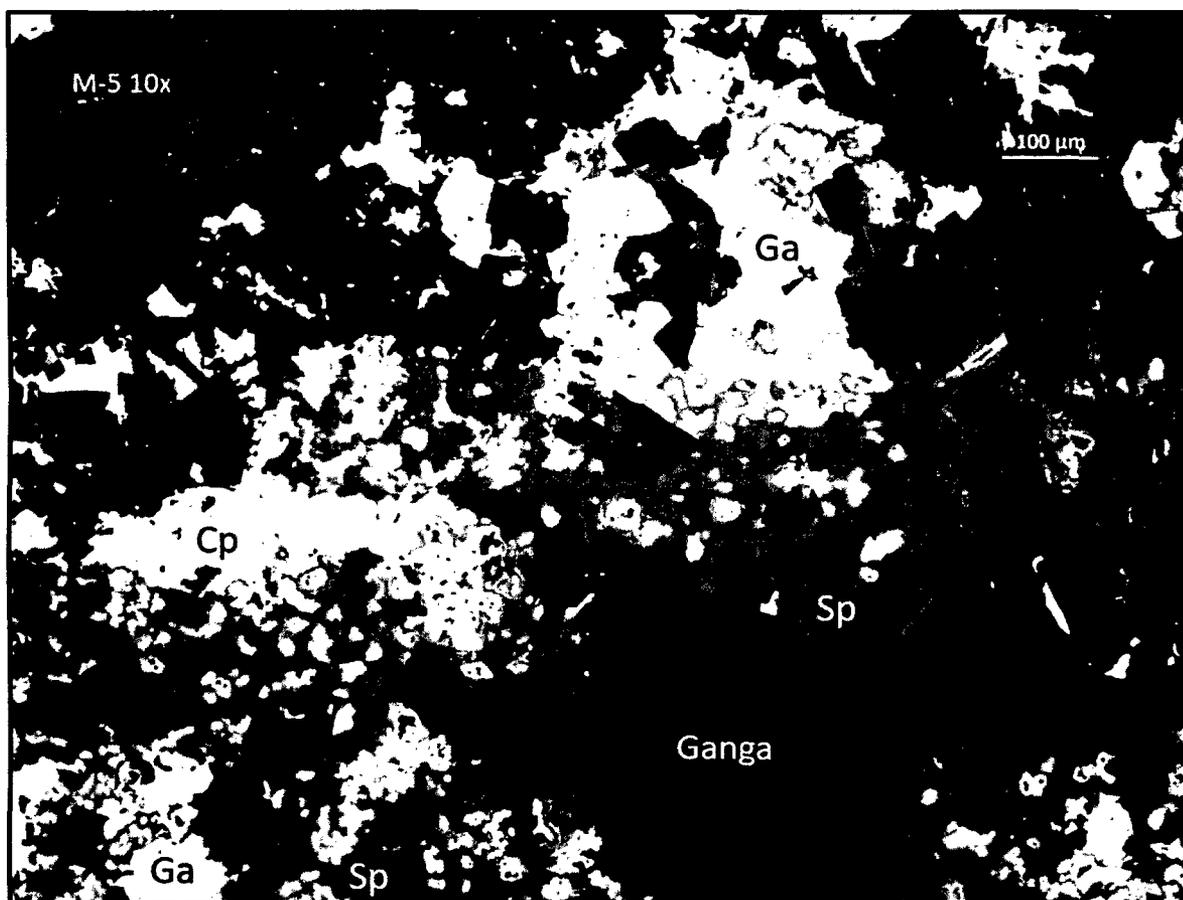
Microfotografía N°09 – Muestra M-5, sector central Los Mantos, luz reflejada objetivo 50X.

Microfotografía N°09 luz reflejada objetivo 50x. Pirita FeS_2 (Py) amarillo-blanquiza con textura coloforme y (como nódulos, cristales radiados, bandas) típica de cristalización a baja temperatura ($<100^\circ\text{C}$). Originalmente puede haber cristalizado como Marcasita, polimorfo ortorrómbico de FeS_2 , pero ha recristalizado y sus propiedades ópticas son de Pirita. Esta acompañada de, en parte reemplazada por, Esfalerita ZnS (Sp). La pirita es temprana y ha sido fracturada y reemplazada por ganga (cuarzo, carbonatos).



Microfotografía N°10 – Muestra M-5, sector central Los Mantos, sección pulida a 50X aumentos.

Microfotografía N°10 a luz reflejada, objetivo 50x. Calcopirita CuFeS_2 (Cp) reemplazando a Pirita FeS_2 (por su textura coloidal heredada). Calcopirita ha cristalizado simultáneamente con Esfalerita ZnS (Sp). La Calcopirita ha sido reemplazada por Galena PbS (Ga), que tiene remanentes de un mineral que parece Calcopirita (Cp?) pero es más pálido. El mineral más negro es ganga, pero por su textura en agujas, es probablemente Zeolita (Z).



Microfotografía N°11 – Muestra M-5, sector central Los Mantos, sección pulida a 10X aumentos.

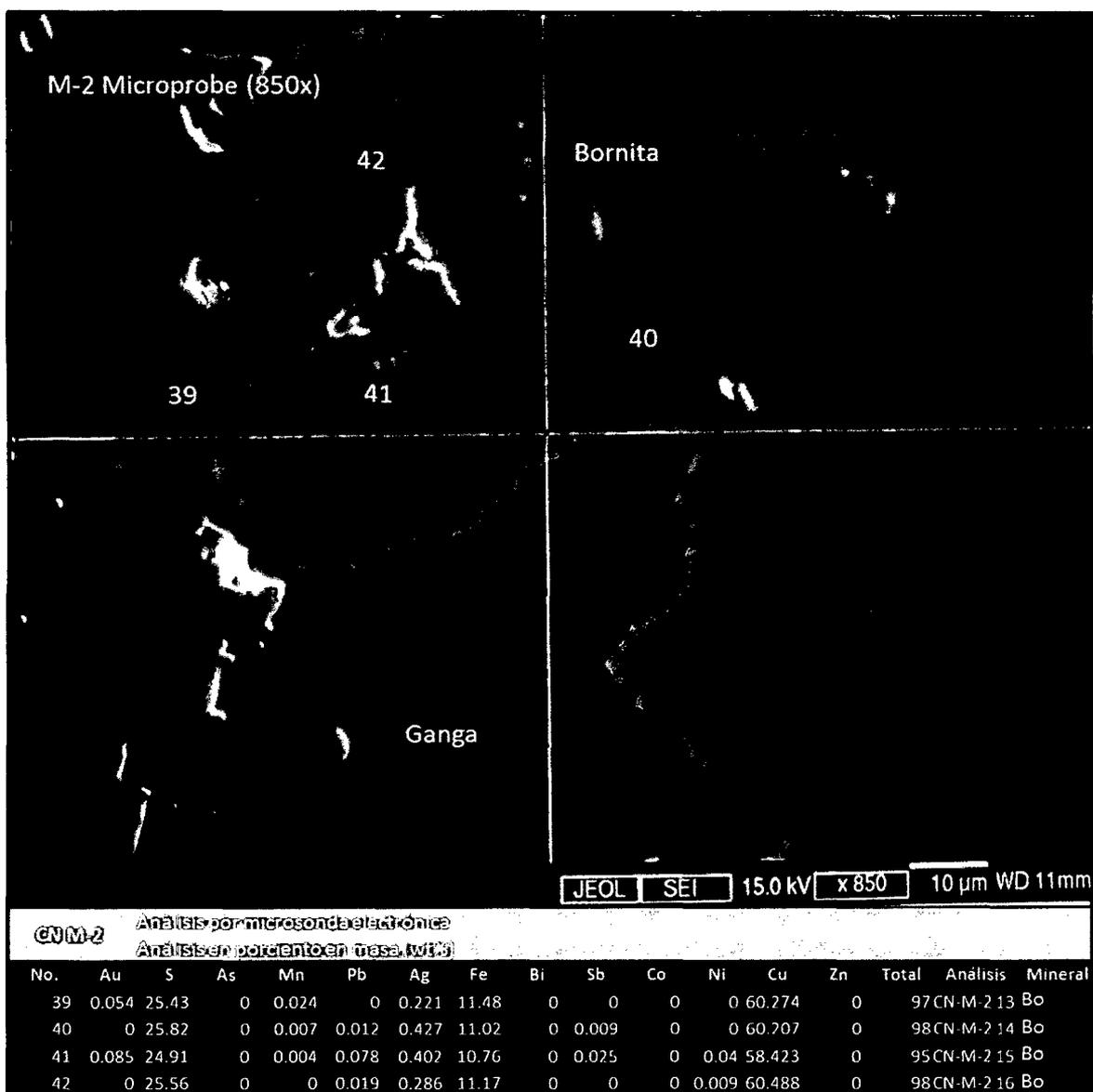
Microfotografía de mena con Calcopirita CuFeS_2 (Cp), Esfalerita ZnS (Sp) y Galena PbS (Ga). Ganga de silicatos, calcita y cuarzo. La Calcopirita es mas antigua, y algunas formas sugieren que en parte ha reemplazado a Pirita preexistente. Luego cristalizó la Esfalerita envolviendo a la Calcopirita, y la Galena cristalizó al final.

4.1.7. *Microsonda*

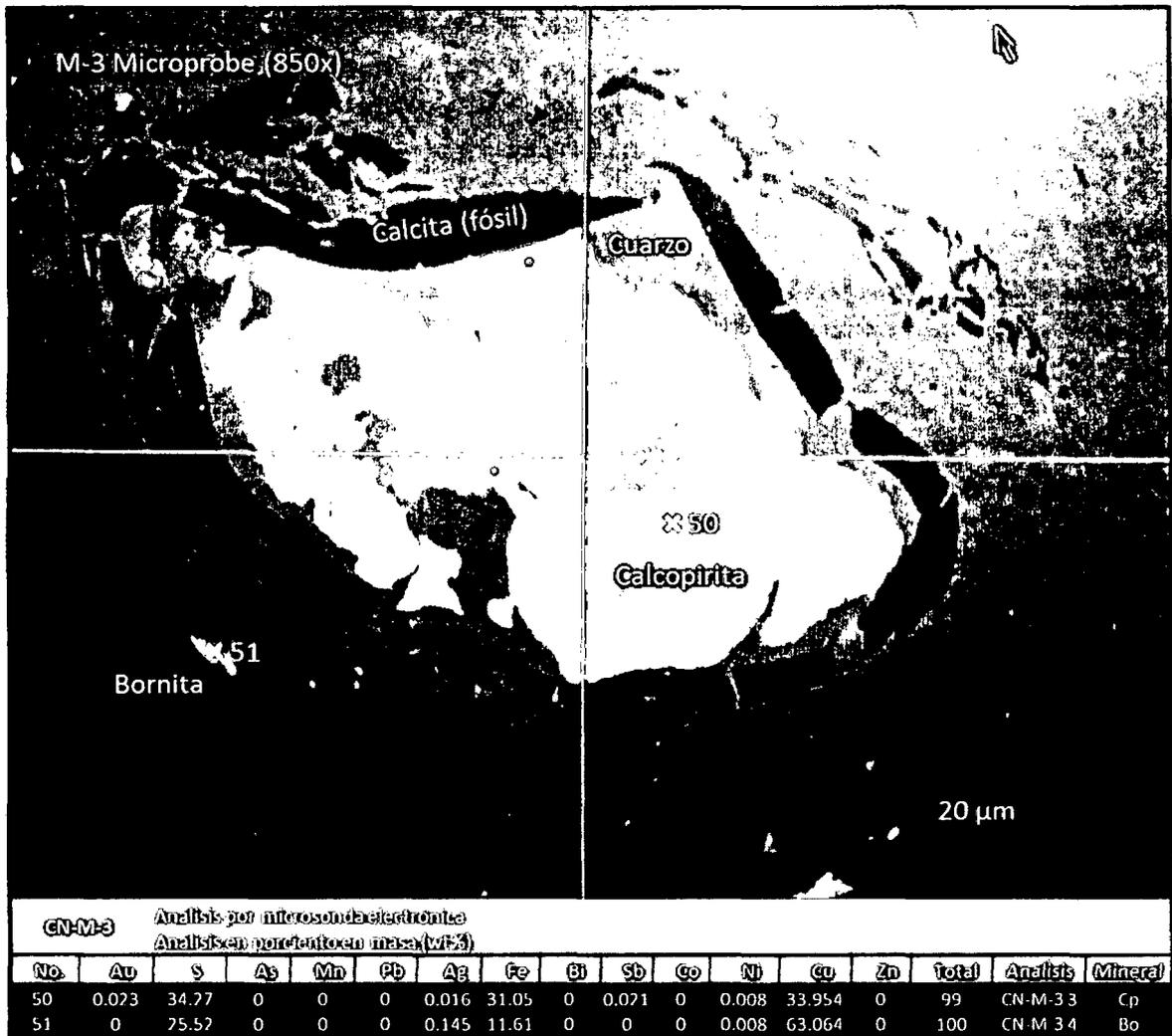
Con la finalidad de entender el porqué de la mineralización de Cu y Ag, se consideró la opción de, mediante lectura con microsonda obtener las fases elementales correspondientes a los especímenes de mena del proyecto Los Mantos. Los resultados de ensayos químicos revelaban presencia de plata, que de manera macroscópica no se identificaba debido a que las menas representativas del yacimiento corresponden a ejemplares de bornita, calcopirita, crisocola y malaquita principalmente y en menor medida galena y esfalerita; los resultados de

microscopía dan acuse de sulfosales de plata y cobre (Tenantita), la que probablemente sería la responsable de la presencia de Ag en el proyecto.

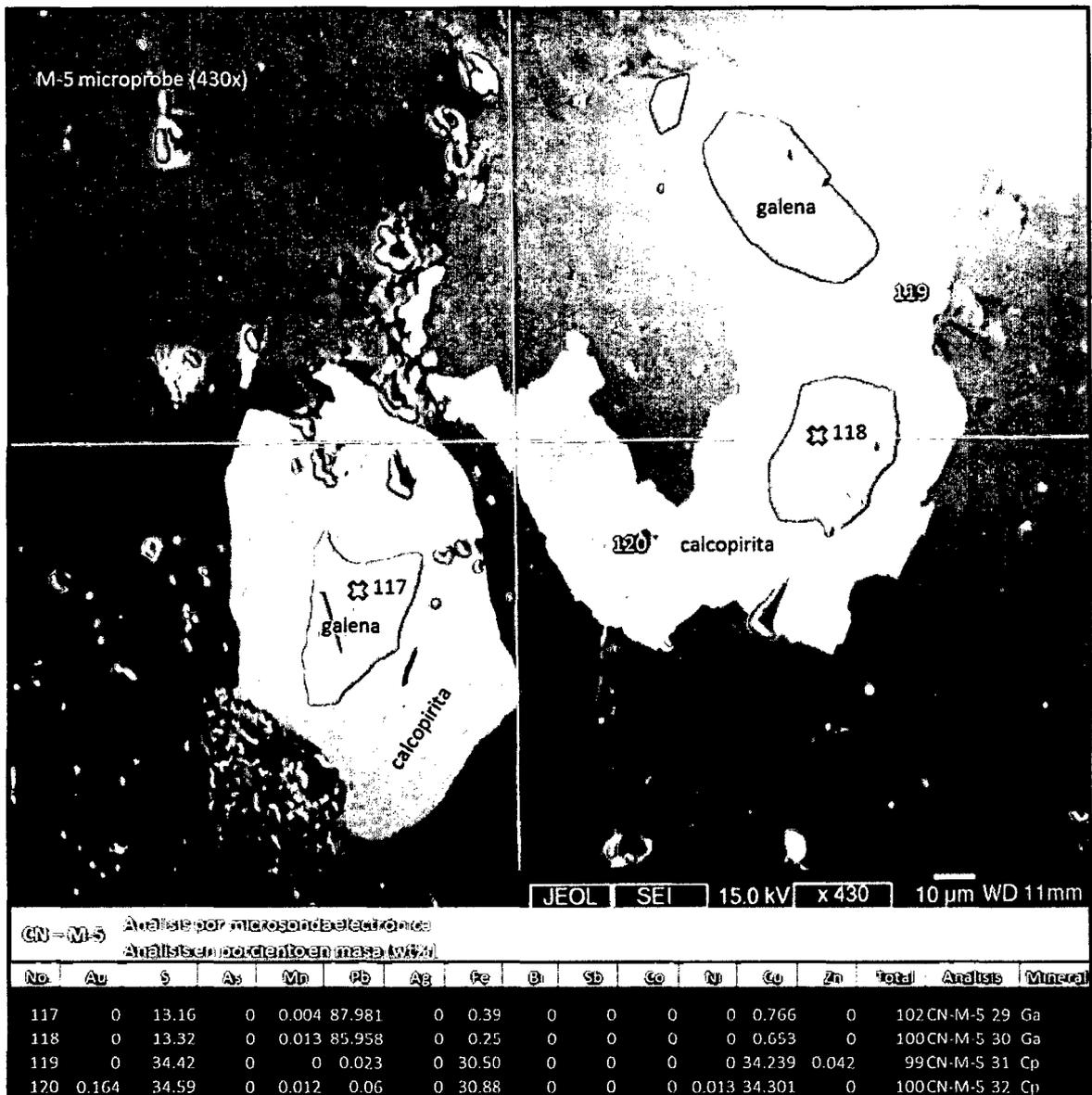
Para el estudio de microsonda se tomaron 112 lecturas en total de las 5 muestras (Ver Anexos, Tabla N°06 a Tabla N°10), las lecturas revelan un espectro de elementos como Au, Ag, As, Bi, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn presentes en los minerales de interés.



Microfotografía N°12 – Muestra M-2, estudio de microsonda, puntos de lectura marcados en imagen.



Microfotografía N°13 - Muestra M-3, estudio de microsonda, puntos de lectura marcados en imagen



Microfotografía N°14 - Muestra M-5, estudio de microsonda, puntos de lectura marcados en imagen.

Las lecturas de microsonda revelan la presencia de Au (en pequeñas cantidades) dentro de los cristales de bornita (Microfotografía N°12), en los niveles sedimentarios lacustrinos se tiene la presencia de fósiles (pelecípodos?), afectados por eventos de mineralización cuarzo – calcopirita (Microfotografía N°13), las lecturas de calcopirita y bornita presentes muestran presencia de trazas de Ag. En la Microfotografía N°14 se observa cristales de galena siendo corroídos por calcopirita, estos cristales de galena según lectura no presentan aporte argentífero al depósito.

Sin embargo en las lecturas obtenidas (ver Anexo, Tabla N°06) se visualizó que hay especímenes de sulfosales (Tenantita?) presente en pequeñas cantidades, identificada sólo por observación al microscopio; estos cristales están vinculados a la existencia de mineralización de Ag en el Proyecto, pero representan fases menores; por lo que en base a la data de microsonda se descarta que la presencia de Ag en Los Mantos esté vinculada exclusivamente a la presencia de galena y sulfosales.

4.2. Resultados de la Investigación

4.2.1. Controles de Mineralización

Las observaciones en terreno apoyadas por los datos de química y microscopía ayudaron a determinar los diferentes controles implicados en la mineralización en Los Mantos.

- a) Control Litológico: Las litologías que presentan mayor afinidad a albergar concentraciones económicas de Cu y Ag en Los Mantos son los horizontes de Andesitas vesiculares, lavas autobrechadas lahares de composición andesítica; así como los niveles inferiores de la secuencia calcárea lagunar suprayacente que está representada por calizas bituminosas laminares.
- b) Control Estructural: En terreno se identificó la ocurrencia de un sistema preferencial de orientación de vetas y fallas con mineralización NE-SW con buzamiento hacia el E, este sistema desarrolla un patrón tensional E-W que se evidencia a manera de vetas de sílice con mineralización. Las estructuras mineralizadas se encuentran afectadas por la familia NW-SE la cual corta, desplaza las rocas y cuerpos mineralizados generando basculamiento en Los Mantos.

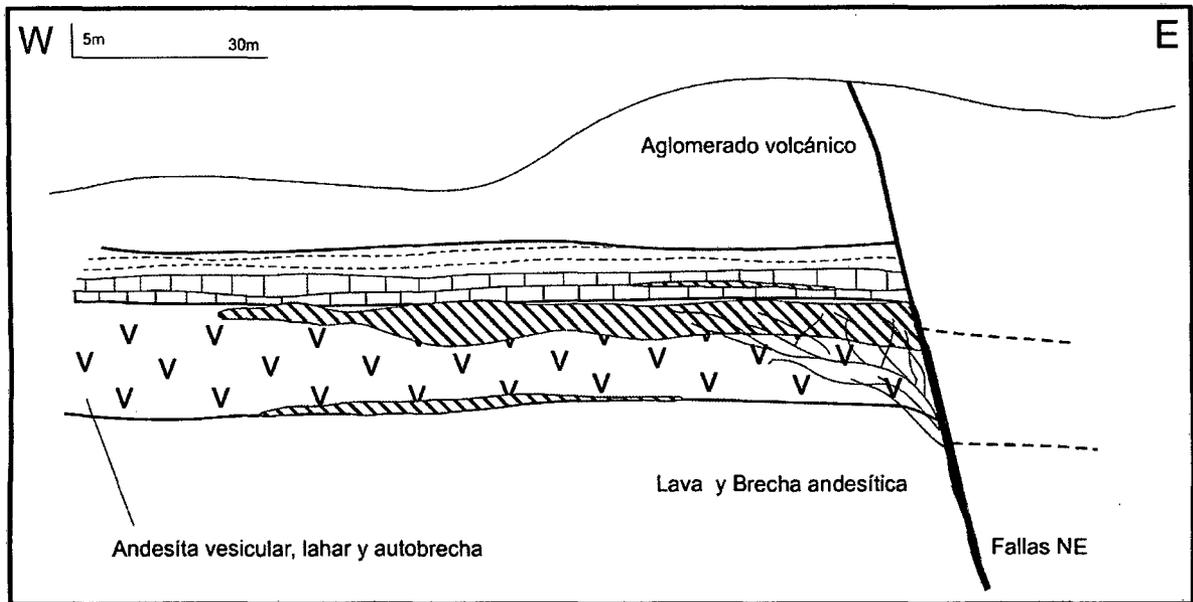


Figura N°30 – Mineralización estratiforme de Cu y Ag localizada preferente en lavas vesiculares, lahares y autobrechas de composición andesíticas de la formación Las Chilcas. En la formación de la mineralización (en color rojo), los fluidos pudieron ascender a través de fallas el mineral se propaga lateralmente a lo largo de horizontes con permeabilidad primaria elevada.

- c) Control de Mineralización: Los sectores mineralizados presentan un patrón definido de óxidos de cobre como crisocola, malaquita y en menor medida azurita, copper wad y tenorita, los que están dispuestos en una geometría estratiforme en la parte superior de las coladas andesíticas y en la inferior de la secuencia lacustrina calcárea. La zona de óxidos tiene una potencia regular de 5m; los óxidos dan paso en profundidad a minerales sulfurados (calcopirita, bornita, galena, esfalerita y pirita) los que se encuentran dispuestos en vetillas irregulares, parches (en la matriz) y escasamente diseminados en roca. Las zonas con alta ley de sulfuros se encuentran asociadas a estructuras (alimentadores) encontrándose vetas con potencia de hasta 1m con valores de hasta 6.5% CuT y 600 g/t Ag.

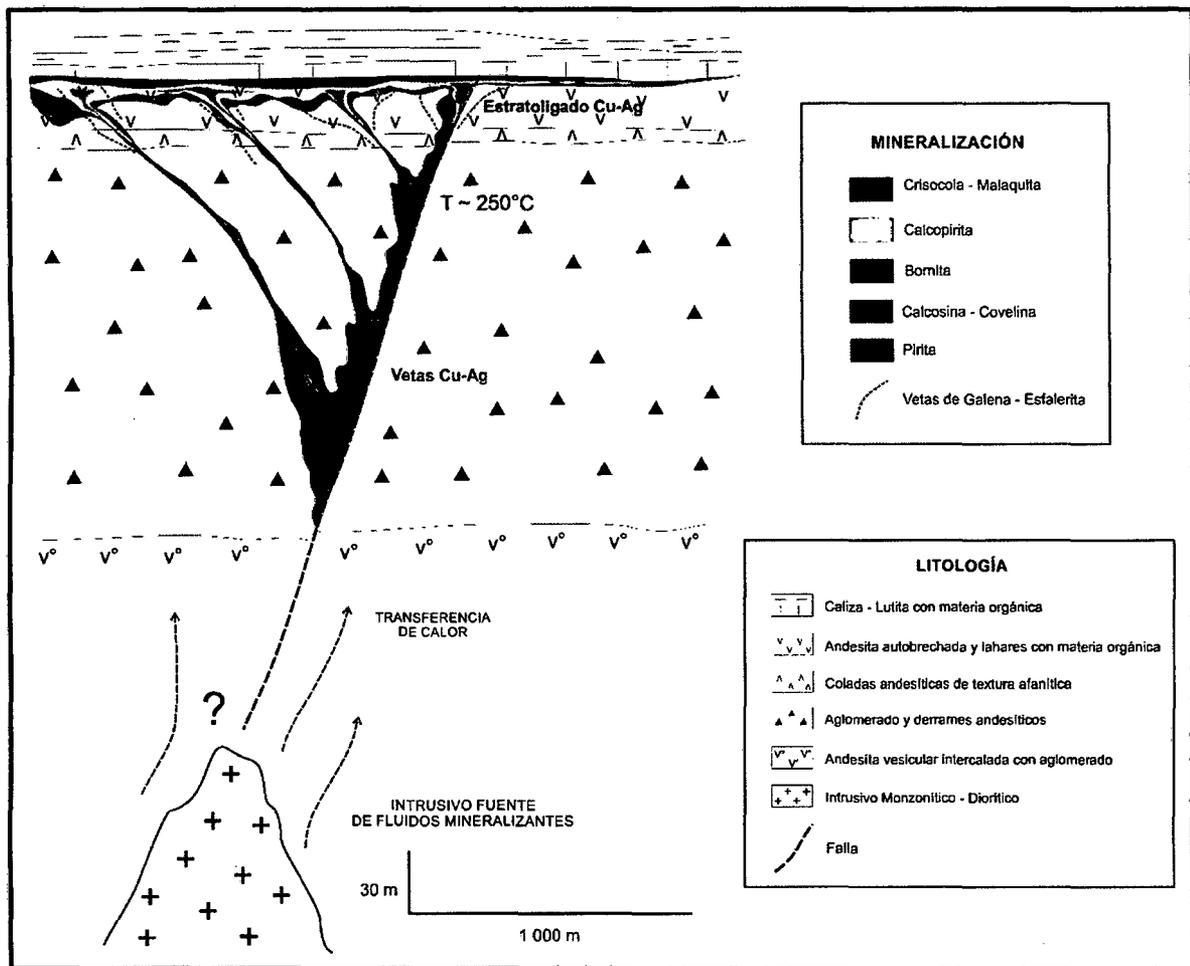


Figura N°31— Modelo esquemático de la distribución vertical de los minerales presentes en Los Mantos; la zona de enriquecimiento supérgeno presenta una potencia promedio de 5m, se desconoce el alcance de profundidad de la zona de sulfuros.

- d) Control de Alteración: En el proyecto se encuentran definidos diferentes tipos de alteraciones, siendo la alteración de clorita, epidota y prehnita la que presenta mayor distribución, afectando con moderada intensidad a las rocas; los intrusivos presentes (diques de diorita y stocks Monzoníticos) no presentan alteración importante, salvo un halo de cloritización; por lo que se asume que esta alteración es generada por metasomatismo del emplazamiento del Batolito de Cabildo y los pulsos intrusivos expuestos vendrían a ser finales o posteriores al mismo. En las rocas mineralizadas resalta la presencia de sílice (lechosa principalmente) la cual se presenta a manera de relleno de cavidades (parches / venillas irregulares) y como vetas de potencia variable (10 cm a 1.5m) en la periferia del sistema que corresponden a sílice lechosa a calcedónica con ocurrencia ocasional de sílice hialina, la cual está acompañada por presencia esporádica de feldespatos potásicos (Adularia) que

se presenta a manera de sutura en vetillas o parches en las zonas de bornita > calcopirita. También se identificó la presencia de baritina que acompaña a la sílice lechosa y que se dispone de la misma manera es decir manera de relleno de cavidades y en vetas; la presencia de baritina corresponde a las zonas de bornita y calcopirita por lo que se asume que el evento de sílice - baritina en conjunto con el de Adularia? Podrían representar los estadios principales de mineralización. Finalmente la ocurrencia de carbonatos (calcita – ankerita) distribuidos en vetillas representan etapas finales o posteriores a la mineralización.

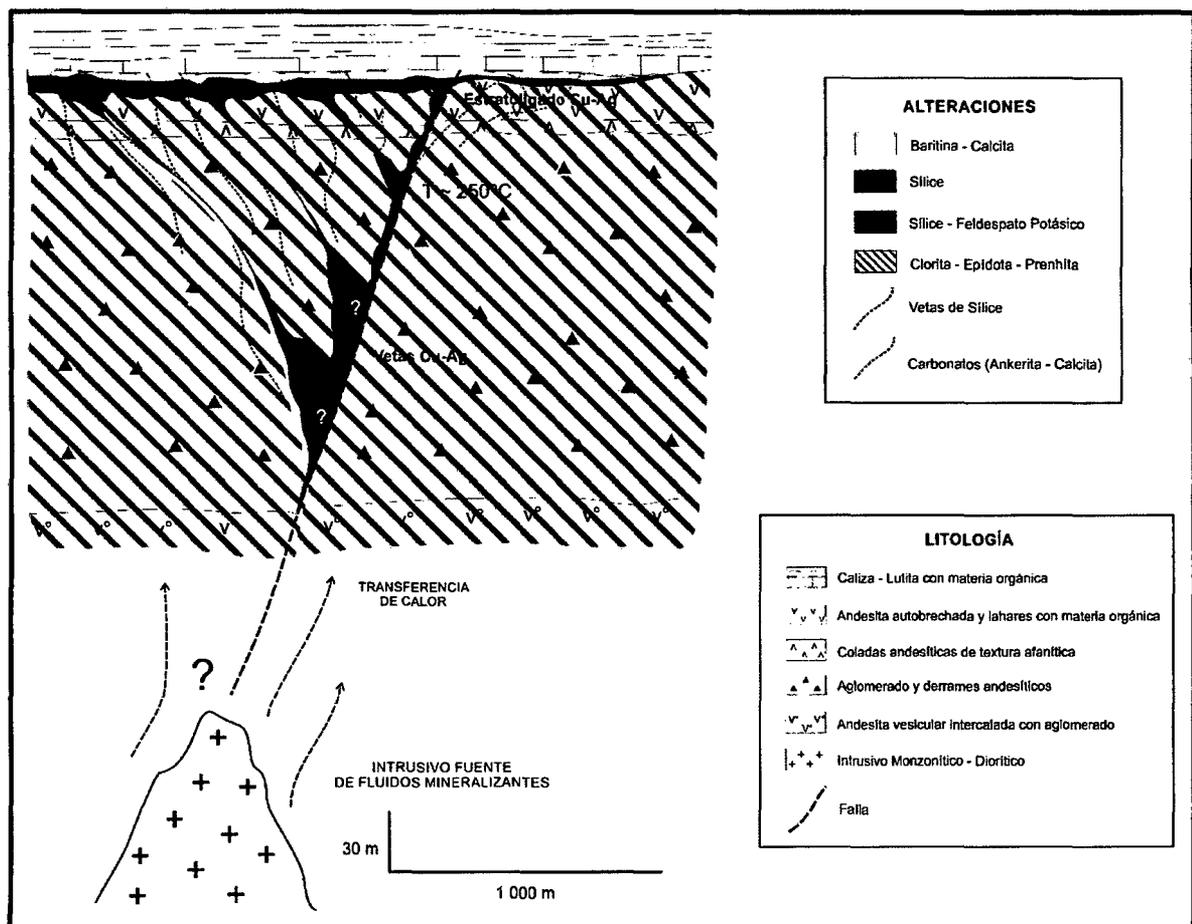


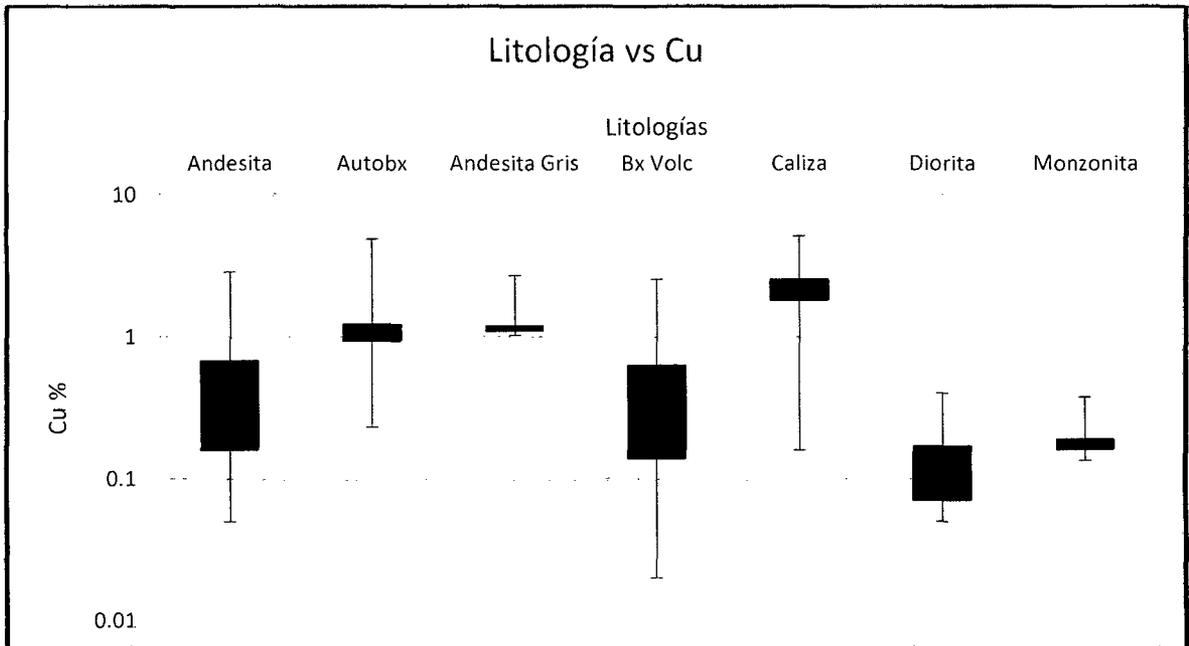
Figura N°32 – Modelo esquemático de la distribución vertical de Alteraciones en Los Mantos.

4.2.2. Distribución del Cu y Ag

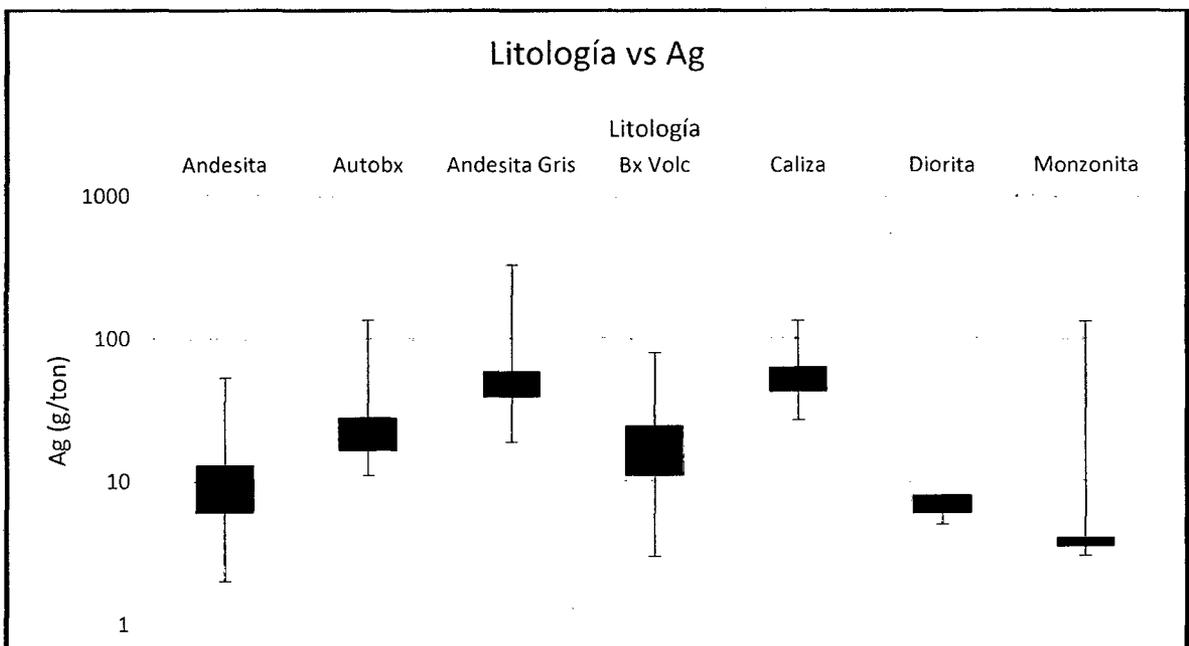
Dentro del proyecto se puede observar la disposición geoquímica interpretando los planos (Plano N°06 y N°07) mostrando una distribución bimodal para Cu y Ag.

Teniendo en cuenta que los controles de mineralización son del tipo litológico y alteración; se realizó un análisis de distribución mineral en función a las litologías y alteraciones en base a los valores de Cu y Ag obtenidos de análisis químico (Cuadro N°05 y N°06).

Cuadro N°05– Distribución de Cu (expresado en %) vs Litología, indicando valores promedios y tendencia de máximos y mínimos (escala logarítmica).



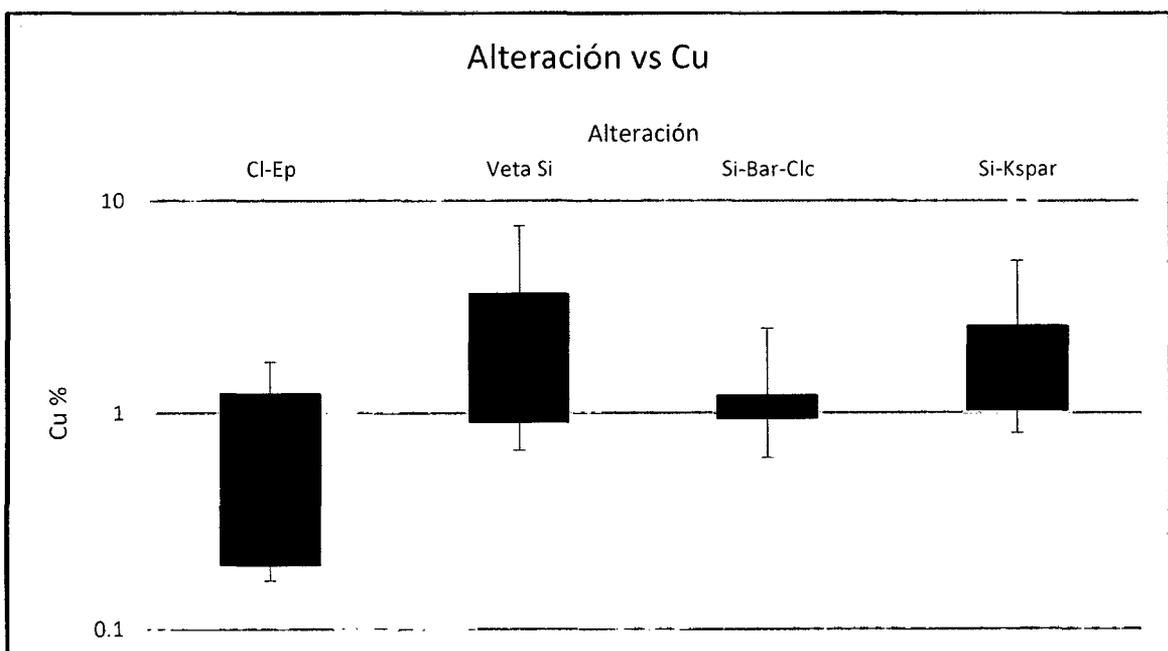
Cuadro N°06 – Distribución de Ag (expresado en g/ton) vs Litología, indicando valores promedios y tendencia de máximos y mínimos (escala logarítmica).



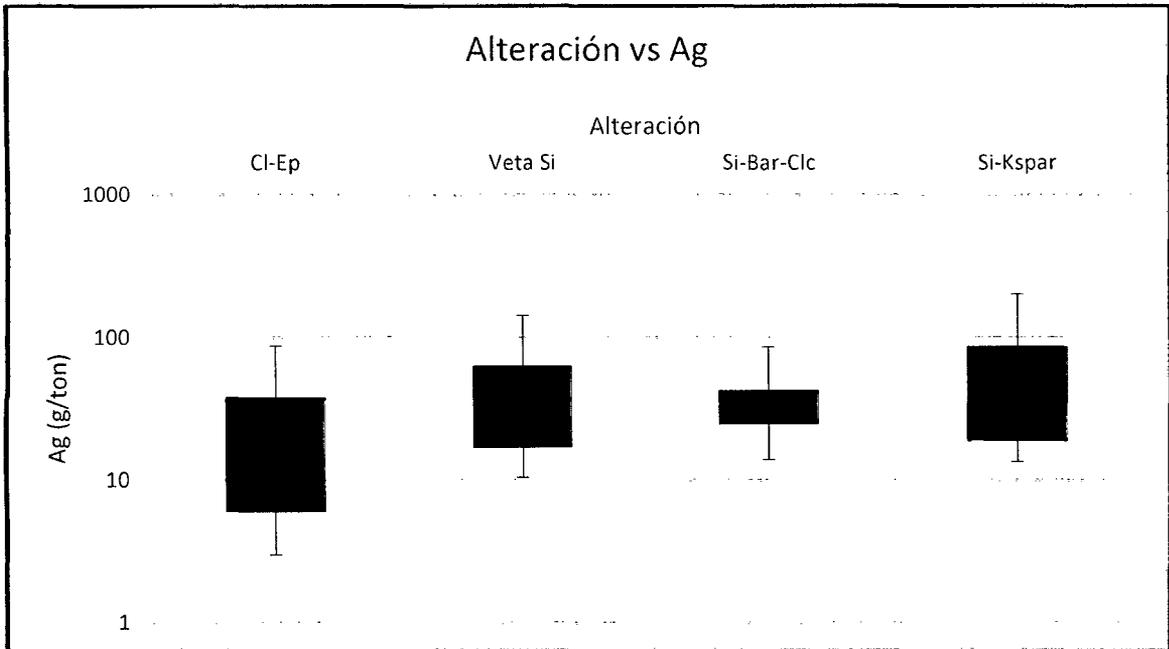
Se observa que las litologías más receptivas a poder contener y desarrollar zonas mineralizadas son las andesitas grises, autobrechas y calizas; se destaca que la mayor amplitud de distribución mineral se encuentra en los horizontes de autobrechas y en las calizas, en estas últimas se asume que su contenido mineral se debe a que actuaron como sello, ocasionando el entrapamiento de los fluidos mineralizantes en los horizontes de autobrechas, lahares y andesitas grises (derrames lávicos); los horizontes mineralizados hallados en los niveles sedimentarios lagunares (calizas) se encuentran a la base de la secuencia hacia el contacto de las autobrechas infrayacentes.

Para el caso de las alteraciones se hizo el mismo estudio, ya que el desarrollo de las zonas mineralizadas está vinculada según observación macroscópica de terreno a la presencia de minerales de alteración (sílice, feldespato potásico, baritina, etc); se realizó el mismo tratamiento de las litologías para las alteraciones, dando los siguientes resultados (Cuadro N°07 y N°08):

Cuadro N°07 - Distribución de Cu (expresado en %) vs Alteración, indicando valores promedios y tendencia de máximos y mínimos (escala logarítmica).



Cuadro N°08 - Distribución de Ag (expresado en g/ton) vs Alteración, indicando valores promedios y tendencia de máximos y mínimos (escala logarítmica).



Los resultados indican que la mineralización de Cu y Ag, están asociadas a una misma alteración; vetas de sílice y sílice – feldespato potásico; habiendo menor concentración de estos elementos en la alteración sílice – baritina – carbonatos; pudiendo representar etapas finales del evento mineralizante.

El análisis de microsonda muestra que la Relación Cu vs. Ag (en % en peso) en minerales. Aparte de minerales de plata como Tenantita(?) con composición semejante a Proustita Cuprífera $(Cu,Ag)_3AsS_3$, todos los minerales pueden contener Ag. Algunos minerales no identificados tienen hasta 1%, pero son fases menores. Las cantidades más importantes de Ag se presentan en Bornita, con hasta 10000 gr/t y Calcopirita, con 1000 g/t (Figura N°33).

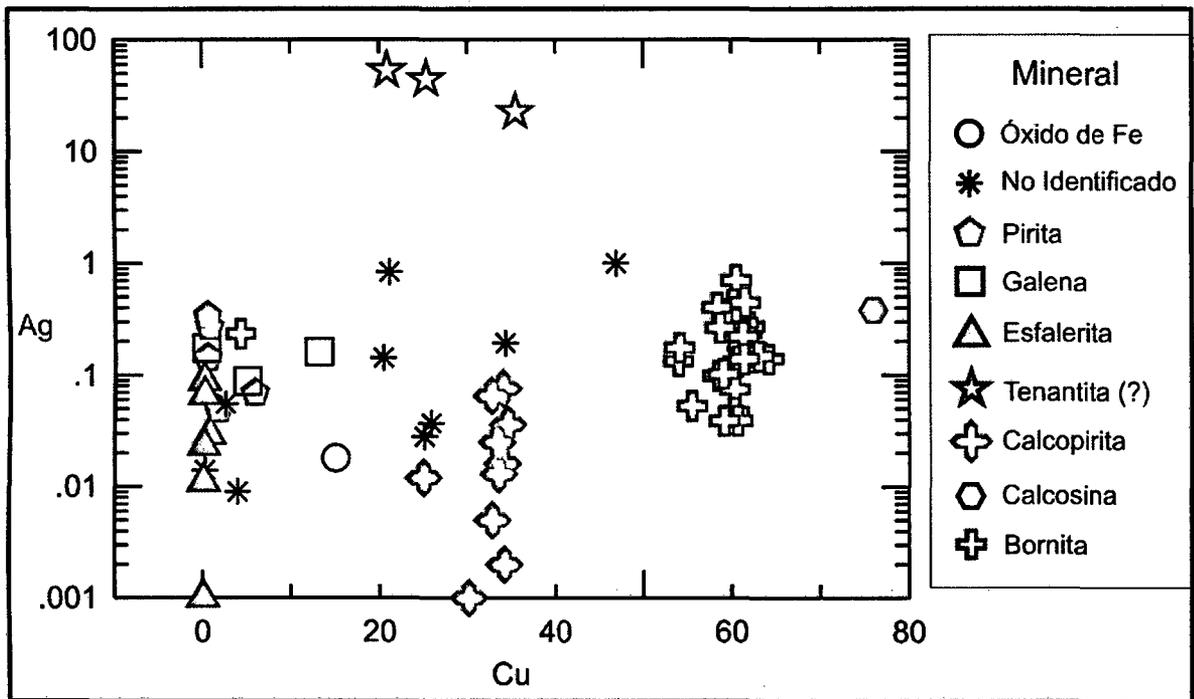


Figura N°33 – Diagrama de Distribución de contenidos de Ag (en % Mol y escala logarítmica) vs Cu (en % mol) de los minerales identificados en la zonas mineralizadas en el proyecto Los Mantos.

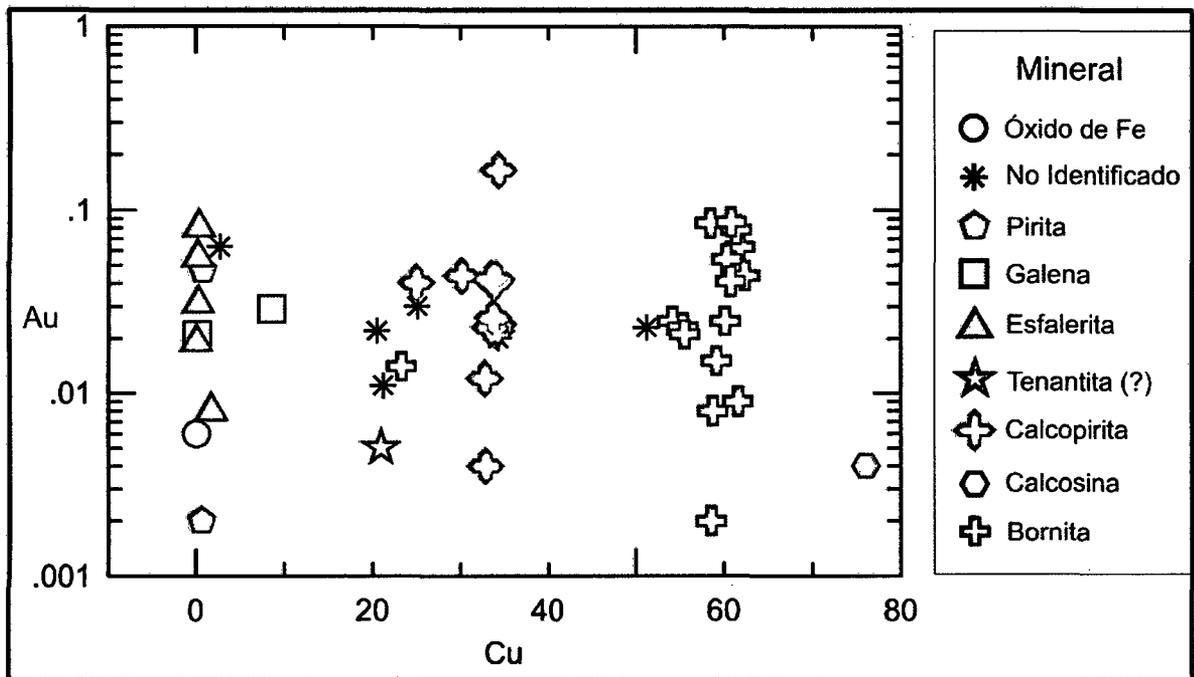


Figura N°34 – Diagrama de Distribución de contenidos de Au (en % Mol y escala logarítmica) vs Cu (en % mol) de los minerales identificados en la zonas mineralizadas en el proyecto Los Mantos.

Relación Cu vs. Au (en % en peso) en Minerales. Aunque hay muchos análisis puntuales que no arrojan Au, algunos análisis puntuales en Bornita y Calcopirita tienen hasta 1000 g/t de Au (Figura N°34). El Au se encuentra distribuido irregularmente, es probable que no se encuentra en solución sólida, sino como partículas sub-microscópicas de Au. La Esfalerita puede tener bastante Ag y Au; pero por procesos metalúrgicos estos se perderían en la planta de concentración.

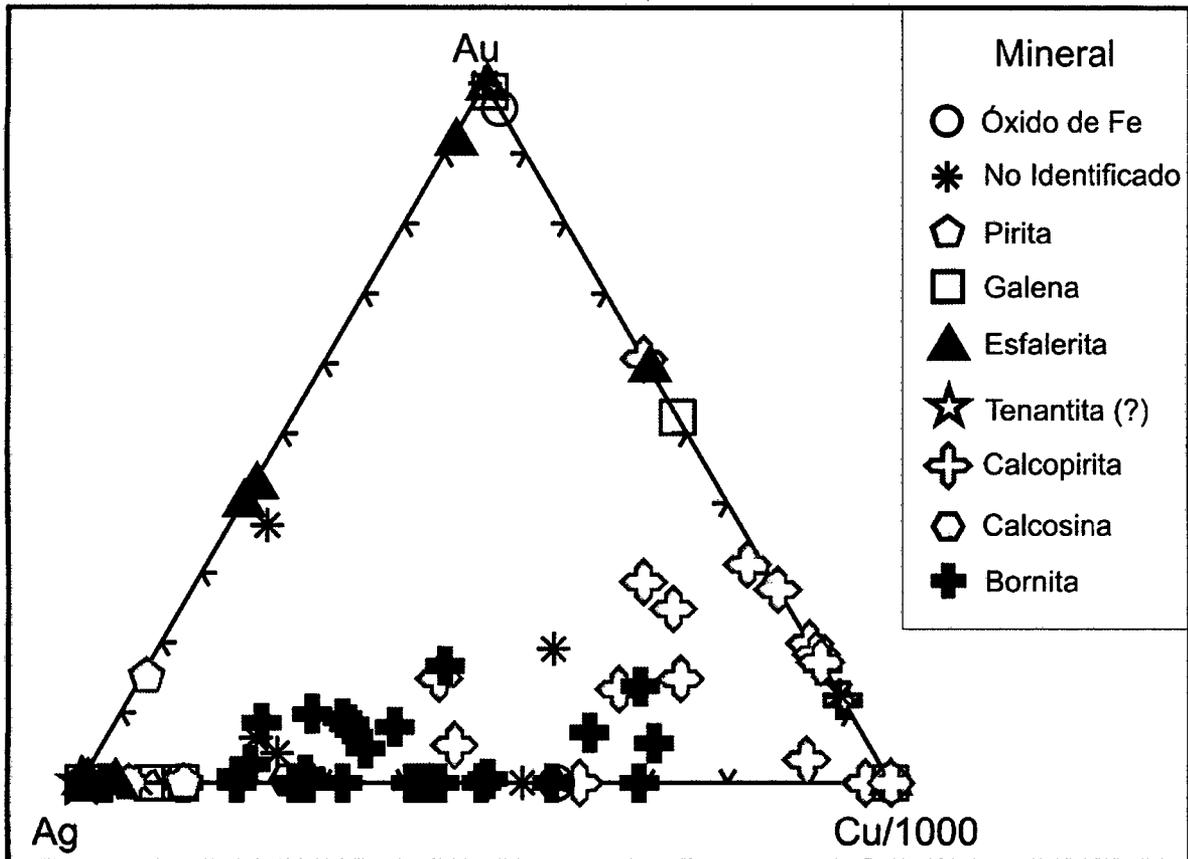


Figura N°35 - Diagrama composicional de Ag vs Au vs Cu; para los minerales identificados en Los Mantos

Los minerales que presentan mayor contenido de Ag y Au, corresponden en su mayoría a bornita y calcopirita como fases principales de la mineralización argentífera en Los Mantos (Figura N°35); los análisis de microsonda arrojan presencia de sulfosales de Ag (Tenantita a Proustita Cuprífera), los que representan una fase con contenidos de Ag, pero no muy desarrollada. Se define que existe un evento de mineralización de plata, el cual luego es afectado por la introducción de cobre al sistema y remplazo sucesivo de minerales ricos en Cu.

4.2.3. *Paragénesis Mineral*

Para la interpretación de paragénesis mineral, se consideró en primer lugar las observaciones macroscópica en los sectores de producción mineral (Portales, Cardonal y Cony), contrastándose esta información con los resultados obtenidos de cinco secciones pulidas de muestras mineralizadas. Los ejemplares estudiados al microscopio corresponden a lavas vesiculares andesíticas (M-1, M-4 y M-5), andesita Autobrechada (M-2) y caliza laminar bituminosa (M-3). Determinándose que:

- Pirita framboidal ocurre primero como un producto de la degradación de la materia orgánica (bitumen) presente en el yacimiento; los primeros minerales en depositarse consisten en pirita hidrotermal, tenantita (?), esfalerita y galena; seguidos por calcopirita y bornita, finalmente covelina, calcosina y hematita (Cuadro N°09); lo que representa un evento primario de aporte de Ag y metales base (Pb – Zn) y un consecuente incremento gradual de la porción de Cu en los sulfuros.
- La secuencia paragenética está caracterizada por remplazamientos sucesivos de sulfuros ricos en Fe (pirita – calcopirita) por sulfuros ricos en Cu (bornita, covelina, calcosina).
- Con respecto a la alteraciones se tiene un evento inicial metasomático de clorita, epidota y prenhita, probablemente asociado al emplazamiento del batolito de Cabildo; la mineralización tiene un evento continuo de sílice, ocurriendo esporádicamente feldespatos potásico (adularia) y baritina en la etapa principal de mineralización; quedando finalmente el aporte de carbonatos (calcita – ankerita) como un aporte post-mineralización al sistema.

intergranulares); estos poros permanecieron “sellados” ocupando su espacio la materia orgánica (bitumen); llegando a moverse poco quedando relegado la presencia de este elemento a los niveles de lahares, autobrechas y andesitas vesiculares (en ese mismo orden). Si bien es cierto que se identificó materia orgánica (bitumen) en algunas muestras del proyecto, lo que abunda es pirita framboidal la cual según estudios realizados en el sector realizados por Carrillo Rosua et al 2014, revelan que esta (pirita framboidal) proviene de la degradación directa de materia orgánica por agentes bacteriogénicos (y a condiciones de baja temperatura ~100°C), es decir que la presencia de este mineral está vinculada de manera directa con la pre-existencia de materia orgánica en la roca que la aloja.

Los fluidos ascienden a través de estructuras y al entrar en contacto con las lavas andesíticas precipitan los elementos acarreados por este fluido hidrotermal; actuando como catalizador del proceso de precipitación la materia orgánica (efecto carbón activado); evidencia de este proceso es la coexistencia de bitumen con pirita framboidal (proveniente de la degradación de materia orgánica) que a su vez está afectada por minerales ricos en Cu (debido a incremento de Cu en el sistema), generando así el remplazamiento sucesivo de pirita framboidal por calcopirita y posteriormente en bornita.

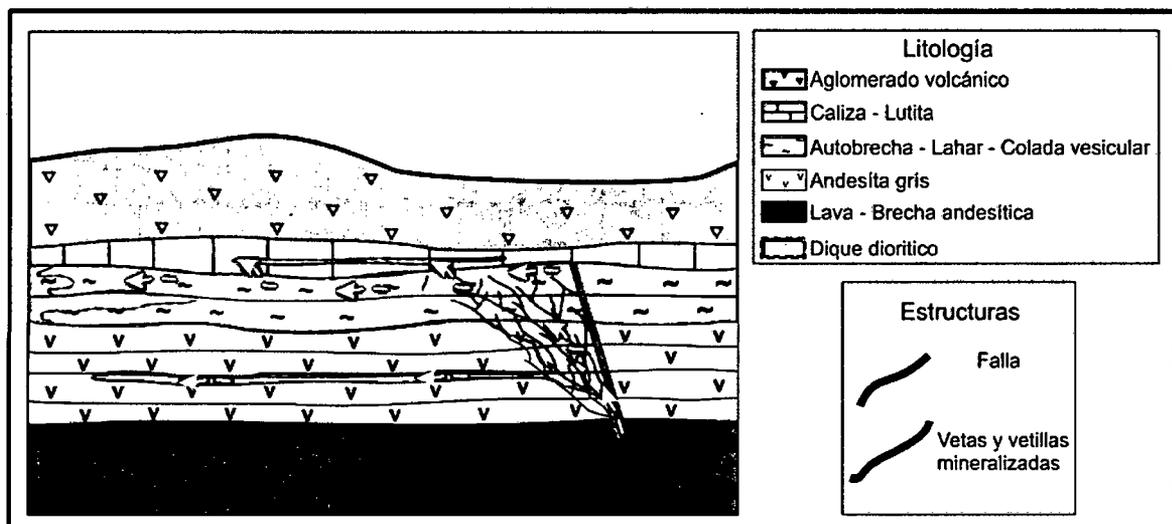


Figura N°36 – Gráfica esquemática del mecanismo de emplazamiento de mineral en Los Mantos, inyección a través de falla, en niveles con alto índice de permeabilidad (favorecido por materia orgánica) Lavas – Lahares-Autobrecha; las flechas blancas indican el movimientos del fluido hidrotermal, el cual está limitado por un sello superior impermeable de calizas y lutitas.

4.2.5. *Evolución geológica del proyecto*

El análisis de la información recolectada en terreno, contrastada con los registros antiguos y geología regional del área; permiten interpretar una secuencia de eventos implicados en la evolución geológica del sector de estudio y la preparación del terreno para el desarrollo del cuerpo mineralizado de Los Mantos:

Estadio A

Jurásico Superior, tectónica de régimen extensional genera subsidencia y da forma a la cuenca tras arco apertura del trasarco originándose sedimentación volcánica con intercalaciones marinas (Figura N°37A).

Estadio B

La transición del Jurásico al Cretácico está marcada por el incremento en la actividad volcánica, generando un “levantamiento” en la cuenca (engrosamiento por el excesivo vulcanismo); interrumpiéndose de esta manera la sedimentación marina; se produce principalmente gran aporte de coladas y lavas andesíticas, las cuales se interdigitan con sedimentos continentales y volcánicos (volcarenitas – lahares, etc). La presencia de materia orgánica (vegetación remanente, troncos, entre otras fuentes) en los horizontes de lahares; actúa como agente preservante de porosidad en la roca ante los procesos diagenéticos y de metasomatismo (posteriores – emplazamiento de batolito de cabildo); preparan a los horizontes de lavas volcánicas vesiculares a ser más receptivos a la interacción con fluidos mineralizados provenientes de fuentes profundas (Figura N° 37B).

Estadio C

La tectónica extensional continúa generando nuevamente la apertura de cuencas lacustres a marinas someras, la actividad volcánica disminuye (Figura N° 37C).

Estadio D

Hacia el Cretácico inferior, queda interrumpida la sedimentación en las cuencas lacustres a marinas someras; el dominio tectónico extensional ocasiona la formación de fallas normales (sistema NE-SW); el levantamiento de la cuenca produce una interdigitación entre los factores erosivos y la actividad volcánica, generando depósitos volcánicos – sedimentarios, se define principalmente coladas andesíticas porfíricas finas intercaladas con niveles de aglomerados volcánicos andesíticos (Figura 37D).

Estadio E

La actividad tectónica extensional se incrementa, generando fallamientos, que son aprovechados por intrusivos profundos (partes del batolito de Cabildo? – Edad Cretácica inferior), los cuales por metasomatismo serían los responsables de la extensa presencia de epidota – clorita – pumpellita – prenhita en el área de estudio y que afecta principalmente a los niveles inferiores de la formación Las Chilcas (Figura 37E).

Estadio F

Movilidad de fluidos; las fallas profundas son conductos o vías para el desplazamiento de fluidos provenientes de profundidad o intrusivos profundos (relacionados a mineralización?).

Entrampamiento y desarrollo de la mineralización; las muestras analizadas dan cuenta de la presencia de materia orgánica (bitumen) en lavas andesíticas mineralizadas en Los Mantos; por cambio de gradiente hidráulico existe movilidad de materia orgánica en las rocas volcánicas, sellando esta movilidad los horizontes de lutitas y calizas bituminosas suprayacentes. Los procesos diagenéticos y/o carga litostática generan la supresión de la permeabilidad primaria en los horizontes de lavas vesiculares andesíticas; la presencia de

materia orgánica previene en parte que se preserve permeabilidad primaria, siendo esta responsable de que los horizontes lávicos vesiculares, autobrechados y laharicos sean más receptivos a la interacción con fluidos hidrotermales, generando por efecto carbón activado (alta reducción del sistema) la precipitación de metales como Cu y Ag (Figura 37F).

Los fluidos mineralizados movilizados a través de fallas entran en contacto con los niveles de lava vesicular y autobrecha que se encuentran con contenido de materia orgánica. Generando desarrollo de zonas de alteración de sílice asociada a los conductos mineralizantes y sílice – baritina – calcita hacia el contacto entre los horizontes lávicos y su contacto suprayacente de calizas laminares bituminosas, en estas alteraciones se fijan bornita – calcopirita como menas principales y en menor medida pirita, galena, esfalerita.

Estadio G

Cambio en la dirección de los esfuerzos tectónicos de régimen extensional genera reactivación de fallas NE-SW y desarrollo de nuevos sistemas NW-SE y E-W, con el consecuente desplazamiento de los cuerpos mineralizados (vetas, mantos, etc).

Estadio H

Cambios en régimen tectónico genera levantamiento en la cuenca e incremento de la erosión conllevando esto en variación de los niveles freáticos, generando el desarrollo de zonas de enriquecimiento y oxidación, representadas por crisocola, malaquita y copper wad (en menor medida) (Figura N°31). Actividad intrusiva posterior, genera emplazamiento de diques de composición andesítica que cortan los cuerpos mineralizados, para esto los diques se valen de los sistemas estructurales previos (NE-SW, NW-SE, E-W).

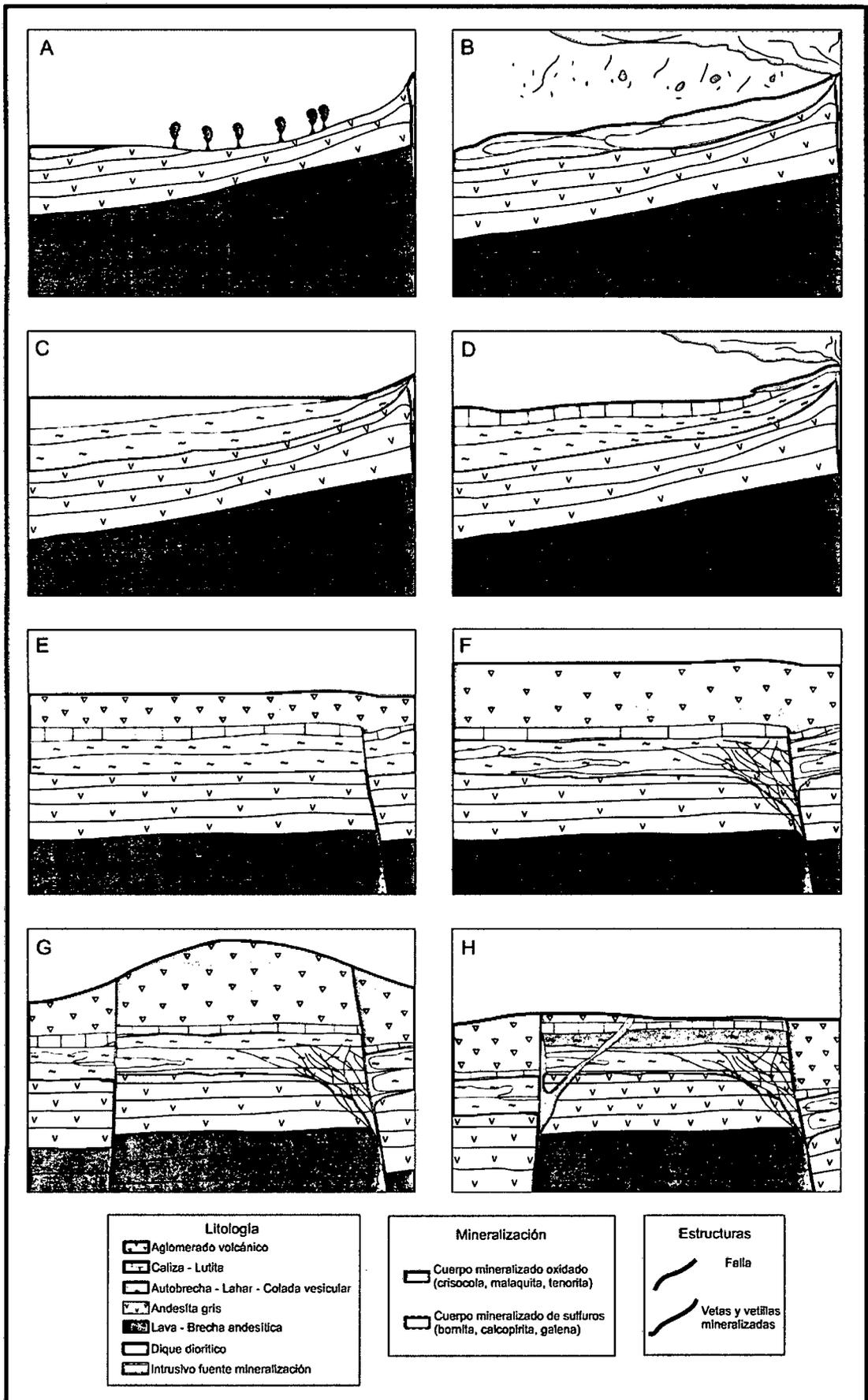


Figura N°37 – Evolución geológica del proyecto Los Mantos, se indican 8 estadios (A, B, C, D, E, F, G y H) en los cuales se plantea los mecanismos involucrados en la génesis de mineralización en el proyecto.

4.3. Contrastación de la hipótesis

Las características litológicas, estructurales y de alteración están asociadas a la presencia de mineralización de cobre y plata, los cuales definen un depósito del tipo estratoligado volcánico sedimentario. Teniendo en consideración este planteamiento se comprobó mediante trabajo de terreno (cartografiado y muestreo), que la mineralización de sulfuros está vinculada a estructuras (vetillas – fallas) las que actuaron como conductos para su migración y transporte; la mineralización se alberga en horizontes específicos y definidos (coladas lávicas vesiculares, autobrechadas y lahares de composición intermedia).

Según el estudio de microscopía se observa la presencia de piritita framboidal, la cual proviene de remanentes de materia orgánica en la roca (también visualizada en algunos ejemplares); lo cual implica que en el proceso de génesis del yacimiento, la materia orgánica jugó un rol importante actuando como catalizador en el proceso de precipitación de metales de cobre y plata.

La asociación de la mineralización con actividad ígnea no está definida, debido a que en el área de estudio los diques dioríticos y stock Monzoníticos no se encuentran emparentados con mineralización; pero no se descarta que las fuentes de los fluidos mineralizantes están emparentadas con intrusivos profundos relacionados al Batolito de Cabildo (Edad Cretácica inferior)

Los análisis químicos muestran presencia económica de Cu y Ag, en base a descripción macroscópica y en apoyo de los estudios de microscopía se conoce que las menas de Cu son bornita y calcopirita en su mayoría con menores cantidades de calcosina y covelina (zona de sulfuros), los datos de microsonda demostraron que las bornitas y calcopiritas presentan contenidos elevados de Ag (de 1000 a 10000 g/t), representado estos cristales las fases argentíferas principales; también se identificó que la galena, esfalerita y Tenantita (?) son los minerales que presentan alto contenido de Ag y Au (hasta 1000 g/t). Por lo que se define en conjunto con la paragénesis mineral que el aporte de Ag y Cu fue coetáneo, pero el sistema se enriqueció mayoritariamente en Cu, generando el remplazamiento sucesivo por menas con mayor contenido de Cu.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El modelo genético para el proyecto Los Mantos, dadas las características litológicas, estructurales, mineralógicas y de alteración observadas en terreno y contrastadas con data de microscopía y microsonda; se define como un depósito del tipo estratoligado volcano-sedimentario asociado a fallas.

- El proyecto Los Mantos se encuentra sometido a diferentes tipos de controles que son los responsables de la presencia de mineralización. El control litológico está definido lavas vesiculares y autobrechadas andesíticas en las cuales se aloja la mineralización, lo cual definen un carácter estratoligado. Con respecto a las estructuras, se observó la existencia de estructuras mineralizadas con rumbo principalmente NE-SW y E-W, estas son fallas de tipo normal que favorecieron la movilidad de fluidos mineralizados provenientes de profundidad. El zonamiento de alteración presenta un patrón concéntrico, hacia el centro se tiene sílice con remanentes de feldespato potásico y baritina – carbonatos hacia el techo, la mineralización se halla principalmente en la zona de sílice – feldespato potásico y sílice – baritina, el mineral se dispone cerca al contacto con el sello litológico desarrollándose una geometría mantiforme con potencia variable (2 – 5 m) y una extensión de decenas de metros, esta zona está principalmente afectada por procesos de oxidación, encontrándose menas oxidadas (crisocola – malaquita - tenorita) y quedando los minerales de sulfuros (bornita – calcopirita – calcosina – covelina) en las raíces y zonas profundas, vinculadas principalmente estructuras (fallas y vetas NE-SW y E-W), pudiendo representar estas los alimentadores de la mineralización en Los Mantos.

- Los análisis químicos revelaron no solo la presencia de Cu sino también de Ag como mineralización económica en el proyecto Los Mantos; para el caso del Cu se tienen valores de 0.1 a 6.5 % Cu y de 15 – 600 g/ton para Ag. El análisis comparativo de química con litologías demuestra que las rocas afines a presentar concentraciones económicas de Cu son lahares, andesitas autobrechadas, lavas andesíticas grises y vesiculares en conjunto con los horizontes calcáreos (en el contacto de estas litologías); para el caso de la Ag son calizas y andesitas grises las que presentan mayor afinidad.
- La relación entre la mineralización de Cu y Ag en Los Mantos; Cu vinculado preferentemente a bornita – calcopirita como fases principales y en menor medida calcosina - covelina; para el caso de la Ag mayoritariamente bornita - calcosina, existen fases menores tales como sulfosales (tenantita) y esfalerita que tienden a incrementar los contenidos de Ag en el depósito.
- Los estudios de microscopía muestran presencia de materia orgánica (bitumen) y pirita framboidal (botroidal) la cual es evidencia de baja temperatura y actividad bacteriogénica; el papel de la materia orgánica en la mineralización está vinculado a la función de agente reductor y catalizador; en primer lugar preservando la permeabilidad primaria ante los eventos de diagénesis y en segundo lugar como catalizador de la precipitación de Cu y Ag, en la interacción de esta con fluidos hidrotermales que atravesaron los niveles andesíticos vesiculares que la hospeda.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de Geofísica IP (cargabilidad - resistividad) para definir la amplitud y continuidad de los cuerpos mineralizados, así como su alcance en profundidad y extensión de la zona de sulfuros. Las zonas de óxidos de cobre está acompañada por presencia de sílice +/- feldespatos potásico y baritina, por lo que debido a la presencia de esta última se debería considerar el hecho de realizar estudio de gravimetría para determinar el alcance de la zona de óxidos.
- Realizar análisis de multielementos (ICP + Au) con el fin de identificar diferentes elementos asociados a la mineralización de Cu. De la misma manera, sería necesario realizar muestreo sistemático (mallas de muestreo de 100X100 y 50X50) de afloramientos y subsuelo (calicatas) para definir cuál es la distribución y signatura geoquímica del proyecto.
- Se recomienda realizar cartografiado superficial a detalle (ejemplo a escala 1/2000) para definir a escala local los controles implicados en la ocurrencia de mineralización en el sector de estudio.
- Realizar análisis de isótopos de C y S en las zonas de mineralización (carbonatos, sílice), con la finalidad de reafirmar la idea de que las rocas que hospedan mineralización tuvieron materia orgánica (o fueron reservorio de hidrocarburos) y que la presencia de carbonatos y pirita framboidal proviene de la degradación de la materia orgánica y actividad biogénica.
- Tomar muestras para datación en las zonas mineralizadas ricas en Feldespato potásico y comprobar si corresponden a la misma edad que las rocas del batolito de Cabildo, esto ayudaría a definir si los intrusivos del batolito de Cabildo están implicados en la génesis de mineralización en Los Mantos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAYA, M. 1988. Reporte Interno - Estudio Geológico Minero del Área 3 - Hoja Ñilhue. Geología de Minas y Exploración. Cabildo – Chile. Pg. 1-70.
- AREVALO C. 1969. Facies Aluviales, Laharicas y Lacustres del Miembro Pitipeumo, Formación Las Chilcas. Memoria para optar el Título de Geólogo - Universidad de Chile. Pg. 1-19.
- ARRIBASPLATA, D. 2013. Reporte Interno Geología del Sector Los Mantos. Compañía Minera Cerro Negro. Cabildo - Chile. Pg. 1-65.
- BORIC, R., HOLMGREN, C. WILSON, N.S.F. & ZENTILLI, M. 2002. The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. Vol. 2. Pg. 185-205.
- BROWN, A.C. 1992. Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits. Geoscience Canada. Vol. 19. No. 3. Pg. 125-141.
- CARRILLO-ROSUA F.J., BOYCE, A.J., MORALES-RUANO, S., MORATA, D., ROBERTS, S., MUNIZAGA, F. & MORENO-RODRIGUEZ, V. 2014. Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean Manto-Type Cu-(Ag) Deposits, Coastal Range of central Chile. Ministry of Science and FEDER. Pg. 1-26.
- CARRILLO-ROSUA F.J., MORALES-RUANO, S., MORATA, D., BOYCE, A.J., BELMAR, M., FALLICK, A.E., FENOL, P. & MUNIZAGA, F. 2005. Sulfur Isotope Studies in Chilean "Manto"-Type Cu-(Ag) Deposits in the Coastal Range of Central Chile. Pg. 602-607.
- CARTER, W. & ALISTE, N. 1962. Geology and ore deposits of the Ligua Quadrangle, Aconcagua Province, Chile. Informe Inédito - Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago – Chile. Pg. 9-12.
- COX, D.P., LINDSEY, D.A., SINGER, D.A., MORING, B.C. & DIGGLES, M.F. 2003. Sediment-Hosted Copper Deposits of the World: Deposits Models and Database. United States Geological Survey – United States Department of the Interior. Pg. 1-55.
- DÁVILA, J. 2011. Diccionario geológico. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima - Perú. Pg. 263–638.

ELGUETA, S., HODGKIN, A., RODRÍGUEZ, E. & SCHNEIDER, A. 1990. The Cerro Negro Mine, Chile, Mineralization in a Volcanoclástico Environment Stratabound Ore Deposits in the Andes. Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer-Verlag. No. 8. Pg. 463-472.

ESPINOZA, W. 1969. Reporte Interno - Geología del Distrito Minero Los Mantos de Catemú - Los Portales. Provincia de Aconcagua. Santiago – Chile. Pg. 1-15.

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO. 2012. Preparado por Geotechnos para Compañía Minera Cerro Negro. Capítulo 4 – Línea Base. Santiago – Chile. Pg. 4-20.

HAYES, T.S., COX, D.P., PIATAK, N.M. & SEAL R.R. 2015. Sediment-Hosted Stratabound Copper Deposit Model. United States Geological Survey Scientific Investigations. Report 2010-5070-M. Pg. 20-95.

INJOQUE, J. 1993. Reporte Interno - Geología del Distrito Minero Cerro Negro – Catemú. Compañía Minera Cerro Negro. Cabildo – Chile. Pg. 1-29.

LEFEBURE, D.V. & RAY, G.E. 1998. Unconventional Metal Deposits in Volcanic Arcs. Metallogeny of Volcanic Arcs. British Columbia Geological Survey. Vancouver - Canada. Pg. 15–24.

LINDSEY, D.A., WOODRUFF, L., CANNON, W.F., COX, D.P. & HERAN, W.D. 1996. Sediment-Hosted Cu Deposits. Ore Deposits Models. United States Geological Survey. Bulletin 1693. Model 30b. Pg. 214-224.

MAKSAEV, V. 2001. Reseña Metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la Metalogénesis Andina. Santiago – Chile. Pg. 7-37.

MAKSAEV, V. & ZENTILLI, M. 2002. Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: An Overview. Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. PGC Publishing – Adelaide. Vol. 2. Pg. 185-205.

MORALES, S., BELMAR, M., MORATA, D., CARRILLO-ROSUA, J., HASLER, K., AGUIRRE, L. & FENOLL, P. 2005. Relationships between very low-grade metamorphism and Cu-Stratabound ore

deposits in the Coastal Range of central Chile. 6th International Symposium of Andean Geodynamics. Pg. 527-530.

MUNIZAGA, F., REYES, J.C. & NYSTRÖM, J.O. 1994. Razones isotópicas de S de los sulfuros del Distrito Minero de Cerro Negro: un posible indicador de los depósitos estratoligados de Cu hospedados en rocas sedimentarias lacustres. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 21. No. 2. Pg. 189-195.

PEEBLES F. 1971. Estudio Geológico de las pertenencias Portales – Distrito Minero Cerro Negro – Provincia Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago – Chile. Pg. 1-40.

PIRACES, R. & MAKSAEV, V. 1977. Geología de la Hoja de Quillota Escala: 1/250 000 (IV y V Región). Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago – Chile. Pg. 69-88.

RIVANO, S., SEPÚLVEDA, P., BORIC, R., HERVÉ, M. & PUIG, A. 1986. Antecedentes radiométricos para una edad Cretácica Inferior de la Formación Las Chilcas. *Revista Geológica de Chile*. No. 27. Pg. 27-32.

RUIZ, C., AGUIRRE, L., CORVALÁN, J., KLOHN, C., KLOHN, E. & LEVI, B. 1965. Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago – Chile. Pg. 198-208.

STANTON, R.L. 1972. *Ore Petrology*. Ed. McGraw-Hill. New York. Pg. 540-542.

TOURTELOT, E.B. & VINE, J.D. 1976. Copper Deposits in Sedimentary and Volcanogenic Rocks. *Geology and Resources of Copper*. United States Geological Survey – United States Department of Interior. Geological Survey Professional Paper N 907-C. Pg. 1-31.

WILSON, N.S.F. & ZENTILLI, M. 1999. The Role of Organic Matter in the Genesis of the El Soldado Volcanic-Hosted Manto-Type Cu Deposit, Chile. *Economic Geology*. Vol. 94. Pg. 1115-1136.

WILSON, N.S.F., ZENTILLI, M., REYNOLS, P.H. & BORIC, R. 2003. Age of Mineralization by Basinal Fluids at the El Soldado Manto-Type Copper Deposit, Chile: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of K-feldspar. *Chemical Geology – Isotope Geoscience*. Vol. 197; Pg. 161-176.

WILSON, N.S.F., ZENTILLI, M. & SPIRO, B. 2003. A sulfur, Carbon, Oxygen, and Strontium Isotope Study of the Volcanic-Hosted El Soldado Manto-Type Copper Deposit, Chile; The essential role of Bacteria and Petroleum. *Economic Geology*. Vol. 98. Pg. 163-174.

YARDLEY, B.W.D. & CLEVERLEY, J.S. 2013. The Role of Metamorphic Fluids in the Formation of Ore Deposits. *Ore Deposits in an Evolving Earth*. Geological Society, London, Special Publication. Pg. 393-408.

ZENTILLI, M., COLLINS, P.G., BORIC P. & WILSON, N.S.F. 2009. Diagenetic pyrite in the El Soldado Stratabound Copper Deposit: A link with the petroleum system of the Cretaceous basin of Central Chile. *XII Congreso Geológico Chileno*. Pg. 1-5.

ZENTILLI, M., MUNIZAGA, F., GRAVES, M.C., BORIC, R., WILSON, N.F.S., MUKHOPADHYAY, P.K. & SNOWDEN, L.R. 1997. Hydrocarbon involvement in the Genesis of the Ore Deposits: An Example in Cretaceous Stratabound (Manto-Type) Copper Deposits of Central Chile. *International Geology Review*. Vol. 39. Pg. 1-21.

ANEXO

Tabla N°06 - Puntos de lectura de Microsonda muestra M-1

MUESTRA M-1																
No.	Au	S	As	Mn	Pb	Ag	Fe	Bi	Sb	Co	Ni	Cu	Zn	Total	Analisis	Mineral
9	0	32.90	0.004	0	0.03	0	30.02	0	0	0	0	31.366	0	94	CN-M 1	Cp
10	0.044	31.67	0	0.008	0.308	0.001	28.85	0	0	0	0	30.181	0	91	CN-M 2	Cp
11	0	33.50	0.025	0.116	0.515	0	29.86	0	0	0	0	33.1	0	97	CN-M 3	Cp
12	0.022	33.99	0.028	0.017	0.477	0	30.38	0	0	0	0	34.018	0.074	99	CN-M 4	Cp
13	0.04	33.87	0.02	0	0.675	0	30.50	0	0	0	0	33.846	0	99	CN-M 5	Cp
14	0.029	17.92	0	0	73.464	0	8.25	0	0	0	0	8.597	0	108	CN-M 6	Ga en Cp
15	0.004	34.13	0.047	0.041	0	0.005	30.53	0	0	0	0.007	32.829	0	98	CN-M 7	Cp
16	0	34.17	0	0	0.038	0	31.00	0	0	0	0	34.167	0	99	CN-M 8	Cp
17	0	0.01	0	0.056	0	0	1.70	0.062	0	0.005	0.011	0.039	0.021	2	CN-M 9	Error
18	0	33.75	0	0.006	0	0.029	2.08	0	0	0	0	0.789	61.836	98	CN-M 10	Sphal
19	0	32.52	0	0.019	0	0	1.01	0	0	0	0	0.64	62.855	97	CN-M 11	Sphal
20	0.047	52.22	0	1.599	0	0.143	44.35	0	0.004	0	0.011	0.631	0.081	99	CN-M 12	Py
21	0.021	13.14	0	0	86.064	0	0.16	0	0	0	0.001	0.085	0.11	100	CN-M 13	Ga
22	0	51.68	0.098	0.044	1.067	0.049	44.50	0	0	0	0.016	1.832	0.142	99	CN-M 14	Py
23	0	34.25	0	0	0.034	0	31.06	0.004	0	0	0	33.42	0.054	99	CN-M 15	Cp
24	0	47.48	0	0.155	0.734	0.069	42.26	0	0.041	0	0.022	5.974	0.033	97	CN-M 16	Py
25	0	24.00	0	0.107	31.823	0.16	18.27	0	0	0	0	13.278	0.126	88	CN-M 17	Ga+Cp
26	0	14.49	0	0	81.381	0	1.37	0	0	0	0	1.455	5.967	105	CN-M-1-1	Ga+Zn
Promedio	0.0115	30.87	0.01233	0.12044	15.367	0.02533	22.563	0.0037	0.003	0.0003	0.004	16.458	7.2944	93		
Max.	0.047	52.22	0.098	1.599	86.064	0.16	44.503	0.062	0.041	0.005	0.022	34.167	62.855	108		
Min.	0	0.01	0	0	0	0	0.163	0	0	0	0	0.039	0	2		

Tabla N°07 – Puntos de lectura de microsonda muestra M-2

MUESTRA M-2																
No.	Au	S	As	Mn	Pb	Ag	Fe	Bi	Sb	Co	Ni	Cu	Zn	Total	Analists	Mineral
27	0.044	25.38	0	0.023	0.101	0.174	11.61	0	0	0	0	62.293	0	100	CN-M-2 1	Bo
28	0	25.38	0	0.005	0	0.143	11.61	0	0.056	0	0	62.381	0.006	100	CN-M-2 2	Bo
29	0	1.25	0	0.006	0.031	0.233	1.46	0	0.002	0.001	0	4.376	0	7	CN-M-2 3	Error (?Bo)
30	0	25.45	0	0.005	0	0.137	10.35	0	0	0	0	64.242	0	100	CN-M-2 4	Bo
31	0.063	25.68	0	0	0.035	0.238	11.46	0	0.007	0	0	61.775	0	99	CN-M-2 5	Bo
32	0.025	23.14	0	0.027	0.012	0.403	12.59	0	0	0	0	60.133	0.017	96	CN-M-2 6	Bo
33	0	25.57	0	0.006	0.008	0.27	11.54	0	0	0	0.018	62.104	0	100	CN-M-2 7	Bo
34	0.011	4.20	0	0	0.094	0.837	0.90	0.027	0	0	0	21.221	0	27	CN-M-2 8	Carb Cu?
35	0.078	25.67	0	0.002	0.008	0.292	11.34	0.083	0	0	0	61.32	0.003	99	CN-M-2 9	Bo
36	0	25.09	0	0.006	0.066	0.702	11.05	0	0	0	0.014	60.565	0.001	97	CN-M-2 10	Bo
37	0	14.68	0.036	0	0.008	0.996	16.80	0.045	0	0	0	46.937	0	80	CN-M-2 11	?Cu5Fe2S3
38	0.006	0.00	0	0.866	0.015	0	57.89	0.004	0.037	0.084	0.002	0.067	0.084	59	CN-M-2 12	Mag
39	0.054	25.43	0	0.024	0	0.221	11.48	0	0	0	0	60.274	0	97	CN-M-2 13	Bo
40	0	25.82	0	0.007	0.012	0.427	11.02	0	0.009	0	0	60.207	0	98	CN-M-2 14	Bo
41	0.085	24.91	0	0.004	0.078	0.402	10.76	0	0.025	0	0.04	58.423	0	95	CN-M-2 15	Bo
42	0	25.56	0	0	0.019	0.286	11.17	0	0	0	0.009	60.488	0	98	CN-M-2 16	Bo
43	0	0.02	0	0	81.724	0	0.00	0	0.922	0	0	0.387	0	83	CN-M-2 17	Cont. Pb
44	0.004	21.57	0	0.018	0	0.379	0.74	0.015	0	0	0	76.046	0	99	CN-M-2 18	Cc
45	0	11.26	0	0.011	0	0.014	0.11	0.203	0	0	0.002	0.251	0	12	CN-M-2 19	Yeso?
46	0	25.48	0	0	0.019	0.27	11.39	0	0.011	0	0	59.504	0	97	CN-M-2 20	Bornite
47	0	2.92	0	0	0.15	0.018	37.97	0	0	0.067	0	15.048	0.01	56	CN-M-2 21	?Fe-Cu-S
Promedio	0.017619	18.30733	0.00171	0.0481	3.9229	0.30676	12.535	0.018	0.051	0.0072	0.004	45.621	0.0058	80.85		
Max.	0.085	25.824	0.036	0.866	81.724	0.996	57.885	0.203	0.922	0.084	0.04	76.046	0.084	100.2		
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.067	0	7.356		

Tabla N°08 - Puntos de lectura de microsonda muestra M-3

MUESTRA M-3																
No.	Au	S	As	Mn	Pb	Ag	Fe	Bi	Sb	Co	Ni	Cu	Zn	Total	Analisis	Mineral
48	0.023	0.01	0.038	0	0	0	0.20	0.055	0	0.004	0	51.237	0	52	CN-M-3 1	Malaq.?
49	0	34.28	0	0	0.068	0	30.77	0.004	0.025	0	0.021	34.193	0	99	CN-M-3 2	Cp
50	0.023	34.27	0	0	0	0.016	31.05	0	0.021	0	0.008	33.954	0	99	CN-M-3 3	Cp
51	0	25.52	0	0	0	0.145	11.61	0	0	0	0.008	63.064	0	100	CN-M-3 4	Bo
52	0	34.29	0	0	0.041	0	31.05	0	0	0	0	34.718	0	100	CN-M-3 5	Cp
53	0.005	18.30	7.749	0.008	0	53.05	0.96	0.053	0	0	0	20.946	0	101	CN-M-3 6	?Cu2Ag3AsS4
54	0	19.77	9.299	0	0	44.327	1.44	0	0	0	0	25.43	0.083	100	CN-M-3 7	?CuAgAsS4
55	0	23.69	14.74	0.01	0.054	22.656	3.00	0	0	0	0.03	35.517	0.343	100	CN-M-3 8	?Cu3AgAsS4
56	0	34.03	0	0.01	0	0	30.40	0	0	0	0	34.367	0.035	99	CN-M-3 9	Cp
57	0	34.32	0.01	0	0.113	0	31.08	0	0	0	0.02	34.702	0	100	CN-M-3 10	Cp
58	0	25.87	0.009	0	0.07	0	12.95	0	0.003	0	0	60.058	0	99	CN-M-3 11	Bo
59	0	34.31	0.036	0.021	0	0.002	30.32	0	0	0	0	34.17	0.025	99	CN-M-3 12	Cp
60	0	25.27	0	0	0.264	0	10.20	0	0.081	0	0	60.263	0	96	CN-M-3 13	Bo
61	0.008	25.46	0	0	0	0.263	10.94	0	0	0	0	58.745	0	95	CN-M-3 14	Bo
62	0	25.61	0.027	0.023	0	0.218	11.15	0.049	0	0	0	61.352	0	98	CN-M-3 15	Bo
63	0	23.48	0	0	0.179	0.133	9.74	0	0	0	0.007	54.008	0	88	CN-M-3 16	Bo
Promedio	0.003688	26.15438	1.99425	0.0045	0.0493	7.55063	16.052	0.0101	0.008	0.0003	0.006	43.545	0.0304	95.41		
Max.	0.023	34.316	14.74	0.023	0.264	53.05	31.077	0.055	0.081	0.004	0.03	63.064	0.343	101.1		
Min.	0	0.01	0	0	0	0	0.195	0	0	0	0	20.946	0	51.56		

Tabla N°09 - Puntos de lectura de microsonda muestra M-4

MUESTRA M-4																
No.	Au	S	As	Mn	Pb	Ag	Fe	Bi	Sb	Co	Ni	Cu	Zn	Total	Analisis	Mineral
64	0.03	28.95	0.006	0.371	0.275	0.028	6.52	0	0	0	0	25.1	32.896	94	CN-M-4 1	CuZnFe ?
65	0.022	29.39	0	0.326	0.364	0.142	3.94	0	0	0	0	20.496	31.438	86	CN-M-4 2	CuZnFe ?
66	0	27.42	0.021	0.323	13.595	0.009	0.95	0	0	0	0.005	4.002	46.312	93	CN-M-4 3	Ga-Sph?
67	0.02	28.80	0	0.344	0.28	0.193	6.48	0	0	0	0	34.326	19.579	90	CN-M-4 4	CuZnFe framb
68	0.086	25.48	0.008	0.036	0.105	0.131	11.32	0.056	0	0	0.007	60.764	0	98	CN-M-4 5	Bo
69	0.002	24.61	0	0.028	5.121	0.098	11.22	0	0	0	0.013	58.554	0	100	CN-M-4 6	Bo
70	0	25.68	0	0	0.054	0.074	11.23	0	0	0	0	60.413	0.018	97	CN-M-4 7	Bo
71	0	25.94	0	0.001	0.027	0.102	11.38	0	0	0	0	59.114	0	97	CN-M-4 8	Bo
72	0.025	23.70	0	0.388	0.12	0.175	12.85	0	0	0	0	54.15	0	91	CN-M-4 9	Bo
73	0.014	11.54	0.014	0.595	0.181	0	3.90	0	0	0	0.032	23.245	0.02	40	CN-M-4 10	Bo - <1μ
74	0.063	1.06	0	0.856	2.738	0.055	0.07	0	0	0	0.007	2.611	0.027	7	CN-M-4 11	Error
75	0.023	25.38	0.077	0.1	0	0	10.34	0	0	0	0	55.353	0.031	91	CN-M-4 12	Bo
76	0.042	33.91	0.001	0.01	0	0.076	29.21	0	0	0	0.034	34.085	0.025	97	CN-M-4 13	Cp
77	0	25.15	0	0	0	0.046	10.87	0.004	0	0	0	60.271	0	96	CN-M-4 14	Bo
78	0.041	25.72	0.009	0	0	0.039	11.73	0	0	0	0	60.717	0.009	98	CN-M-4 15	Bo
79	0.021	25.32	0	0.001	0.004	0.053	13.32	0.034	0	0	0	55.548	0	94	CN-M-4 16	Bo
80	0	33.28	0	0.032	0.011	0.036	29.33	0	0	0	0	34.575	0	97	CN-M-4 17	Cp
81	0.015	25.32	0	0	0.023	0.039	11.00	0	0	0	0.007	59.18	0	96	CN-M-4 18	Bo
82	0	16.48	0.046	0.022	59.642	0.037	4.61	0	0	0	0.019	25.898	0.058	107	CN-M-4 19	CuSFePb ?
83	0	25.36	0	0.086	0.035	0.138	11.63	0.045	0	0	0.002	61.458	0	99	CN-M-4 20	Bornite
84	0	13.56	0	0.011	79.962	0.088	0.91	0	0	0	0	5.131	0.039	100	CN-M-4 21	Ga+Cu?
85	0.009	25.51	0	0.015	0.039	0.444	11.15	0	0	0	0	61.601	0.023	99	CN-M-4 22	Bo
86	0	12.86	0	0.012	86.951	0	0.05	0	0	0	0	0.948	0	101	CN-M-4 23	Ga
87	0.027	11.21	0	0.001	0	0	0.02	0.311	0	0	0.021	0	0	12	CN-M-4 24	Error
88	0	12.95	0	0	84.754	0	0.00	0	0.03	0	0	0.027	0.042	98	CN-M-4 25	Ga
Promedio	0.0176	22.5818	0.00728	0.14232	13.371	0.08012	8.9598	0.018	0.001	0	0.006	36.703	5.2207	87.11		
Max.	0.086	33.912	0.077	0.856	86.951	0.444	29.33	0.311	0.03	0	0.034	61.601	46.312	106.8		
Min.	0	1.058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.482		

Tabla N°10 - Puntos de lectura de microsonda muestra M-5

MUESTRA M-5																
No.	Al	S	As	Mn	Pb	Ag	Fe	Bi	Sb	Co	Ni	Cu	Zn	Total	Analisis	Mineral
89	0.024	33.99	0	0	0	0	31.12	0	0.005	0	0	34.265	0	99	CN-M-5 1	Cp
90	0	12.91	0	0	85.166	0	0.00	0	0	0	0	0	0	98	CN-M-5 2	Ga
91	0.042	34.07	0	0.023	0.101	0.013	29.96	0.003	0	0	0	33.502	0	98	CN-M-5 3	Cp
92	0	13.03	0	0.006	86.348	0	0.59	0	0	0	0	1.096	0.098	101	CN-M-5 4	Ga
93	0	33.50	0	0.038	0.015	0	29.38	0	0	0	0.01	33.141	0.062	96	CN-M-5 5	Cp
94	0.023	34.26	0	0.046	0	0.025	29.71	0	0	0	0	33.361	0.029	97	CN-M-5 6	Cp
95	0	13.32	0	0.016	85.902	0	0.32	0	0	0	0	0.766	0	100	CN-M-5 7	Ga+Cu
96	0.026	33.75	0	0	0.229	0	30.07	0	0	0	0	33.696	0	98	CN-M-5 8	Cp
97	0	34.32	0	0	0.015	0	30.51	0	0	0	0	33.765	0	99	CN-M-5 9	Cp
98	0.012	33.79	0	0	0.15	0.065	29.67	0	0	0	0.01	32.768	0.08	97	CN-M-5 1	Cp
99	0	32.07	0	0.039	0.079	0.089	0.28	0	0	0	0	0.229	62.137	95	CN-M-5 1	Sphal
100	0	13.41	0	0.019	86.304	0	0.21	0	0	0	0.034	0.222	0.806	101	CN-M-5 1	Ga+Cu
101	0.008	32.64	0.001	0.005	0	0	2.11	0	0	0	0.003	1.757	59.862	96	CN-M-5 1	Sphal
102	0.04	28.98	0.011	0.036	26.199	0.012	22.66	0	0	0	0.004	24.996	0.543	103	CN-M-5 1	Cp
103	0	12.98	0	0.021	85.517	0	0.08	0	0.018	0	0	0.067	0.178	99	CN-M-5 1	Ga
104	0	32.53	0	0	0	0	0.81	0.027	0.002	0	0	0.455	63.302	97	CN-M-5 1	Sphal
105	0.055	32.55	0	0.026	0.067	0	0.34	0	0.01	0	0	0.111	63.702	97	CN-M-5 1	Sphal
106	0	32.79	0	0.016	0.119	0.011	0.83	0	0	0	0	0.066	64.158	98	CN-M-5 1	Sphal
107	0	13.20	0	0	87.815	0	0.27	0	0	0	0	0.015	2.817	104	CN-M-5 1	Ga
108	0	13.27	0	0	86.228	0	0.02	0	0	0	0	0.091	0.118	100	CN-M-5 2	Ga
109	0.019	32.49	0	0.018	0.008	0.001	0.10	0	0	0	0	0.046	63.201	96	CN-M-5 2	Sphal
110	0	14.89	0	0.687	79.308	0.173	2.96	0	0	0	0	0.468	0.331	99	CN-M-5 2	Ga (reem Py)
111	0	49.31	0.476	0.162	1.937	0.269	42.76	0	0	0	0.063	0.835	0.2	96	CN-M-5 2	Py
112	0.002	39.10	0.327	0.331	27.198	0.339	31.12	0	0	0	0.04	0.606	0.094	99	CN-M-5 2	Py
113	0.031	31.92	0	0.13	0.202	0.023	0.75	0	0	0	0.008	0.166	61.215	94	CN-M-5 2	Sphal
114	0.08	29.38	0.005	0.078	0.214	0.066	1.08	0	0	0	0	0.257	58.414	90	CN-M-5 2	Sphal
115	0	12.69	0	0.031	83.772	0	0.45	0	0	0	0	0.135	0.975	98	CN-M-5 2	Ga
116	0	13.14	0	0	86.761	0	0.33	0	0	0	0.013	0.579	0.444	101	CN-M-5 2	Ga
117	0	13.16	0	0.004	87.981	0	0.39	0	0	0	0	0.766	0	102	CN-M-5 2	Ga
118	0	13.32	0	0.013	85.958	0	0.25	0	0	0	0	0.653	0	100	CN-M-5 3	Ga
119	0	34.42	0	0	0.023	0	30.50	0	0	0	0	34.239	0.042	99	CN-M-5 3	Cp
120	0.164	34.59	0	0.012	0.06	0	30.88	0	0	0	0.013	34.301	0	100	CN-M-5 3	Cp
Promedio	0.016438	26.24166	0.02563	0.05491	33.865	0.03394	11.89	0.0009	0.001	0	0.006	10.544	15.713	98.39		
Max.	0.164	49.314	0.476	0.687	87.981	0.339	42.755	0.027	0.018	0	0.063	34.301	64.158	104.1		
Min.	0	12.686	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89.57		