



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**OCURRENCIA DE COBALTO Y SU ASOCIACIÓN EN LA
MINERALIZACIÓN DE HIERRO EN EL YACIMIENTO BRONCE SUR,
DISTRITO PLEITO, REGIÓN DE ATACAMA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JORGE IGNACIO CHEPILLO CORTÉS

PROFESOR GUÍA

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MARIO ROJO LARA

MANUEL CARABALLO MONGE

Este trabajo ha sido financiado por CAP Minería

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: GEÓLOGO
POR: JORGE IGNACIO CHEPILLO CORTÉS
FECHA: ENERO 2019
PROFESOR GUÍA: BRIAN TOWNLEY CALLEJAS**

**OCURRENCIA DE COBALTO Y SU ASOCIACIÓN EN LA MINERALIZACIÓN DE
HIERRO EN EL YACIMIENTO BRONCE SUR, DISTRITO PLEITO, REGIÓN DE
ATACAMA.**

El yacimiento ferrífero Bronce Sur de propiedad de la Compañía Minera del Pacífico (CMP) se encuentra localizado a 75 km al sur de Vallenar, III Región de Atacama. Forma parte del Distrito Minero El Pleito, que incluye depósitos tipo Magnetita-Apatito (iron oxide apatite - IOA) pertenecientes a la Franja Ferrífera Chilena (Ruiz et al., 1965).

Preliminarmente, se maneja la hipótesis que el cobalto (Co) se puede encontrar como impureza dentro de algunos sulfuros como piritas, calcopiritas, pirrotinas, etc. Debido a esto, el principal objetivo de este estudio es identificar la ocurrencia y contenido de cobalto en el yacimiento Bronce Sur y establecer una relación temporal con la mineralización de hierro (Fe) predominante en el distrito. Para lograr este objetivo, se validó con un estudio trazable desde el levantamiento geológico, revisión de sondajes y finalmente, análisis químicos a través de digestión con metaborato de litio y análisis ICP MS/OES para 10 elementos mayores, 45 menores, incluidas tierras raras, análisis mineraloquímico QEMSCAN® y cuantitativo de microsonda electrónica (EMPA) de cortes pulidos/transparentes hechos en muestras con abundante presencia de piritas. Para el manejo de datos se discriminó la mena de hierro entre maciza, brechosa y diseminada.

Las piritas reconocidas en el yacimiento están fuertemente ligadas a la mineralización de Fe; se reconocieron piritas con un hábito cúbico más pulido en desmedro de otras piritas, relacionadas a la mena de alta ley de Fe, las cuales son de dimensiones menores y de color más amarillo. Las presumibles piritas cobaltíferas son más pálidas y al microscopio presentan una leve anisotropía.

A partir de los resultados de los análisis químicos para muestras con Fe macizo se evidencia que la concentración promedio de cobalto es 275,5 ppm de Co. Además, se observa una correlación positiva entre cobalto y azufre, no así para elementos siderófilos como el Ni, Cr, Au, As, Mo. Los estudios de microsonda electrónica realizados a cristales de piritas indican contenidos de Cobalto de hasta 1,65 wt % con una media de 0,8 wt %. La distribución y concentración del Co es heterogénea, los peaks se dan por lo general en los bordes de los cristales, lo que permite suponer una zonación en la mineralización de Co. Además, gracias a las asociaciones minerales observadas, estas piritas enriquecidas en Co están relacionadas a un evento hidrotermal de carácter mesotermal producto de los fluidos salinos exsueles por el enfriamiento de la fase hidrotermal en donde ocurrió la mineralización de magnetita maciza. El evento relacionado al Co presenta minerales como feldespato potásico, epidota, cuarzo, calcita, calcopirita, magnetita y menor yeso, este fue posterior a la mineralización maciza de magnetita. El evento precipitó el Co que estaba en solución para concentrarlo en piritas. Por otro lado, este metal está sustituyendo al Fe en la estructura de la pirita en concentraciones bajas. Finalmente, los resultados de este estudio confirman el rol de la pirita como un repositorio de elementos trazas. Además, entrega información útil para los estudios sobre la génesis de los depósitos IOA

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer al Sr. Osvaldo Gómez por ser un gran tutor en CAP, por apoyarme, guiarme y educarme a lo largo de este trabajo, transmitirme sus conocimientos y consejos como profesional, ser exigente, por tener paciencia, préstame ayuda en lo que necesitara y hacer todo lo posible por que esta memoria se desarrollara de la mejor manera.

Además, quiero agradecer a los miembros de mi comisión el Dr. Brian Townley por ser mi profesor guía, por su gran disposición, su ayuda prestada para esta memoria y al Dr. Manuel Caraballo por sus conocimientos y su ayuda para el correcto desarrollo de esta memoria.

De igual modo, agradezco de Mario Rojo y CAP Minería por darme la oportunidad de poder realizar mi memoria en la empresa. También quisiera agradecer a todos los que conforman la unidad de geología de CMP, por ser gente maravillosa con los cuales compartí durante ocho meses y siempre prestaron una muy buena disposición en la oficina y en los terrenos, además brindaron su ayuda en lo que necesitara e hicieron más ameno mi periodo en la empresa.

Por sobre todo, agradezco a mi familia su apoyo incondicional, en especial a mis padres por formarme como persona, su amor, su apoyo en todo lo que he hecho, por su esfuerzo por educar a sus tres hijos y por darme a conocer esta carrera preciosa. A mis hermanos por ser unos amigos, el cariño que nos une, el poder disfrutar y crecer junto, además agradecer a mis abuelas por entregarme su amor infinito y a mis familiares porque siempre me apoyaron.

Agradecer a mis amigos que conocí en la universidad, a los de plan común con los cuales fueron un gran apoyo y compañía en los primeros años. A todos los geolokos por hacer de los terrenos una experiencia inolvidable y porque pude conocer a grandes personas. Además, quisiera agradecer a todos mis amigos en La Serena a los cuales han sido una parte importante en mi vida, hemos crecido juntos y por todos los buenos momentos que hemos pasado. También, darle las gracias a los Chicos Cap, con los cuales formé grandes lazos y me acompañaron en este proceso de la memoria.

Finalmente, quisiera agradecer a todos los profesores del departamento geología de la universidad con los cuales pude formarme como geólogo entregando todos sus conocimientos en cátedras y terrenos. Además de agradecer de los funcionarios del departamento en especial a Blanquita por su ayuda en todo el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Ubicación y acceso	2
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Metodología.....	5
CAPÍTULO 2.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Cobalto	10
2.2 Depósitos Tipo Kiruna o IOA (Iron oxide-Apatite)	14
2.3 Depósitos Ferríferos chilenos	15
2.4 Génesis de la Mineralización Ferrífera chilena	16
CAPÍTULO 3.....	18
MARCO GEOLÓGICO	18
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL	18
3.1.1 Unidades Estratificadas:	18
3.1.2 Unidades Intrusivas	19
3.1.3 Depósitos Cuaternarios:.....	21
3.1.4 Estructuras	23
3.1.5 Mineralización.....	23
3.1.6 Distrito Pleito-Melón.....	24
3.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	27
3.2.1 Generalidades	27
3.2.2 Litología.....	27
3.2.3 Estructuras locales	30
3.2.4 Mineralización.....	30
3.2.5 Alteración	31
CAPÍTULO 4.....	32
RESULTADOS	32
4.1 Descripciones Petrográficas.....	32
4.1.1 Petrografía	33
4.1.2 Alteraciones.....	34

4.1.2.1 Anfibolitización	35
4.1.2.2 Feldespatización y silicificación.....	36
4.1.2.3 Epidotización y carbonatación	38
4.1.2.4 Alteración supergena	39
4.1.3 Mineralización	40
4.1.3.1 Descripción de piritas	42
4.2 Análisis Químicos.....	46
4.2.1 Análisis univariable	46
4.2.2 Análisis multivariable.....	59
4.3 Qemscan.....	66
4.4 Microsonda electrónica.....	70
CAPÍTULO 5.....	75
DISCUSIONES	75
5.1 Mineralización y alteración hidrotermal.....	75
5.2 Contenido de cobalto	77
CAPÍTULO 6.....	79
6.1 Conclusiones.....	79
6.2 Recomendaciones	80
CAPITULO 7.....	82
Bibliografía	82
CAPITULO 8.....	87
Anexos	87
Anexo A: Resultados Análisis Químicos.....	87
Anexo B: Resultados perfiles Microsonda Electrónica (EMPA).	90
Anexo C: Descripción de Cortes:	97
Anexo D: resumen análisis estadísticos.....	118

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1: PLANO DE ACCESO AL YACIMIENTO BRONCE SUR. FUENTE: DIRECCIÓN DE VIALIDAD, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS	2
FIGURA 2: UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SOBRE MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE TERRENO. SE INDICA	3
FIGURA 3: IMAGEN SATELITAL LOCALIZACIÓN DE SONDAJES. FUENTE: GOOGLE EARTH PRO	5
FIGURA 4: RELACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE FALLA DE ATACAMA (AFZ) Y LOS YACIMIENTOS DE LA FRANJA FERRÍFERA CHILENA, DEPÓSITOS DE COBRE-ORO-ÓXIDOS DE FE (IOCG) Y PÓRFIDOS CUPRÍFEROS DEL CRETÁCICO INFERIOR. EXTRAÍDO DE ESPINOZA (1991).....	16
FIGURA 5 MARCO GEOLÓGICO DEL DISTRITO PLEITO, MODIFICADO DE CARTA GEOLÓGICA DE CREIXELL ET AL., 2012 EL TOFO- CARRIZALILLO.....	22
FIGURA 6: VISTA DESDE SUBSECTOR PLEITO SUR HACIA RAJOS DE BRONCE SUR Y FALDA, PLEITO CENTRAL.....	25
FIGURA 7: PLANTA BRONCE SUR, VOLUMEN DE FE>45% Y FE>55%. EXTRAÍDA PRESENTACIÓN CAP.JULIO 2015.....	26
FIGURA 8: EXTRACTO PLANO GEOLÓGICO PROYECTO PLEITO MODIFICADO INFORME CAP, SECTOR BRONCE SUR (FORTIN, 2014).....	29
FIGURA 9 MUESTRA DE ROCA ANDESÍTICA AFECTADA POR UNA ANFIBOLITIZACIÓN	33
FIGURA 10: MUESTRA 266367: A) CORTE A NICOLES PARALELOS B) CORTE A NICOLES CRUZADOS. TEXTURA PORFÍDICA COMPUESTA DE FENOCRISTALES DE PLAGIOCLASAS INMERSOS EN UNA MASA FUNDAMENTAL QUE ESBOZA UN ARREGLO HIPIDIOMÓRFICO GRANULAR, 50X.....	34
FIGURA 11: MUESTRA 266370: ROCA ACTINOLITIZADA CON CRISTALES DE ACTINOLITA ACICULAR.....	35
FIGURA 12: MUESTRA 266370 APATITO JUNTO A MINERALES METÁLICOS Y ACTINOLITA, NICOLES PARALELOS Y CRUZADOS RESPECTIVAMENTE, 50X.	36
FIGURA 13 MUESTRA 266358: VETA DE FELDESPATO K. CON PIRITA Y MAGNETITA	37
FIGURA 14: MUESTRA 266358: AGREGADO DE FELDESPATOS POTÁSICOS AFECTADOS POR UNA MODERADA A FUERTE ARGILIZACIÓN, NICOLES PARALELOS Y CRUZADOS RESPECTIVAMENTE, 100X.	37
FIGURA 15: MUESTRA 266358: PARCHES DE EPIDOTA, NICOLES PARALELOS Y CRUZADOS, 200X.....	38
FIGURA 16: MUESTRA 266360: SE OBSERVA LA TEXTURA DE AGREGADO CRISTALINO DE GRANO FINO COMPUESTO POR EPIDOTA, FELDESPATO, PIRITA, MAGNETITA. VETILLAS DE MAGNETITA CORTAN LA TEXTURA DESCRITA.	38
FIGURA 17: MUESTRA 266367: ROCA CON ALTERACIÓN PROPILÍTICA CON EPIDOTA, CARBONATO, APATITO.	39
FIGURA 18: MUESTRA 266367: CÚMULO DE EPIDOTA Y MINERALES METÁLICOS (MAGNETITA MARTITIZADA Y CALCOPIRITA), NICOLES PARALELOS Y CRUZADOS RESPECTIVAMENTE, 100X.....	39
FIGURA 19: MUESTRA 266508: (A) PIRITA Y CALCOPIRITA RELLENANDO ESPACIOS ABIERTOS EN MAGNETITA, LUZ REFLEJADA, 100X. (B) RUTILO EN CONTACTO SIMPLE CON MAGNETITA, LUZ REFLEJADA, 200X. (C) CRISTALES DE MAGNETITA MARTITIZADA JUNTO A CALCOPIRITA, LUZ REFLEJADA, 200X. (D) CALCOPIRITA RELLENANDO ESPACIOS ABIERTOS EN PIRITA, LUZ REFLEJADA, 200X.	41
FIGURA 20: MUESTRA 266357 A) MAGNETITA RELLENANDO ESPACIOS ABIERTOS EN PIRITA, LUZ REFLEJADA, 100X. (B) REEMPLAZO DE HEMATITA POR MAGNETITA A PARTIR DE LOS BORDES, LUZ REFLEJADA, 100X. (C) CALCOPIRITA REEMPLAZADA A PARTIR DE LOS BORDES POR CALCOSINA, LUZ REFLEJADA, 200X.....	42
FIGURA 21: MUESTRA 266505: A SE OBSERVA PIRITA DISEMINADA 38% DE LA ROCA A LA DERECHA, B EN MUESTRA DE MANO A LA IZQUIERDA CORTE A NICOLES CRUZADOS 50X.:	43
FIGURA 22: MUESTRA 266359: BRECHA HIDROTHERMAL CON GRAN CONTENIDO DE PIRITA, FELDESPATO POTASICO Y MAGNETITA	44
FIGURA 23: MUESTRA 266366: VETILLA COMPUESTA DE EPIDOTA, APATITO, CARBONATOS Y MINERALES METÁLICOS, A) VETILLA DE EPIDOTA CON PIRITA A MUESTRA DE MANO. B) PIRITA, CALCOPIRITA Y MAGNETITA A LUZ REFLEJADA C) Y D) CORTE A NICOLES PARALELOS Y CRUZADOS RESPECTIVAMENTE, 100X.....	45
FIGURA 24: MUESTRA 266352: A) A LA DERECHA A MUESTRA DE MANO MAGNETITA CON VETILLAS DE APATITO Y PIRITA, B) A LA IZQUIERDA CORTE PULIDO/TRANSPARENTE A LUZ REFLEJADA. PIRITA RELLENANDO ESPACIOS ABIERTOS EN MAGNETITA 50X.	46
FIGURA 25: HISTOGRAMA Y DATOS ESTADÍSTICOS CO.	47
FIGURA 26: HISTOGRAMA Y DATOS ESTADÍSTICOS S	48
FIGURA 27: A, B, C, D Y E TRAMOS DE SONDAJES DE BRONCE SUR CON DESPLIEGUE DE LEYES DE S Y DE CO.	49
FIGURA 28: DIAGRAMA DE CAJA DE ELEMENTOS TRAZA	52
FIGURA 29: HISTOGRAMAS ELEMENTOS TRAZA	53
FIGURA 30: DIAGRAMA DE ELEMENTOS NORMALIZADOS A VALORES DE LA CORTEZA	54

FIGURA 31: GRÁFICO DE CAJA ELEMENTOS MAYORES.....	56
FIGURA 32: HISTOGRAMA DE ELEMENTOS MAYORES	56
FIGURA 33: GRÁFICO DE CAJA DE TIERRAS RARAS.	58
FIGURA 34: HISTOGRAMAS TIERRAS RARAS	58
FIGURA 35: GRÁFICO DISPERSIÓN CO V/S S,.....	60
FIGURA 36: GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE ELEMENTOS TRAZA	61
FIGURA 37: GRÁFICO DE DISPERSIÓN ELEMENTOS MAYORES	62
FIGURA 38: GRÁFICO DE DISPERSIÓN PARA TIERRAS RARAS.....	63
FIGURA 39: GRÁFICO DE SEDIMENTACIÓN	64
FIGURA 40: CÍRCULOS DE CORRELACIÓN	65
FIGURA 41: LISTA SECUNDARIA CONDENSADA A LA IZQUIERDA, RECUESTO MODAL A LA DERECHA.	66
FIGURA 42: DIAGRAMA Y DATOS DEL PORCENTAJE EN PESO ACUMULATIVO DE LOS PRINCIPALES MINERALES DE MENA EN LAS MUESTRAS, INCLUYENDO LA PIRITA.	68
FIGURA 43: MAPEO FALSO COLOR DE LA SECCIÓN PETROGRÁFICA, CON LA MINERALOGÍA DE MENA Y GANGA MEDIDA EN LA MODALIDAD DE FIELDSCAN.	69
FIGURA 44: A: IMAGEN DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS DE GRANOS DE PIRITA EN MUESTRA 266357. B Y C: PERFILES CUANTITATIVOS DE LA VARIACIÓN DE COBALTO EN DOS GRANOS DIFERENTES DE PIRITA PRESENTES EN A (LINE SCAN 1 Y 2, RESPECTIVAMENTE. PY: PIRITA.)	71
FIGURA 45: A Y B: IMÁGENES DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS DE GRANOS DE PIRITA EN MUESTRA 266358. B Y C: PERFILES CUANTITATIVOS DE LA VARIACIÓN DE COBALTO EN LOS GRANOS DE PIRITA EN A Y B (LINE SCAN 1 Y 2, RESPECTIVAMENTE. PY: PIRITA.	72
FIGURA 46: HISTOGRAMA CO MUESTRA 266357	72
FIGURA 47: HISTOGRAMA CO MUESTRA 266358.....	72
FIGURA 48: DIAGRAMA DE CAJA PARA AMBAS MUESTRAS.	73
FIGURA 49: GRAFICO DE DISPERSIÓN CO V/S FE MUESTRA 266257.....	73
FIGURA 50: GRAFICO DE DISPERSIÓN CO V/S FE MUESTRA 266358.....	73
FIGURA 51: GRAFICO DE DISPERSIÓN S V/S CO.	74
FIGURA 52: SECUENCIA DE EVENTOS MINERALIZADORES DE EL BRONCE SUR A PARTIR DE OBSERVACIONES PETROGRÁFICAS REALIZADAS EN ESTE TRABAJO.	76

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN SONDAJES, LARGO Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS REALIZADAS.....	6
TABLA 2: CONDICIONES GENERALES DE OPERACIÓN DEL INSTRUMENTO QEMSCAN	8
TABLA 3: RESUME LOS PRINCIPALES MINERALES DE ALTERACIÓN Y METALES DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS.	33
TABLA 4: RESULTADOS TRANSFORMADOS PARA Co.	47
TABLA 5: RESULTADOS TRANSFORMADOS PARA S	48
TABLA 6: RESUMEN ESTADÍSTICOS PARA ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS	53
TABLA 7: CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA SEGÚN LEY DE FE.	55
TABLA 8: RESUMEN ESTADÍSTICO ELEMENTOS MAYORES.	55
TABLA 9: RESUMEN ESTADÍSTICO TIERRAS RARAS	57
TABLA 10: TABLA CORRELACIÓN METALES TRAZAS,	60
TABLA 11: CORRELACIÓN R DE PEARSON ENTRE Co V/S ELEMENTOS MAYORES,	61
TABLA 12: CORRELACIÓN TIERRAS RARAS V/S COBALTO	62
TABLA 13: TABLA VALORES PROPIOS.....	64
TABLA 14: PORCENTAJE EN PESO Y TAMAÑO DE LA MINERALOGÍA DE MENA Y GANGA MUESTRA 266359	67
TABLA 15: DIAGRAMA Y DATOS DEL PORCENTAJE EN PESO ACUMULATIVO DE LOS PRINCIPALES MINERALES DE MENA EN LAS MUESTRAS, INCLUYENDO LA PIRITA.	68
TABLA 16: REPRESENTACIÓN NUMÉRICA DE LAS TRANSICIONES MINERALES.	69
TABLA 17: RESUMEN DE ANÁLISIS COMPOSICIONALES MEDIANTE MICROSONDA ELECTRÓNICA PARA EL COBALTO LOS VALORES ESTÁN MOSTRADOS EN WT %. LÍMITE DE DETECCIÓN PARA EL Co ES DE 0.0065 WT. %	70

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En la actualidad el cobalto es un metal de un alto valor estratégico, gracias a la creciente necesidad en tecnología. Su auge se debe a su uso en la industria de la electromovilidad y dispositivos electrónicos, ya que es un componente clave en la fabricación de cátodos para batería de Ión-Litio. CRU Group (2017) estima que la demanda de Co para baterías pasará de 44.000 Ton en 2017 a casi 80.000 Ton para 2025. En los cuales, alrededor del 60% de su contenido es de cobalto y es por lejos el material más caro en su fabricación. El cobalto permite alargar la vida útil de las baterías e impide que se sobrecalienten. Se prevé que la cantidad de vehículos eléctricos en las carreteras del mundo aumentará de alrededor de un millón hoy a 160 millones para 2035 (Cmoc, 2018).

El cobalto es recuperado generalmente como subproducto de la minería del cobre o del níquel (Osse, 1969). De los cuales, destacan los depósitos de cobre/cobalto como la fuente más importantes de cobalto en el mundo. No obstante, existe una escasez de cobalto disponible dado que las mayores reservas de este metal están dominadas en unos pocos países, destacándose la República Democrática del Congo concentrando más del 50% de la producción de mina en el mundo (Cmoc, 2018). Sin embargo, en el último tiempo han sufrido graves problemas sociales relacionados al trabajo infantil en la minería del cobalto, provocando que las grandes empresas dejen de comprar esta materia prima de esta región lo cual produjo que el precio haya aumentado más rápido que los principales metales (BBC, 2018). Por tal motivo, las grandes empresas de tecnología y automovilísticas están en búsqueda de otras fuentes para extraer este elemento.

Históricamente en Chile se explotaron depósitos de cobalto principalmente entre la III y IV región durante el siglo pasado hasta el año 1944. En el último tiempo, el interés por esta materia prima produjo que varias instituciones del estado y privadas retomaran la investigación de los depósitos de este metal. Por este motivo, CAP Minería está interesado en explorar los depósitos de cobalto como mena principal o como subproducto, en la zona norte de Chile. Este trabajo se enmarca en una serie de estudios realizados sobre este elemento en yacimientos de Hierro, en el cual se maneja la hipótesis de que los depósitos IOCG e IOA pueden albergar importantes concentraciones de cobalto en sus impurezas tales como piritas, calcopiritas, pirrotinas y arsenopiritas. Estudios en este tipo de depósitos son muy pocos en el mundo.

1.2 Ubicación y acceso

La Mina Bronce Sur se ubica en la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama en el límite con la Región de Coquimbo. Administrativamente pertenece a la Comuna de Vallenar, Provincia de Huasco.

Como se observa en la Figura 2, dista a 100 Km al norte de la ciudad de La Serena y 80 Km al sur de Vallenar. Según Figura 1, se accede al lugar por la carretera Ruta 5, aproximadamente en el kilómetro 580, en donde se encuentra el depósito ferrífero Desvío Norte. Posteriormente se interna hacia el oeste por el camino de tierra D- 542 en dirección al sector Sierra de Pleito, localizado aproximadamente a unos 8 km del desvío.

La morfología en el sector está dominada por La Sierra El Pleito cuya altura promedio es de 1200 m s. n. m.

El área está comprendida aproximadamente en las siguientes coordenadas 6763565,95 m S y 297629,64 m E.



Figura 1: Plano de acceso al yacimiento Bronce Sur. Fuente: Dirección de vialidad, Ministerio de Obras Públicas

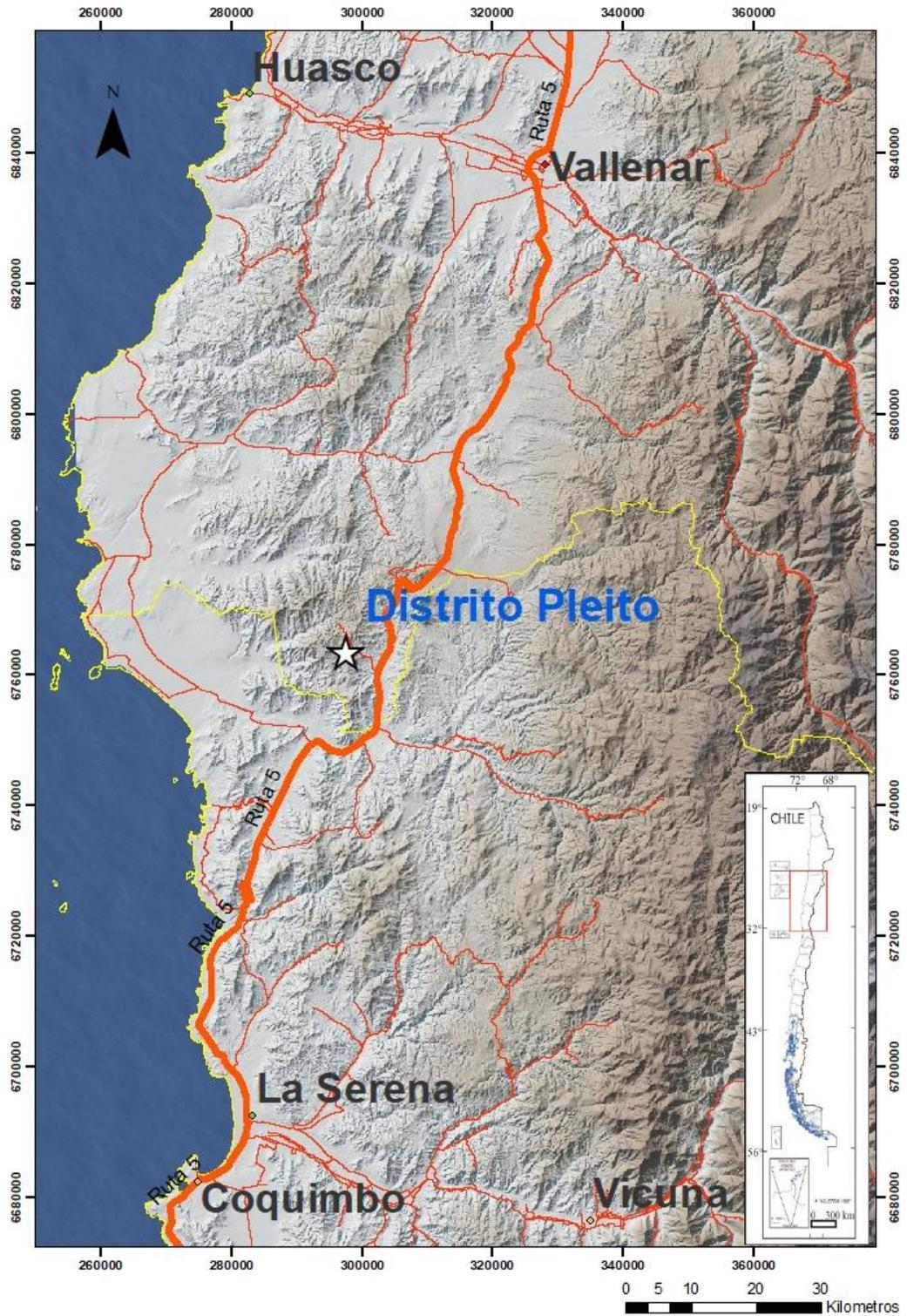


Figura 2: Ubicación del área de estudio sobre modelo de elevación digital de terreno. Se indica el Distrito el Pleito.

1.3 Hipótesis

En los depósitos metalíferos pertenecientes a la franja ferrífera cretácica, en los cuales está incluido el yacimiento Bronce Sur, se ha observado que las impurezas asociada a los yacimientos IOA corresponde generalmente a sulfuros, silicatos, apatita, entre otros. Según estudios de mapeo de sondajes realizados en la zona de estudio, la pirita es el sulfuro de hierro de mayor abundancia, sobresaliendo en este yacimiento por sobre otros del distrito (Informe CAP Minería, 2012). Este depósito esta dentro del proyecto Enlace de la compañía, en el cual está contemplada su explotación por granzas y finos de Fe (productos comercializables).

Además, se maneja la hipótesis que la pirita puede incorporar metales de importancia económica, entre ellos el cobalto (Levinson, 1973). Este sulfuro se puede presentar en una variedad de depósitos de origen magmático-hidrotermal como pórfidos cupríferos, epitermales, VMS, IOCG, IOA, entre otros. Por esta razón la pirita es reconocida como repositorio de elementos trazas tales como el Cobalto, Cobre, Níquel, Zinc, entre otros, los cuales pueden estar ocluidos en su estructura.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene como principal objetivo determinar la ocurrencia de Cobalto en el proyecto de Hierro Bronce Sur del Distrito Pleito por medio de un estudio “trazable”, desde la obtención de la muestra hasta sus análisis y establecer su relación con la mineralización ferrífera tipo IOA (*Iron Oxide Apatite*) para sugerir una guía de exploración de este elemento en otros depósitos de la Franja Ferrífera.

1.4.2 Objetivos específicos

- Cuantificar los contenidos de cobalto presentes en el yacimiento de hierro Bronce Sur.
- Identificar las especies minerales portadoras de cobalto y su distribución microscópica en estos minerales.
- Reconocer su relación con elementos paragéneticos al Co (Cu, Ni, As, Bi, Zn, Pb) y minerales de interés en Bronce Sur.
- Caracterizar los patrones de alteraciones presentes en el yacimiento y dilucidar el patrón de alteración en el cual está asociado el cobalto.

1.5 Metodología

Para iniciar este trabajo, se realizó una recopilación de antecedentes expuestos en el marco teórico y geológico en donde se reconoció el estilo de mineralización de la pirita se relaciona fuertemente con la mena de hierro, en donde se discriminó entre una mena maciza, brechosa y diseminada.

Para el estudio de la distribución de Co en El Bronce Sur, así como el de las relaciones bivariantes entre elementos de interés al igual que con otras características geológicas se contó con una base de datos de CAP pertenecientes a sondajes diamantino y de aire reverso del sector Bronce Sur, realizados el año 2005, 2008, 2009, 20010, 2011 y 2012. Dentro de la información disponible se utilizó las descripciones de sondajes, cartas de remisiones y análisis de leyes realizadas por hierro, azufre, fósforo y en algunos casos cobre, al igual que fotografías realizadas a los sondajes. La ubicación de los sondajes de muestra en la figura 3, además se adjunta la tabla 1 con sus coordenadas.

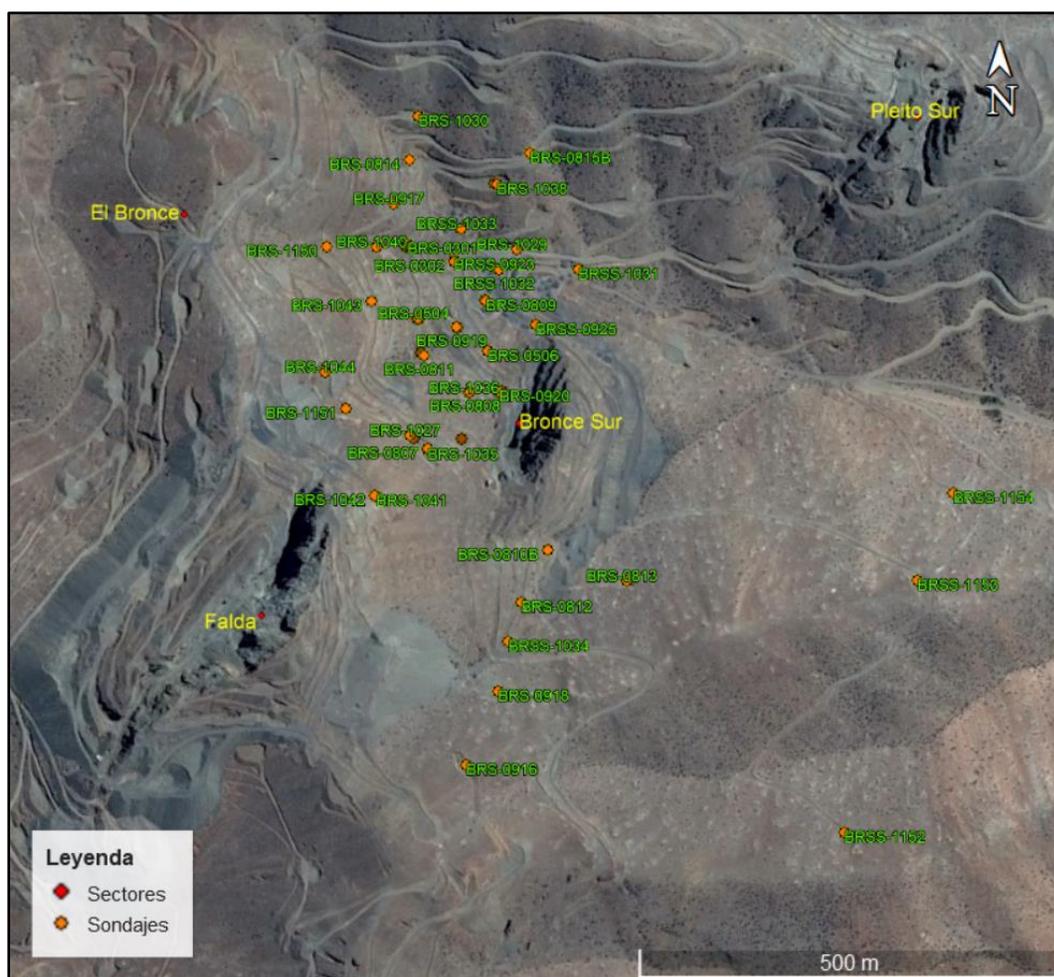


Figura 3: Imagen satelital localización de sondajes. Fuente: Google Earth Pro.

Según el control de calidad de CAP minería sobre procedimientos, los sondajes diamantinos utilizados fueron perforados con diámetro HQ y muestreados cada 3 metros. Luego una mitad del testigo, elegida por el geólogo según su equivalencia, se conserva y la otra mitad es enviada a una preparación mecánica la cual es proceso de conminución para posteriormente realizarle análisis químicos. En el proceso de reducción de tamaño en primer lugar se realiza un chancado de la muestra y molienda para reducir su tamaño hasta pasar por la malla Tyler #325 equivalente a 43µm. Luego, se procede a enviar las muestras a análisis a los laboratorios, se utiliza el equipo Tubo Davis para concentrar las partículas, el cual consiste en un tubo que es colocado entre los polos de un electroimán en un ángulo de aproximadamente 45 grados. El tubo se mueve hacia adelante y hacia atrás mientras gira. Cualquier partícula magnética presente en la muestra en el interior del tubo se recoge. Después este material magnético se vuelve a analizar para tener información de su contenido magnético. Paralelamente, para determinar la concentración de azufre se utiliza volumetría con horno de inducción LECO S 230, en el cual la muestra es quemada mediante combustión, liberando SO₂ que es determinado por una celda infrarroja. Luego el equipo, por medio de factores gravimétricos, lo transforma a %S. El límite de detección es de 0.001%S

1.5.1 Selección de muestras

Para la elección de las muestras pertenecientes a los sondajes se tuvo presente dos criterios. En primer lugar, las que presentaran leyes de S sobre 1 % wt., y posteriormente, las que presentaran mayor abundancia de piritas en los sondajes. Con esta información se preparó una base de datos para realizar los análisis químicos posteriores.

1.5.2 Análisis químicos

Tabla 1: Resumen sondajes, largo y técnicas de análisis realizadas.

Muestra	Sondaje	Desde (m)	Hasta (m)	Largo de la muestra analizada del sondaje (m)	ICP/ICPMS	Petrografía/calcografía
266352	BRS1042	206,65	208,45	2	x	x
266356	BRS0918	91,4	93,1	1,7	x	x
266357	BRS0918	91,4	93,1	1,7	x	x
266358	BRS0918	91,4	93,1	1,7	x	x
266359	BRS0918	97,7	98,35	0,65	x	x
266360	BRS0918	97,7	98,35	0,65	x	x
266362	BRS0918	101,8	103,15	1,35	x	x
266366	BRS0815	137,4	138,9	1,5	x	x
266367	BRS0815	142,95	145,25	2,3	x	x
266368	BRS0815	145,2	146,5	1,3	x	x
266370	BRS1043	198,55	202,05	3,5	x	x
266505	BRS0916	245,5	247,9	2,4	x	x
266508	BRS1043	79,1	82,7	3,6	x	x
266511	BRS0809	174,1	177,6	3,5	x	x
266513	BRS0811	112,6	116,55	3,95	x	x
266518	BRS1043	130,6	133,3	2,7	x	x

En una primera etapa se preparó una base de datos de 87 muestras analizadas por siete elementos (Au, Ag, Ni, Pb, Co, Zn, As) en el Laboratorio San Lorenzo, el método utilizado fue disolución con ataque tres ácidos (HF, HClO₄, HNO₃) y lectura ICP MS/OES. El interés recaía en que tales elementos son paragenéticos al cobalto y tienen afinidad por estar contenidos como elementos trazas en los mismos minerales. Para los tramos de sondajes que generaban interés se realizó un estudio de sus características litológicas, alteración y mineralización. A partir de este primer set, se seleccionaron otras 63 muestras, por una cantidad mayor de elementos, de los cuales se contaban 10 óxidos mayores (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, TiO₂ y P₂O₅, en % peso), 45 elementos trazas (Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Ce, Cr, Cs, Co, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Pr, Rb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Zn y Zr, en ppm) y Au en ppb. Para este caso el laboratorio escogido fue Activation Laboratories Ltda.

Este método se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas). Para la determinación cuantitativa de los elementos mayores y trazas se utilizó fusión con metaborato/tetraborato de litio con posterior lectura ICP/ICPMS, para el oro se utilizó espectrometría de absorción atómica (AA). Las muestras fueron pulverizadas con un 95% bajo la malla #200, el equipo utilizado fue ICP/ICPMS Perkin Elmer ELAN 9000. Para este análisis el límite de detección del cobalto es de 1 ppm y para el caso de los elementos mayores de 0.01%. Para el oro se realizó un ensayo a fuego con un colector de plata, toda la plata es disuelta en agua regia y la solución es leída con AA (Absorción Atómica) utilizando entre 5 a 50 g de muestra. El oro digerido se determina por Absorción Atómica en un rango de 5 a 3000 ppb, aquellas muestras que tengan sobre 3000 ppb, deben ser analizadas por método gravimétrico (Fuente: activation Lab).

Los estudios estadísticos de los análisis fueron realizados con el software Minitab y Excel con el propósito de reconocer relaciones entre variables y promedios de abundancia, Para los valores bajo el límite de detección, se trabajó como la mitad del límite según sea el caso. Como regla general, las variables con baja respuesta analítica; es decir, aquellas con más del 50% de datos inferiores al límite de detección, se eliminaron del análisis subsecuente. Además, se obtienen los estadígrafos básicos con el fin de obtener la mayor cantidad de información en relación a las medidas de tendencia central (media, mediana), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, error estándar de la media) y medidas de distribución (coeficiente de asimetría, curtosis) de cada variable en estudio.

Posteriormente a los análisis químicos, y en base a los resultados obtenidos de los mismos, se seleccionaron 16 muestras de los sondajes diamantinos, las cuales cumplan con los requisitos de abundancia de pirita, alta ley de azufre y cuyas concentraciones de cobalto se encuentren sobre el promedio. Con esta información se realizaron 16 cortes transparentes/pulidos para estudio petrocalcográfico por microscopía óptica tradicional para identificar las fases minerales presentes, su modo de ocurrencia y el porcentaje en volumen de las mismas. Los cortes se elaboraron en el laboratorio de Geocronos Ltda. en San Pedro de La Paz, para posteriormente ser analizada una muestra vía QEMSCAN y dos mediante Microsonda Electrónica.

1.5.3 Qemscan

Con el objetivo de realizar un estudio cuantitativo de la mineralogía de mena y ganga, se realizó un estudio QEMSCAN para la muestra 266359, esta técnica es un método instrumental no destructivo, de carácter semi-cuantitativo que se basa en la identificación de minerales a través de la combinación de imágenes de electrones retrodispersados (BSE) y de espectros de energía dispersiva de rayos X (EDS) captados punto a punto sobre una malla de muestreo en el mineral, las condiciones operativas son mostradas en la tabla 2. En este estudio el énfasis corresponde a la detección de la ocurrencia de minerales portadores de cobalto. Se realizó en el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) en las dependencias de la Universidad de Concepción. El instrumento consta de un microscopio electrónico de barrido Quanta 250 y dos detectores libres de nitrógeno Bruker XFlash 6130 (Silicon Drift Detector).

La modalidad de QEMSCAN utilizado fue un Fieldscan, en donde los puntos de análisis son recolectados en base a una grilla regular de puntos previamente definida, generando una imagen digital 2D, se utilizó una malla de muestreo (point spacing) de 10 μm . Este tipo de análisis es útil en muestras de roca para cuantificar la mineralogía modal, el tamaño promedio de especies minerales, la distribución de los minerales portadores de Co y Cu, además de las asociaciones minerales que presentan las especies reconocidas. Cabe destacar que para cada punto de análisis se colecta un número de brillo BSE (entre 0 y 255) y un espectro de Rayos X de 5000 cuentas por pixel. Lo anterior para detectar la presencia de elementos en baja concentración (en este caso Co). Para estos análisis se utilizó la SIP CuS-1 (Base de datos del instrumento, modificada por el GEA para detectar algunas especies propias del yacimiento estudiado).

Tabla 2 condiciones generales de operación del instrumento QEMSCAN

QEMSCAN	QEMSCAN 650
Plataforma	Idiscover-Imeasure 5,3. SEM Plataforma: Quanta System.
SIP	CuS1 modificada por el GEA.
Distancia entre puntos	10 μm
Modo de medición	PMA (Particle Mineralogical Analysis), FieldScan y SMS.
Tiempo de medición	4 hrs. (en promedio en la modalidad de análisis PMA).
Voltaje de aceleración	25Kv.
Detectores	2 Xflash Bruker 6130 N2L Free.
Corriente de filamento	3
Corriente absorbida	5nA
Calibración BSE	3 puntos, Cuarzo (44), Cu (130), Au (232).
Calibración espectrómetros	Cu ($L\alpha$) and Cu ($K\alpha$).
Brillo y contraste	29/91,4
Distancia de trabajo	10 mm (en promedio).

1.5.4 Microsonda Electrónica

La microsonda electrónica (EMPA) nos permite obtener imágenes de intensidad de rayos X (WDS) cuyos pixeles representan valores cuantitativos de concentración para el elemento seleccionado y así obtener información acerca de la distribución y/o variaciones composicionales (zonaciones, presencia de inclusiones, etc.).

Para este estudio cuantitativo de cobalto se llevó a cabo a partir de los cortes transparente/pulidos. El equipo utilizado es una microsonda JEOL JXA 8600M Superprobe, provista con 5 espectrómetros dispersores de longitud de onda (WDS) y un detector de energía (EDS) Bruker modelo XFLASH 5010. El sistema de automatización y análisis con WDS es de Geller MicroAnalytical Labs, y el del EDS es QUANTAX200, de Bruker.

Para la selección de los granos de pirita a analizar, y la localización de los perfiles composicionales, se utilizaron imágenes de electrones retrodispersados. Posteriormente, se procedió a la cuantificación de los elementos Fe, S, Cu y Co con el sistema WDS.

El uso de WDS, bajo las siguientes condiciones analíticas fueron de 25 Kv, 20nA para los elementos mayoritarios (S y Fe) y 60 nA para elementos minoritarios (Co, Cu). Los tiempos de conteo fueron de 10 seg en el *peak* y 5 seg en el *background* para los elementos mayoritarios, y 100/50 seg para el cobalto y 60/30 para el cobre. Se usó un diámetro del haz de electrones de 5. Los estándares utilizados fueron marcasita para Fe y S, calcopirita para el Cu y Co puro para el Co. El límite de detección de cobalto bajo estas condiciones analíticas es de 0,0065%.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Cobalto

El cobalto es un elemento metálico que no existe como mineral puro en la naturaleza. Por lo general está asociado a minerales de otros metales (por ejemplo, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn, etc.) y minerales de cobalto sin otros metales, pero en cantidades inferiores. Por lo tanto, es producido por lo general como subproducto de la minería del cobre o níquel. Generalmente es recuperado por el procesamiento de sulfuros o óxidos de cobre-cobalto o sulfuros de níquel o de laterita (Chong. Hu, 2012).

En depósitos en Chile se puede observar que la mineralización posee una zona hipógena y una de enriquecimiento secundario, en este sentido similar a la del cobre. La mineralogía hipógena se puede caracterizar por cobaltita (CoAsS) y la zona enriquecida (oxidada) se puede encontrar eritrina ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), asbolana (Óxidos de Co y Cu) y heterogenita (Hidróxido de Co).

Los depósitos de cobre/cobalto son la fuente más importante de cobalto en el mundo, siendo los depósitos de la República Democrática del Congo los de mayor importancia ya que poseen más del 50% de la producción de mina del cobalto mundial. Otros países importantes son Cuba, Rusia, Australia, Filipinas y Canadá (Osses, 2017).

La complejidad y eficiencia en el proceso extracción depende del tipo de mineral de cobalto con el que se trabaje. El cobalto en los minerales primarios es concentrado o transformado a estados solubles por la piro-refinación y después es enriquecido aún más. Finalmente se obtienen los productos aunque en volúmenes bajos (Osses, 2017).

El refinado final del cobalto puede ser como productos químicos, los que incluyen cloruro de cobalto, óxidos de cobalto, hidróxidos y sales; o pueden ser metálicos, destacando los cátodos, briquetas, lingotes, gránulos y polvo. El productor más importante de cobalto refinado es China abarcando más del 50% del mercado (JRI, 2018).

1.5.4 Geoquímica del cobalto

Según la clasificación de Goldsmith, el cobalto pertenece a los elementos Siderófilos gracias a su afinidad geoquímica con el Fe, Ni, Au, Mo, As, Os, Ir, Pt, Ru, etc (Mason, 1959).

En la corteza la concentración promedio de cobalto es de 25 ppm, las rocas que poseen una mayor concentración de Co son las ultrabásicas con 200 ppm, seguidas por rocas basálticas con 45 ppm de cobalto, por último las rocas andesitas poseen una concentración de 20 ppm en promedio (Mason, 1959).

1.5.5 Cobalto en Chile

La siguiente información es extraída a partir de informes de CORFO (Townley et al., 2017), informes históricos sobre depósitos de cobalto en Chile (D'aubarede, 1969), (Hornkohl, 1944), (Salinas, 1955) e informes de CAP Minería (Gómez, 2018).

En el país se explotaron varios yacimientos de Cobalto iniciando en 1865, distribuidos entre los 25° y 35° latitud sur. Los principales se encuentran en una franja costera que se extiende desde Taltal por el norte hasta Coquimbo por el sur. La producción más intensa y estable de cobalto fue realizada en El Distrito San Juan (Región de Atacama) y Distrito Tambillos (Región de Coquimbo) como yacimientos de vetas y mantos con mineralización de cobre-oro-cobalto. Además, otros depósitos cobaltíferos se encuentran en la región de Atacama como es el caso del Distrito Carrizal Alto y en el valle del Río Copiapó con Sierra Ladriillos y Los Loros, en Valle del Aconcagua y Río Blanco (Región de Valparaíso), Distrito Cajón del Maipo en el Valle del Río Volcán (Región Metropolitana) y el depósito Pedernales (Región de O'Higgins). Actualmente todos estos depósitos se encuentran paralizados.

En general las leyes medias de los yacimientos son menores al 1% de Co, aunque suelen presentar pequeños lente o bolsones de alta ley (D'aubarede, 1969). Además, localmente puede ocurrir oxidación provocando un enriquecimiento secundario, aumentando la ley de mena a 6 u 8% de Co. La producción entre los años 1903 y 1939 sumó 582188 toneladas de material, con una ley promedio de 1.35% de Co (Hornkohl, 1944). La explotación de cobalto cesó en 1944 con el cierre de la mina La Cobaltera en el Distrito San Juan. El peak de la minería del cobalto fue durante la II Guerra Mundial derivada de la demanda del acero.

1.5.6 Yacimientos con mena principal de Co

Si bien en el siglo pasado se extrajo cobalto en Chile como mena primaria, su explotación se restringe a distritos acotados. Los principales depósitos cobaltíferos conocidos ocurren a lo largo de la provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa entre la región de Atacama y Coquimbo, en similar distribución que los depósitos de la Franja Ferrífera Chilena, yacimientos hospedados en rocas metamórficas paleozoicas al igual que en rocas intrusivas, volcánicas y en menor medida sedimentarias de edad cretácica inferior, en un ambiente de arco volcánico. Están inmersos en una zona afectada por sistema de Falla de Atacama (Townley et al., 2017). También son reportados los depósitos de ambiente de tras arco de Chile Central en rocas volcánicas y sedimentarias en el valle de El Volcán, Cajón del Maipo (Hornkohl, 1944).

Los yacimientos cobaltíferos de Chile son de origen hidrotermal y están relacionados con las grandes intrusiones de dioritas del cretácico superior y terciario inferior que se extienden por el territorio chileno. La mayoría corresponden a depósitos vetiformes siendo la excepción las minas Buitres y Minillas en el Distrito Tambillos que corresponden a mantos. También se reconoce como mineral accesorio de minas de plata y en pórfidos cupríferos, pero en cantidades reducidas y erráticas (Hornkohl, 1944).

El cobalto y minerales de cobalto presentan afinidad por sulfuros de cobre, níquel, arsénico e hierro, minerales que forman asociaciones en depósitos hidrotermales. De los minerales como mena de cobalto destaca la cobaltita (CoAsS) un sulfoarseniuro predominante en los mejores yacimientos conocidos en Chile. En Distrito San Juan se observan vetas de solo este mineral. La safflorita (CoAs_2) arseniuro de cobalto ocurre ligado generalmente a las vetas de plata de baja temperatura. Sumado a esto, el Co puede sustituir parte del Fe en la estructura de la arsenopirita (FeAsS) o lollingita (FeAs_2) enriqueciéndolas en este elemento. Estos minerales son los más frecuentes en los yacimientos chilenos y se presentan asociados a pirita, calcopirita y otros minerales de cobre. Asimismo, el cobalto puede formar minerales en un perfil oxidado en donde destaca la eritrina ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) arseniato de cobalto de color rojo carmesí. Asimismo hay una gran variedad de óxidos e hidróxidos negros como por ejemplo la asbolana ($\text{m}(\text{Co},\text{Ni})\text{O} \cdot \text{MnO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$) mezcla de óxidos de manganeso y cobalto y la heterogenita, hidróxido de cobalto, frecuentes en las zonas más superficiales (Hornkohl, 1944) (D'aubarede, 1969).

La ocurrencia cobaltífera de mayor importancia se encuentra en Distrito San Juan, se han identificado a lo menos 39 minas, clasificadas de la siguiente manera: 15 minas de cobre-cobalto, de éstas 6 se reconocen como cobalteras históricas principales. El resto (24) corresponden a minas de cobre, con anomalías de cobalto, pero de menor concentración de Co. Estas minas se distribuyen en tres bloques, el central concentra la gran parte de mineralización de cobalto del distrito y está limitado en los extremos NE y SW por bloques que concentran mineralización de Cu (Co-) y Cu-Au (Co-) (Gomez, 2018).

La roca de caja corresponde al complejo metamórfico de edad paleozoica, constituidos por: cuarcitas, filitas, micaesquistos, etc. y que está atravesado por filones dacíticos. También se reconoce un macizo de composición granodiorítico-tonalítico perteneciente al Complejo Plutónico Infiernillo de edad cretácica. La mineralización en general se emplaza en numerosas vetas-fallas de cobalto discontinuas con potencias de 2 hasta 30 m. Las zonas explotables son clavos y asociadas a estructuras de tendencia local: NS a NW-SE y el otro NE-SW con manteos variables hacia el W. Los minerales reconocidos corresponden a: cobaltita con cuarzo y turmalina, calcopirita y pirita. En la zona primaria es posible identificar: eritrina, asbolana y heterogenita (Gomez, 2018).

Análisis en los sectores de Cortadera, Paulita y Verde indican valores de cobalto de 0,5% y en los sectores de Labrar, Quebradita Norte, Romero 2, Fraguaita rondan los 0,1 y 0,5% de Co. Los recursos mineros según geoexploradores (1983) indica reservas de 1300 t de mineral in situ y 3960 t de desmontes de 1% Co en la zona de Cortadera, Paulita y Verde y 62000 t de desmontes de la mina Santa Rosa con aproximadamente 0,05% a 0,24% Co y con una ley media de 2,44% de Cu (Townley et. al., 2017).

Con respecto al Distrito Tambillos se localiza en la comuna de Andacollo, aproximadamente a 33 km al sur de la ciudad de La Serena, contenido en el dominio metalogénico Arqueros. Los depósitos del distrito incluyen vetas del tipo IOCG, que se alojan tanto en rocas intrusivas del Cretácico Inferior y cuerpos hipabisales del Cretácico Superior temprano, como en una secuencia estratificada volcánica y sedimentaria del Jurásico Superior – Cretácico Inferior. La totalidad de las rocas y depósitos antes descritos se distribuyen al oeste del Sistema de Fallas Romeral (SFR) y

han sido afectados por un intenso metamorfismo de contacto asociado al emplazamiento de granodioritas, granitos y dioritas ubicados en la zona central del distrito (Díaz et al., 2010).

Los depósitos explotados por cobalto corresponden a los del tipo estratiforme, específicamente a las minas Buitre y Minillas. El yacimiento Buitre es la mina con mayor desarrollo en explotación de cobalto. Se estimaba en esa época que la ley media de Co estaba en torno al 1% y los disfrutes tenían una ley media de 0,46% Co. Se presume que los escasos desmontes debieran contener leyes de Co inferiores a 1% (Townley et. al., 2017).

1.5.7 Yacimientos con cobalto como subproductos

Los principales yacimientos con los cuales se pudiera asociar la ocurrencia de cobalto como subproducto corresponden a los yacimientos IOCG (Iron Oxido Cupper Gold) de la franja metalogénica del Cretácico Inferior, debido a la evolución metalogénica del margen Andino y la afinidad a ambientes de baja sulfuración. Los principales yacimientos de este tipo corresponden a Candelaria y a Manto Verde. Otro tipo de yacimientos interesantes por evaluar son los IOA (óxidos de hierro apatito), los cuales son la principal fuente de hierro en Chile. Los principales yacimientos en Chile son Los Colorados y El Romeral, pertenecientes a CAP minería. Dada la afinidad del cobalto a sulfuros tampoco se debe descartar la ocurrencia en pórfidos cupríferos (Townley et. al., 2017).

1.5.8 Relaves con potencial de cobalto

Los minerales que potencialmente contienen cobalto no son recuperados en procesos mineros del Cu o Fe, por tal motivo, pasan junto a la ganga a los depósitos de relaves. Esta situación genera que los minerales de cobalto, junto a la pirita, pirita arsenical y arsenopirita son concentrados en los relaves (Townley et al., 2017).

Según el estudio de Caraballo et. al., (2017) las máximas concentraciones de Co reportadas se encuentran en muestras de cubetas de los depósitos Delirio 3 de Punitaqui, región de Coquimbo, con 190 ppm Co, María Isabel (98 ppm Co), en la comuna Tierra Amarilla, y Filtrados de Potrerillos en la comuna Diego de Almagro (88 ppm Co), ambos ubicados en la región de Atacama.

La ley típica de Co asociado a yacimientos de sulfuros es 0,1% (British Geological Survey, 2009). En el caso de Chile se han tomado concentraciones de Co en relaves de 0,019%. Por otra parte, en el caso de relaves antiguos, los minerales de sulfuro y sulfosales han sido sometidos a oxidación, hidrólisis y posibles procesos de lixiviación y reconcentración de cobalto

1.5.9 Cobalto en el Mundo

La compañía minera más grande en extraer cobalto corresponde a Glencore, que en total produjo 27400 toneladas de cobalto en 2017, proyectando unas 63000 toneladas para 2020. Las Mayores minas pertenecientes a esta compañía son Mina Mutanda y Mina Katanga, ambas localizadas en la

República Democrática del Congo, las cuales producen actualmente cobalto y cobre. Mutanda produjo 213300 toneladas de cobre y 12500 toneladas de cobalto el año pasado. En el caso de Katanga, produce hidróxidos de Co y cátodos de Cu, en 2015 habiendo producido 113000 ton de cobre y 2900 ton de Co. (reporte de producción de Glencore, 2017).

En segundo lugar, está la compañía minera China Molybdenum, con una producción total de 9314 toneladas de Cobalto el 2016 de la mina Sandaozhuang, deposito tipo skarn pórfido (Xiang, 2012), corresponde a la mayor reserva de molibdeno del mundo y la segunda de tungsteno (Cmoc, 2018). Luego, en tercer lugar, está el grupo Fleurette, es la tercera compañía minera de cobalto más grande en el mundo con una producción de cobalto de 7595 toneladas.

En el caso del cinturón de cobre de Katanga, en la República Democrática del Congo está hospedado en rocas sedimentarias Neoproterozóicas cuya mineralización de sulfuros de Co-Cu es del tipo estratiforme de grano fino, se encuentra en niveles sedimentarios con ganga principalmente de dolomita y cuarzo. Los principales sulfuros que se encuentran son calcopirita, bornita, carrolita y calcosina. Además, poseen niveles con sulfuros supérgenos enriquecidos con minerales como calcosina y digenita. (Desouky et al., 2010).

2.2 Depósitos Tipo Kiruna o IOA (Iron oxide-Apatite)

Los minerales de mena más importantes para la obtención de hierro provienen de depósitos de magnetita y hematita. Estos se encuentran en concentraciones económicas en varios tipos de yacimientos: depósitos sedimentarios estratiformes, en forma de cuerpos intrusivos y extrusivos de magnetita-apatito o cuerpos de reemplazo principalmente en calizas (Corona, 2004).

Los Yacimientos de magnetita-apatito, también llamado Tipo Kiruna, debido al yacimiento Kirunavaara, en Suecia, ocurren en varias partes del mundo asociados a rocas volcánicas o niveles altos de intrusión, además tienen una amplia distribución en espacio y tiempo desde el Proterozoico hasta el Terciario (Nystrom y Henriquez, 1994). Geijer (1910) hizo la primera descripción para los depósitos de hierro de magnetita-apatito del tipo kiruna localizado en Suecia. Estas menas son encontradas en un largo número de depósitos dentro del complejo volcánico Kiruna-Arvidsjaura.

El principal mineral de mena es la magnetita, con cantidades variables de hematita como mineral secundario producto de la oxidación de la magnetita (martitización). La presencia de apatita es caracterizada, usualmente en una proporción alrededor del 1% pero varía entre menas, las cuales pueden fluctuar entre el 0.5% y el 30% de apatita. La apatita es principalmente fluorapatito, pero el F puede ser reemplazado por Cl, menor cantidad de anfíboles y piroxenos y, en algunos depósitos se observa abundante calcita (Geijer, 1910)

Las rocas ígneas que contienen depósitos de magnetita-apatito típicamente contienen actinolita, con o sin piroxeno, granate y escapolita y están acompañadas por alteración calosilicatada. La albitización se presenta en algunos distritos como una alteración profunda pre-mineralización tal como ocurre en ambientes de tipo pórfido cuprífero o de greisen (Hirtzman et al., 1992).

Por lo general, estos yacimientos son de gran volumen (>500 Mton), se caracterizan por valores altos de tierras raras en apatita y en algunos casos presentan textura de enfriamiento rápido similar a rocas volcánicas. Estos yacimientos son pobres en Cr (<10 ppm), ricos en V(>1000 ppm) y tienen un bajo contenido de Ti (100-1000 ppm). Otros elementos que se pueden presentar son Al (200-1500 ppm), Mg (500-2.000 ppm), Mn (200-900 ppm), Ni (100-250 ppm), Co (20-140 ppm), Zn (50-120 ppm) y Cu (10-50 ppm) (Hildebrand, 1986).

Los depósitos ferríferos pueden presentar una evolución composicional, dada la disponibilidad de Cu y Au, por un lado, pueden sufrir la adición tardía de sulfuro de Cu y de Au generando una alteración calcosilicatada con magnetita (Ej. Tipo Candelaria) o pueden generar sericitización dominada por hematita (Ej. Manto Verde) (Hirtzman et al., 1992; Williams et al., 1995).

Por otra parte, cabe señalar que de acuerdo a las reservas de hierro, los yacimientos de Fe que ocupan el primer lugar en el mundo son los del tipo sedimentarios, constituidos principalmente por hematita, siendo en su mayoría de edad precámbrica (2500 Ma aprox.) formando las *banded iron formation* (BIF) depósitos sedimentarios de hierro bandeado como las itabiritas de Brasil (Corona, 2004).

2.3 Depósitos Ferríferos chilenos

Los depósitos Ferríferos más importantes en Chile son del Tipo Magnetita-Apatito (Ruiz et al., 1965) o tipo Kiruna (Vivallo y Henríquez, 1997) ubicados en La Franja Ferrífera Chilena la cual corresponde a una zona paralela a la costa Pacífica entre la tercera y cuarta región (26° y 32°S) de aproximadamente 600 km de largo por 25 km de ancho (Travisany et al., 1995). Se compone de unos 80 depósitos de óxidos de Fe-apatita (pobres en Ti), los cuales contienen recursos por más de 7000 millones de toneladas con una ley superior a 30% en Fe total (Ménard, 1995; Espinoza, 1990), pero la explotación se concentra actualmente en las minas Cerro Negro Norte, Los Colorados, y El Romeral (figura 4). En la misma franja existen depósitos de Cu-Au-óxidos de Fe (IOCG) como Manto Verde, Productora, Dominga y otros prospectos de este tipo de yacimientos (Maksaev et al., 2015). Esta franja coincide con la faja de intrusivos del Albiano (~110-100 Ma; Cretácico Inferior alto), se traslapa en espacio y tiempo con los depósitos Tipo IOCG (*iron oxide copper gold*) y algunos pórfidos cupríferos de edad cretácica, además coincide con la posición de la Zona de Falla de Atacama en su extremo sur (Maksaev et al., 2007).

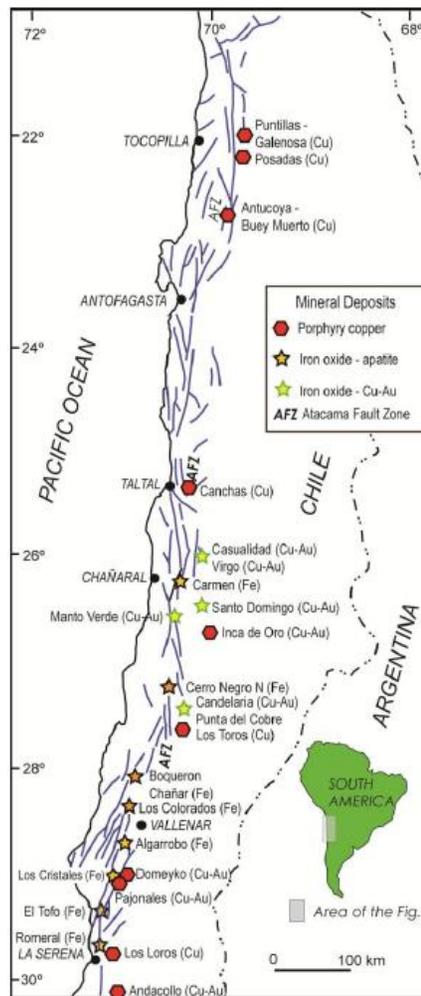


Figura 4: Relación entre el Sistema de Falla de Atacama (AFZ) y los yacimientos de la Franja Ferrífera chilena, depósitos de Cobre-Oro-óxidos de Fe (IOCG) y pórfidos cupríferos del Cretácico Inferior. Extraído de Espinoza (1991)

Los depósitos más relevantes desde el punto de vista económico son los de tipo Algarrobo, es decir, los depósitos irregulares hospedados por rocas volcánicas o metavolcánicas en la vecindad de cuerpos intrusivos (Maksaev et al., 2007).

La mena corresponde a magnetita masiva formando cuerpos irregulares o tabulares. Además pueden ser vetiformes y mantiformes. Los principales cuerpos tienen dimensiones entre 100 y 1000 m de longitud y decenas de metros de ancho.

2.4 Génesis de la Mineralización Ferrífera chilena

El origen de los yacimientos de hierro ha sido tema de controversia en el último tiempo, algunos autores indican un origen magmático y otros le atribuyen un origen hidrotermal.

Por un lado, se propone un origen magmático el cual involucra un líquido inmiscible entre un fundido oxidado rico en Fe y P y un fundido silicatado, los cuales mediante procesos de coalescencia, separación y cristalización forman un fundido rico en óxidos de Fe y P, dando lugar

a un depósito IOA (Nystrom and Henríquez, 1994; Travisany et al., 1995; Naslund et al., 2002). Siguiendo con esta teoría, para que exista un magma de hierro es necesario un proceso de inmiscibilidad de líquidos, con la separación de un líquido silicatado de uno rico en Fe. Para que se produzca este proceso, es necesaria la presencia de abundantes volátiles como P, F, S, CO₂ y condiciones específicas de fugacidad de oxígeno. Con esto se disminuye el punto de fusión, se reduce el peso específico del magma de mena y le da una gran movilidad para su emplazamiento cerca de la superficie. Por otra parte, esta desgasificación produce fases hidrotermales muy activas que producirán metasomatismo y enriquecimiento de otros elementos como Cu, Au, U o tierras raras.

Por otro lado, en los últimos años algunos autores le atribuyen un origen hidrotermal, el cual explica una depositación de Fe por fluidos deutéricos los cuales eliminan el Fe proveniente de plutones dioríticos y reemplazan metasomáticamente a rocas volcánicas (Haynes, 2000; Sillitoe et al., 2002). El depósito de El Laco en Chile, ha jugado un papel importante en esta discusión, ya que se creía que era producido por un evento único de extrusión de lava de magnetita (Park, 1961), ya que presenta textura similar a la de un flujo de magma máfico. Sin embargo, descubrimientos recientes, sugieren que el contenido de elementos trazas en las magnetitas presentes en El Laco es equivalente a la composición de magnetitas hidrotermales de alta temperatura (>500°C).

Recientemente, Knipping et al., 2015 ha propuesto un nuevo modelo el cual está basado en la composición de elementos trazas e isotópica de magnetita perteneciente al depósito IOA de Los Colorados, en donde inicialmente procesos de origen magmático son combinados con precipitación magmática hidrotermal. Finalmente, este modelo implica la cristalización de microlitos de magnetita a partir de un fundido de silicatos. Burbujas de magnetita se segregan generando un ascenso de magnetita la cual es depositada de forma masiva a lo largo de fallas transcurrentes a escala regional (Knipping et al., 2015). Algunos autores suponen la desgasificación de un magma de óxidos de Fe como fuente para fluidos formadores de depósitos IOCG (Naslund et al., 2002).

CAPÍTULO 3

MARCO GEOLÓGICO

El sector donde se realiza el presente estudio está ubicado por la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama en su parte sur. Esta formada por un basamento de rocas epimetamórficas del Paleozoico Superior, expuesto en el margen costero, sobre el cual se depositaron secuencias sedimentarias marinas y continentales del Triásico al Jurásico inferior. Luego, durante el Jurásico inferior (190-180 Ma) se desarrolló un extenso arco magmático a lo largo de la costa del norte de Chile (18 a 32°S), cuya química correspondía a volcanismo básico, principalmente basáltico subaéreo y submarino, contemporáneo con el emplazamiento de batolitos dioríticos epizonales (180-145 Ma). En la zona de estudio parte de esas rocas volcánicas e intrusivos están actualmente expuestos en la zona de la costa de La Serena y Ovalle (Emparan y Pineda, 2000 y Emparan, 2009).

La mina Bronce Sur está ubicada dentro de la Franja Ferrífera Cretácica de Chile, la cual se extiende entre los 25°30'S y los 32°S. Esta franja se caracteriza por contener Yacimientos del tipo hierro-apatito (IOA) los cuales corresponden a la principal fuente de menas de hierro y son los yacimientos de este tipo más importantes de Chile, Los recursos totales estimados están por sobre los 6.000 millones de toneladas métricas de hierro (CAP, 2014).

La Franja Ferrífera tiene una extensión de más de 600 km, en la cual coincide con la posición de la Falla de Atacama, de rumbo N30°E, siendo el rasgo estructural de mayor reconocimiento en la zona. (Carrasco, 1998). Las fallas pertenecientes a este sistema condicionan el emplazamiento de los cuerpos de hierro de las minas Tofo, Falda y Pleito.

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional, tectónica y estratigrafía del Distrito Pleito es tomada de la Carta Geológica M201Carrizalillo-El Tofo (Creixell et al., 2012). La siguiente reseña está basada en aquel trabajo y referencias contenidas en el mismo.

En el área afloran rocas volcánicas que se ven afectadas por alteraciones variadas que tienden a sobreimponerse.

3.1.1 Unidades Estratificadas:

La unidad que tiene mayor exposición en el área es la Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962), de edad Jurásico Superior-Hauteriviano. Corresponde a una secuencia mayoritariamente volcánica y sedimentaria heterogénea, siendo depositada en una configuración de arco de isla volcánica. Presenta un espesor máximo de 3050 metros. En la Figura 5 se observa de color verde y está en el centro, al E y W del mapa.

En la zona afloran tres subunidades:

- Andesitas porfídicas de clinopiroxeno en coladas de 30 a 50 m de espesor con base y techo brechizados. En algunos sectores se presentan vesiculares y en otros ocoíticas.
- Andesitas porfídicas, con intercalaciones de tobas de cristales.
- Brechas epiclásticas rojizas, con intercalaciones de arenisca lenticulares y coladas andesíticas rojas.

La secuencia tipo puede ser caracterizada por lavas con autobrechas de base y techo y estructuras en almohadilla ('pillows') de pobre desarrollo, interestratificada con lutitas y conglomerados finos (Arévalo, 2005).

Según Creixell et al. (2012) las rocas volcánicas de la formación Punta del Cobre constituyen un roof pendant sobre granodioritas. La base no está expuesta, sin embargo, la composición volcánica ácida de los clastos de las areniscas basales muestra que esta unidad proviene de la erosión de la Formación Canto del Agua, unidad portadora de rocas de esta composición, que se localiza estratigráficamente bajo la Formación Punta del Cobre.

A lo largo de la Quebrada Los Choros, entre la localidad de Choros Bajos y la desembocadura de la Quebrada Agua Grande, afloran depósitos de gravas correspondientes a la Formación Confluencia de edad Mioceno Superior-Plioceno Inferior (Rivano y Sepúlveda, 1991), constituido por gravas, arenas y limos, semiconsolidados, continentales, de origen fluvio-aluvial. equivalentes a esta unidad, que han sido agrupados en este trabajo en una subunidad de facies fluviales. La formación es cubierta por los Estratos de quebrada El Jote y por los Depósitos Aluviales del Pleistoceno-Holoceno.

3.1.2 Unidades Intrusivas

Los complejos plutónicos que se encuentran en la zona son el Complejo Plutónico El Trapiche, el Complejo Plutónico La Higuera y El Complejo Plutónico Las Docas.

El Complejo Plutónico La Higuera (Kilh) de edad Barreniano-Aptiano (127-124 Ma) (Arévalo, 2003) se distribuye como un cuerpo estrecho y elongado en dirección NNE-SSO, a lo largo de aproximadamente 90 km. De acuerdo con Arévalo et al. (2003), este cuerpo intrusivo presenta una geometría tabular y fue construido por una adición subhorizontal de subunidades plutónicas. Al norte de esta carta se han reconocido dos subunidades: una basal formada por una granodiorita de grano fino a medio y una superior principalmente diorítica (Arévalo et al., 2009). Un cuerpo de granodioritas se encuentra en el margen nororiental del complejo.

El Complejo Plutónico La Higuera está en contacto con el Complejo Plutónico Las Docas hacia el oeste, prolongando hacia el sur de la Zona de Cizalle Algarrobo. En este último caso, en la prolongación de esta estructura se reconocen principalmente zonas de alteración hidrotermal de tipo albíta-actinolita con abundante turmalina, con deformación frágil-dúctil. Hacia el SE, la unidad Kilh intruye a andesitas de la Formación Punta del Cobre a través de una superficie subhorizontal que representaría un techo plutónico.

Al SE de la figura 5 se encuentra el Complejo Plutónico Trapiche (121-117 Ma) de edad Aptiano constituido por una subunidad superior de monzodioritas, una subunidad media de dioritas y bajo estas últimas, un nivel de monzodioritas cuarcíferas a granodioritas, todas ellas localizadas directamente al este de la Zona de Cizalle La Higuera. Al oeste de dicha estructura aflora un cuerpo diorítico que Arévalo y Creixell (2010) denominaron previamente como Diorita La Niñita, el que se distribuye a lo largo de una franja de afloramientos norte-sur de entre aproximadamente 8 y 17 km.

El Complejo Plutónico El Trapiche intruye a la Formación Punta del Cobre y a su vez es intruido por diques y pórfidos (Kihd) asociados espacialmente a zonas de alteración hidrotermal. Se encuentra afectado por sistemas de fracturas frágiles que en parte alojan a sistemas de cuerpos vetiformes con mineralización de hematita y calcopirita y especies oxidadas relacionadas.

Hacia el oeste de la zona de estudio está presente el Complejo Plutónico Las Docas (Kild) (131 Ma) el cual está constituido por un cuerpo principal de dioritas cuarcíferas de grano grueso que sobreyace a una subunidad de tonalita. Además, se han reconocido cuerpos menores de leucotonalitas y enjambre de diques riolíticos y daciandesíticos y cuerpos menores de tonalitas y leucotonalitas. Aflora principalmente entre la quebrada Los Choros por el sur y la quebrada Carrizalillo por el norte. Este complejo intruye rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre. La litología que se presenta en la zona incluye diorita y diorita cuarcífera de anfíbol y biotita, textura equigranular de grano grueso, con foliación magmática de mediana a débil intensidad, Leucotonalita de biotita, con textura aplítica de grano medio que localmente contiene anfíbol y titanitas magmáticas. Tonalita a granodiorita de biotita y anfíbola.

En esta zona también es posible encontrar la unidad de Intrusivos hipabisales dacíticos (116-110 Ma), los cuales corresponden a cuerpos intrusivos tipo dique o “stock” de composición dacítica a riolítica, que se distribuyen principalmente en el sector oriental de la carta a lo largo de una franja discontinua de orientación aproximada norte-sur, entre la quebrada Agua Grande por el sur y la cabecera de la quebrada Desvío Los Choros por el norte, directamente al este del distrito minero Los Cristales (sector cuesta Pajonales, quebrada Salitral). La mayor parte de estos intrusivos tiene dimensión areal reducida (<5 km²) y se presentan como diques o stocks. Intruyen a rocas de la Formación Punta del Cobre y también a dioritas del Complejo Plutónico El Trapiche. Se encuentran espacialmente asociados y afectados por zonas de alteración hidrotermal de tipo sílice, cuarzo-sericita, propilítica y zonas de alteración argílicas y limoníticas. Las zonas de alteración más extensas se observan en los alrededores de la sierra del Pleito

3.1.3 Depósitos Cuaternarios:

Se observan en quebradas, siendo la más importante la Quebrada Los Choros la cual está en la parte central del mapa de la Figura 5.

- 2 Depósitos coluviales (Pleistoceno - Holoceno): Corresponden gravas de bloque y grabas no consolidadas de mala selección macizas. En las laderas se forman taludes o rellenan quebradas cortas de gran pendiente.
- 3 Depósitos Aluviales (Pleistoceno-Holoceno):
 - Activos: Depósitos de grava acumulados en canales actuales, desarrollados sobre los depósitos aluviales inactivos.
 - Inactivos: depósitos de grava adosada a nacientes de quebradas y laderas altas. Poseen grano medio a muy grueso.
- 4 Depósitos Fluviales: Depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados asociados directamente a cursos superficial de las quebradas principales. Entre estos se cuentan los canales fluviales activos, llanuras de inundación y barras inactivas.
- 5 Depósitos Antrópicos (Holoceno): Depósitos de escoria producto de los botaderos de estériles o actividad de beneficios y tortas de relaves de yacimientos minerales.

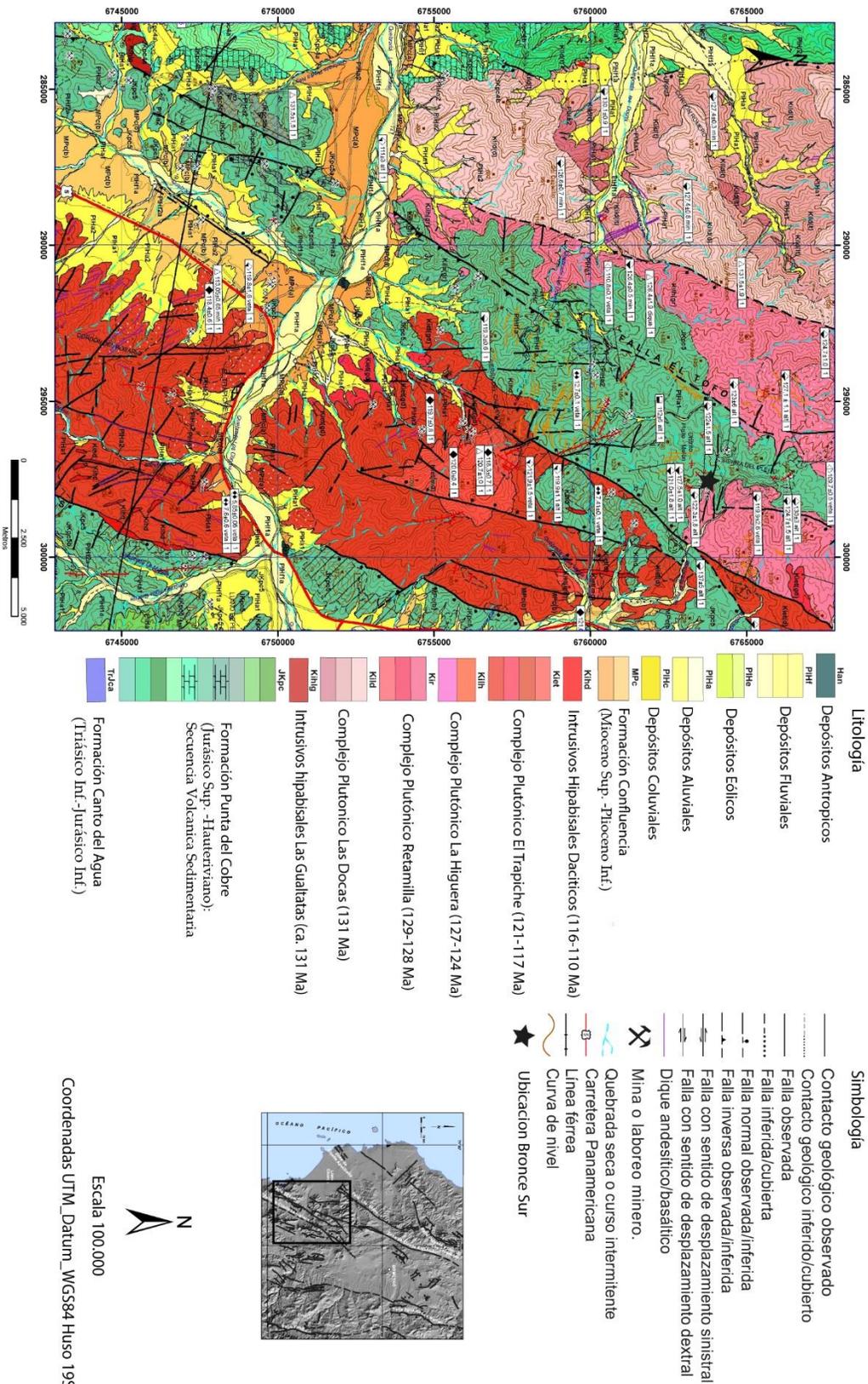


Figura 5 Marco Geológico del Distrito Pleito, modificado de carta geológica de Creixell et al., 2012 El Tofo- Carrizalillo.

3.1.4 Estructuras

Los yacimientos de magnetita apatito están asociados a la Zona de Falla de Atacama, la cual corresponde a una de las estructuras de mayor influencia regional y define las principales unidades morfoestructurales y una de las estructuras más importantes del ante arco en zona central de Los Andes (Gonzalez 1999). Este sistema de fallas es del tipo Transcurrente Siniestral de orientación NS, sistema asociado a el arco magmático jurásico. Tiene más de 1000 km de extensión, es paralela a la cordillera de la costa y se extiende entre las latitudes 20°S y 30°S (Grocott y Taylor 2002)

Su actividad se inició hace 132 Ma durante un periodo de subducción en un régimen de extensión continental. Entre los 132 y 106 Ma (Cretácico Inferior) fue afectada por una serie de fallas de transferencia noroeste que acomodaron los complejos plutónicos de esta época (Grocott y Taylor, 2002). El fallamiento probablemente cesó alrededor de los 90 Ma, por la migración de la actividad volcánica hacia el este (Grocott y Taylor 2002).

3.1.5 Mineralización

A nivel regional el área esta caracterizada por la Franja del Cretacico Inferior, en particular la franja ferrifera Chilena. En esta franja son encontrado yacimientos tipo “Kiruna” (Vivallo y Henríquez, 1997) o magnetita-apatito (iron oxide-apatite- IOA) asociados a yacimientos del tipo iron oxide-copper-gold (IOCG).

Los depósitos de tipo IOA se componen de magnetita masiva con contenidos variables de apatito y actinolita (Nystrom y Henríquez, 1994). Por otro lado, los yacimientos del tipo IOCG en otras partes del mundo y en Chile se caracterizan por una impronta geoquímica de Fe-Cu-Au, junto a elementos del grupo de las tierras raras (REE), cobalto, uranio y torio. La mayoría de estos yacimientos se encuentran hospedados estratigráficamente a formaciones del Jurásico (Formación La Negra) y Cretácico (Formación Punta del Cobre). Espacialmente están relacionados a cuerpos intrusivos máficos – intermedios de edad cretácica (Sillitoe, 2003).

Entre los yacimientos más importantes asociados a la alteración hidrotermal destacan: Los Colorados Norte, Chañar Quemado, Huanteme Sositas, Algarrobo, Pórfido cuprífero Domeyko, Minera Dos Amigos, Cerro Negro, Cristales, Falda, Bronce, Pleito Sur y el pórfido cuprífero Carmen de Andacollo (Pincheira, 1981) e (informe CMP, 2012).

3.1.6 Distrito Pleito-Melón

El distrito consiste en un área con mineralización dominante de magnetita, la cual se encuentra parcialmente oxidada, con ocurrencias de apatita en forma localizada. Se caracteriza por su prominencia topográfica (sobre los 1100 m s.n.m) como un macizo de rocas fuertemente alteradas (silicificadas) de color rojizo (Cornejo, 2012).

Este distrito alberga varios depósitos pequeños categorizados en tres grupos: Fe-Apatito, minas de hierro bandeado asociadas a vetas de apatito (explotada por su contenido de fosfato) y cuerpos vetiformes de cuarzo, con hematita-mushketovita y abundantes sulfuros de cobre (py-cp), con contenidos bajos de oro, que pueden ser clasificadas como depósitos de tipo IOCG, de bajo tonelaje. En este sector se pueden encontrar los depósitos La Falda, Bronce Sur, Berenguela, Pleito Sur, Las Parrillas, entre otros. Todos ellos están en un área de 1 Km² (Fortin, 2009).

Las rocas presentes en el distrito son de composición andesítica de la formación Punta del Cobre. Se encuentran intruida en la parte baja por rocas del Complejo Plutónico La Higuera constituyendo un 'roof pendant' sobre granodioritas (Creixell, Ortiz, y Arévalo, 2012).

La alteración hidrotermal asociada a la mineralización corresponde a anfibolitización penetrativa en torno a los cuerpos de mena de magnetita. Está caracterizado por actinolita como el mineral de alteración más abundante, el cual es acompañado por apatita, cuarzo, titanita, escapolita y ocasionalmente albita. Además, existen actinolitas las cuales presenta hábitos prismáticos centimétricos en vetas de hasta 1 m de espesor, que cortan a la alteración temprana. Alejándose de los cuerpos de mena, se reconoce una alteración de tipo cuarzo-feldespática, además de persistentes pátinas de hematita en gran parte del distrito. Por otra parte, también se aprecian, en forma dispersa en torno a los depósitos, vetillas de calcita, sílice, clorita y óxidos de Fe (Aguirre, 2003).

La mineralización corresponde a un yacimiento de hierro típico de la franja ferrífera chilena. El principal mineral de mena corresponde a magnetita (Fe₃O₄) desarrollado en vetas y diques que se alojan en metandesitas con actinolita levemente oxidada, de forma secundaria hematita (Fe₂O₃) y con ocurrencias forma localizada de apatita. Los minerales de ganga incluyen principalmente aluminosilicatos de Ca, Na y K y secundariamente actinolita, escapolita, biotita, turmalina, clorita, clorapatito, epidota y en forma muy subordinada, granate, pirita y calcopirita. (Creixell et al., 2012). La mineralización corresponde a vetas y mantos. Las vetas (*e.g.*, Falda, Pleito Sur, Melón) corresponden a cuerpos de magnetita maciza acompañada de menores cantidades de cuarzo, clorita, apatita, anfíbol y sulfuros intersticiales.

Las estructuras más importantes tienen una dirección NE que controla la distribución de los cuerpos de Fe y un sistema NW representado por fallas y filones que cortan y desplazan al sistema NE. Los recursos totales del distrito corresponden a roca de mena mayor a 30% Fe equivalentes a 33570000 ton, con una ley de 38,97% Fe con 0,063%P y 0,623%S.

3.1.6.1 Historia de la Prospección

La primera empresa la cual explotó el distrito Pleito fue la Compañía Minera Santa Fe desde 1954, principalmente en las minas Pleito Sur, Bronce Sur y La Falda, las que a fines de 1965 producían unas 2000 toneladas de mineral de ley promedio 60% Fe. De esta época data el rajo de la figura 6, en la actualidad se encuentran paralizadas (Cap, 2012).

En los años 1960 y 1961, Aeroservice Co. realizó una prospección aero-magnética por cuenta de Bethlehem Chile Iron Mines Company, en la cual se detectaron una serie de anomalías entre La Serena y Vallenar. Una de ellas es la correspondiente a Pleito. En 1974 se realizó un levantamiento aeromagnético mediante un helicóptero con personal de la sección de Geofísica del Instituto de Investigaciones Geológicas. La interpretación de los datos estuvo a cargo de la empresa "GEOEXPLORACIONES LTDA". Durante 1975 se hizo un mapa geológico detallado a cargo del geólogo C. Llaumett P. y se realizaron 11 sondajes que acumularon 1679,5 m (Cap, 2012).



Figura 6: Vista desde subsector Pleito Sur hacia Rajos de Bronce Sur y Falda, Pleito Central.

3.1.6.2 Recursos

Con respecto a los recursos de hierro de Bronce Sur, han sido divididos por leyes de Fe, para una ley de corte de 45% Fe (color amarillo en figura 7) se tienen aproximadamente 9,4 Mton. de hierro magnético. Para una ley sobre el 55% Fe se consideran 1.7Mton. extra de material. El recurso total de Hierro magnético es de 11,1 Mton (Cap, 2015).

Según CAP (1976), se tienen expectativas de reservas explotables de unos 200 millones de toneladas de mineral magnético de 34% de Fe, indicando que pleito es uno de los yacimientos de hierro importantes del país.

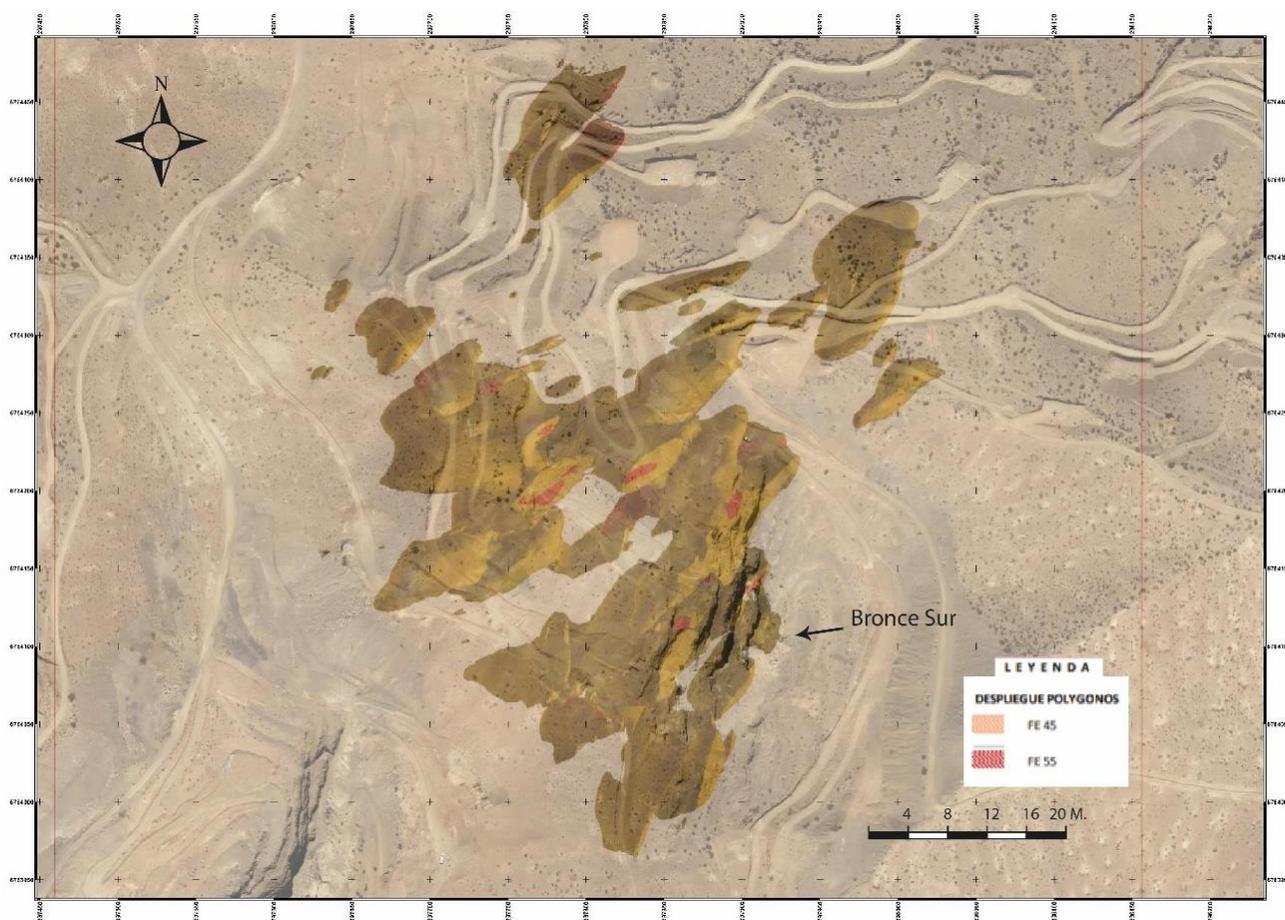


Figura 7: Planta Bronce Sur, volumen de Fe>45% y Fe>55%. Extraída presentación Cap.Julio 2015.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

3.2.1 Generalidades

El yacimiento Bronce Sur corresponde a una veta de magnetita la cual se encuentra alojado en niveles de rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre intruída en su parte baja por rocas del Complejo Plutónico La Higuera. La magnetita es el principal mineral de mena y presenta una leve oxidación a hematita, los minerales de ganga más comunes son actinolita y apatito. En el yacimiento se observa una zonación de la mineralización horizontalmente (Aguirre 2003).

En el sector se pueden observar rocas andesíticas que se encuentran cortadas por diques andesíticos de grano fino. La roca caja se encuentra intensamente afectada por un halo de alteración que rodea al cuerpo de hierro. Esta presenta una fuerte actinolitización adyacente a la mena, que gradúa hacia una zona de alteración cuarzo-Feldespática (Aguirre, 2003). Dicha alteración es característica de los depósitos de la Franja Ferrífera Cretácica (Vivallo et al., 1994). Además, se puede observar, asociado con la alteración, vetillas y stockwork de actinolita, epidota, clorita, calcita y óxidos e hidróxidos de Fe. Asimismo, el depósito está constituido por brechas que se componen de fragmentos angulosos monomícticos de la roca de caja soportados por una matriz de magnetita.

La textura de la magnetita es predominantemente masiva, con cristales octahedrales visibles solamente en las paredes de espacios abiertos y vetillas tardías. Con respecto a la alteración, se observan vetillas de actinolita, apatita y sulfuros (pirita \pm calcopirita) que cortan a la mena de magnetita. Localmente, se observa que vetillas de apatita pasan a formar la matriz de las brechas con clastos angulosos de magnetita masiva (Carrasco, 1998). En el aspecto estructural al estar relacionado el cuerpo de hierro con la Sistema de Falla de Atacama, tanto la roca de caja como la mena se encuentran fuertemente afectadas por fallas subverticales relacionadas con este sistema (Carrasco, 1998).

Fuera del cuerpo principal, la mineralización de magnetita se encuentra diseminada y en vetillas de la roca caja y en pequeños cuerpos tabulares de magnetita, actinolita y apatita. Algunos diques contienen glóbulos orientados de magnetita de 2 a 10 mm de largo (Aguirre, 2003).

3.2.2 Litología

Fortín (2014) cartografió geológicamente 6,897 km² a escala 1:5.000 del sector de Pleito, en el cual se incluían sectores menores estudiados a menor escala, de los cuales estaba incluido Bronce Sur y se extrajo un fragmento del mapa (imagen 8). En las proximidades del depósito se tienen:

3.2.2.1 Rocas volcánicas

La litología presente en la zona está constituida por una secuencia volcánica conformada por andesitas, andesitas basálticas, tobas andesíticas, tobas de cristales y brechas volcánica. Estas secuencias presentan espesores de hasta 30 m. Estas unidades están afectadas por procesos de

metamorfismo, alteración hidrotermal, emplazamiento de rocas intrusivas y mineralización metálica y no metálica (Fortín, 2014).

Volcanitas de grano fino: Andesitas y tobas de composición intermedia a básica. Incluye andesitas y andesitas basálticas con presencia de piroxeno. Presentan efectos variables de metamorfismo. Se observan en la parte central de la figura 8.

Volcanita composición intermedia: Incluye tobas de grano fino tobas de cristales, tobas de lapilli y brechas volcánicas con clastos de hasta 1° cm de diámetro. Se observan en el lado NE de la figura 8.

3.2.2.2 Rocas Metamórficas

Las rocas presentan efectos de metamorfismo regional sobreimpuesto por el emplazamiento de plutones graníticos, intrusivos con dioritas y pórfidos monzodioríticos. Se observan rocas anfíbolizadas originalmente volcánicas, las cuales en gran medida presentan efectos del metamorfismo de facies de esquistos verdes caracterizada por la asociación de albíta-epidota-anfíbol. Los efectos van desde silicificación hasta anfíbolización. Asimismo, estas zonas pueden subdividirse según la textura metamórfica, metamorfismo del feldespático, presencia de minerales como escapolita, anfíbol y el desarrollo de vetas de feldespato-escapolita. Las rocas metamórficas se presentan en bandas de color verde oscuro a negro de grano fino, compuestas de anfíbol, clorita, sílice y magnetita diseminada (Fortín, 2014). En la figura 8 se observan cercanas a las zonas mineralizadas, son las de mayor exposición.

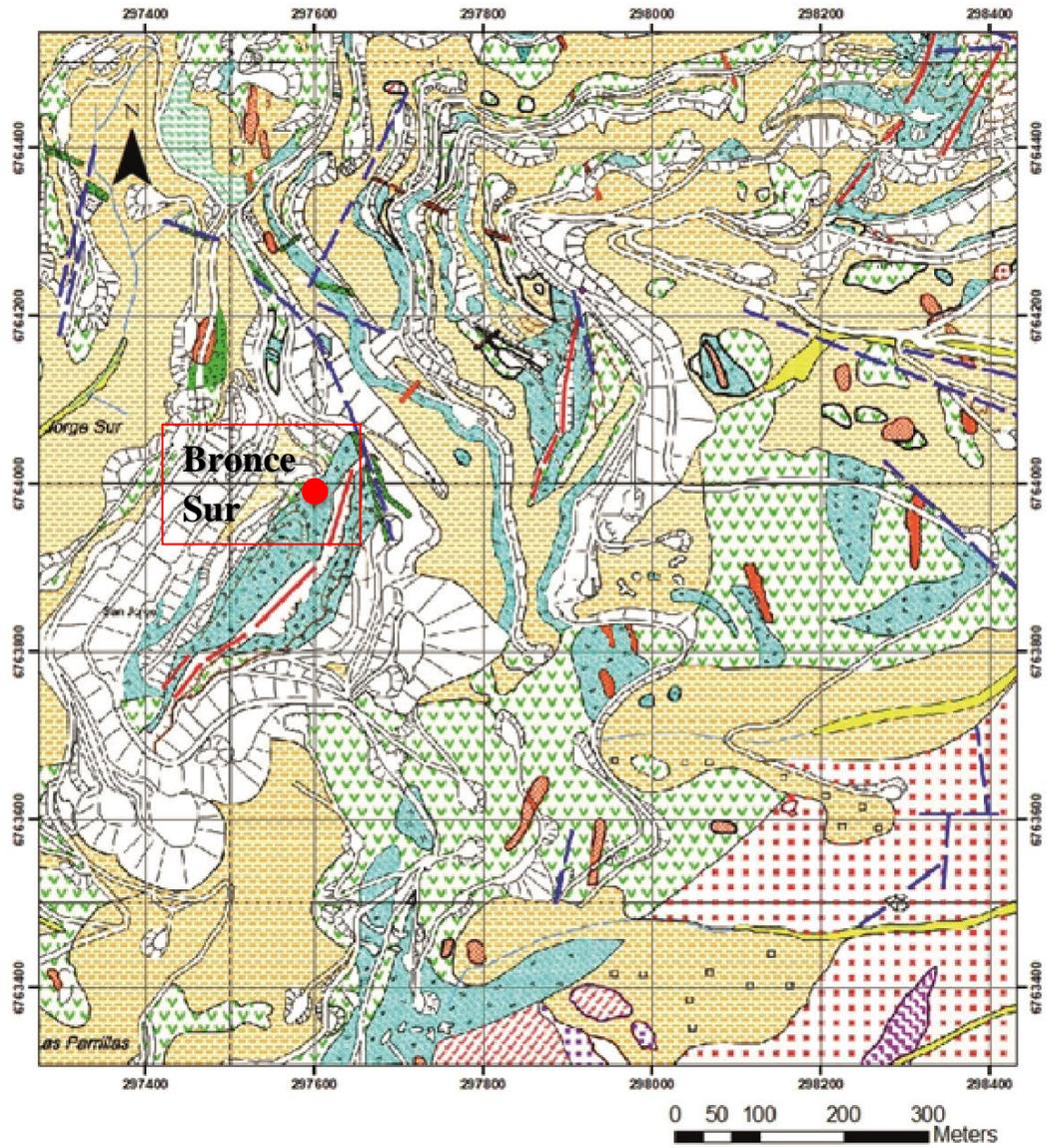
3.2.2.3 Rocas intrusivas

En los alrededores se presentan varios cuerpos intrusivos que afectan a las rocas volcánicas, entre los que se destacan cuerpos graníticos y en menor medida rocas básicas como gabros de clinopiroxeno. De los primeros destaca un complejo denominado leucogranito, en el distrito se observan variaciones a rocas tonalíticas. Estudios también reconocen pórfidos gábricos, tonalitas y pórfidos dioríticos-monzonítico cuarcífero.

Aplita a Leucogranito: Roca de color claro con tonalidades naranjas compuesta con feldespato alcalino, plagioclasa y cuarzo.

Tonalita: Se observa en el extremo SW del mapa, de color gris verdoso, textura fanerítica compuesta de plagioclasa, anfíbol y cuarzo.

Gabro de piroxeno: en el extremo SW de la figura 8, de color gris verdoso, compuesto de plagioclasa básica, clinopiroxeno y reducida presencia de anfíbol.



Leyenda

-  Depósitos Aluviales
-  Suelo
-  Volcanitas de grano fino
-  Rocas Volcanoclasticas de composicion intermedia
-  Rocas Volcánicas Metámorficas con Laminaciones
-  Rocas anfibolitizadas

-  Aplita-leucogranito
-  Tonalita
-  Gabro de clinopiroxeno
-  Porfido Monzodioritico
-  Porfido tranquiandesitico

Simbología

-  Falla
-  Mineralizacion vetiforme y diseminada

Figura 8: Extracto plano geológico proyecto Pleito modificado informe Cap, sector Bronce Sur (Fortin, 2014).

3.2.3 Estructuras locales

En la zona existen tres sistemas estructurales, todos pertenecientes al Sistema de Falla de Atacama cuyas orientaciones son NNE a NE, NW a NNW y EW, todos ellos subverticales (Thiele y Pincheira, 1987). El área está fuertemente tectonizada por estas estructuras cortando y controlando el emplazamiento de las menas de hierro, en ciertos sectores se observan desplazamiento de varios metros. Debido a la fuerte alteración y mineralización, solo algunos planos de falla presenta indicadores cinemáticos. En el S y E del rajo de Bronce Sur se observaron bloques de fallas (Aguirre, 2003).

Algunas estructuras aparentemente controlan la mineralización de mena y ganga, al igual que el emplazamiento de diques (Travisany et al., 1995). Con estas consideraciones, el sistema más importante es el de orientación NE, es longitudinal y parece ser el más antiguo. Muchas de las menas de hierro están asociados a este sistema y controla algunos diques dacíticos. Las estructuras del sistema NW, menos extensas, cortan localmente la mineralización de hierro. El sistema NE y NW también parecen ser controlados por el emplazamiento de cuerpos tabulares leucocráticos. El sistema EW es el más joven y aparece cortando el depósito. Algunos de los diques andesíticos tienen una orientación que coincide con este sistema. Los tres sets estructurales han tenido la localización de la mineralización secundaria, incluyendo magnetita, actinolita, epidota, cuarzo, calcita y venas de hematita (Travisany et al., 1995).

3.2.4 Mineralización

El mineral de mena más abundante es la magnetita, la cual se presenta en forma masiva, estratiforme o filoniano (Travisany, 1991). La mineralización está ubicada en el área en forma de diques, pequeños cuerpos de brecha, stockwork, vetillas inclusiones y diseminado en la masa fundamental de las andesitas, diques e intrusivos. La mayoría de la mena masiva en el centro del dique de magnetita ha sido extraída, dejando un buen afloramiento. Algunos sectores están compuestos de magnetita masiva y otros de brecha con matriz de magnetita con clastos de andesita. Algunos sondajes en la zona presentan cuerpos de mena paralelos que no son observados en superficie (Aguirre, 1991).

En la mayoría de los casos la magnetita se presenta con un hábito masivo, sin que se observen caras de minerales. Son encontrados octaedros alrededor de espacios abiertos rellenos posteriormente por venas de ganga. Hay en cantidades menores titanita, rutilo e ilmenita. Actinolita aparece creciendo en equilibrio con magnetita como gruesos cristales euhedrales de 1 cm de tamaño, especialmente en diques. Apatita aparece como fase tardía, relleno espacios abiertos o en vetillas pegmatíticas que cortan la mena masiva de magnetita. La misma asociación mineral es encontrada en diferentes menas (Aguirre, 1991).

La porción de la roca caja más cercana al contacto con el cuerpo de mena está fuertemente fracturada y forma una brecha de matriz de magnetita clasto soportada, mal seleccionada. Además, en Bronce Sur la presencia de sulfuros es más común que en la contigua mina la falda. Cabe agregar que el cuerpo de mena se extiende por lo menos unos 200 m de profundidad. (Aguirre, 1991).

3.2.5 Alteración

Según lo descrito por (Aguirre, 1999) El depósito Bronce Sur presenta, a grandes rasgos, una alteración actinolítica que es contemporánea a la mineralización de Hierro. Se encuentra comúnmente apatito como una fase tardía relacionada con la mena de hierro. Se presenta una alteración feldespática junto a actinolita en forma de vetillas que cortan la mena de Fe y la roca caja. Además, en la zona se describe una alteración propilítica caracterizada por clorita, epidota, actinolita, pirita y calcopirita que se superpone a las alteraciones previas para luego haber sufrido una alteración supergena.

Con respecto a la roca caja, la masa fundamental es obliterada por un fuerte halo de alteración actinolítica rodea al depósito Bronce Sur, dando una apariencia más afanítica a la roca. Una alteración potásica se observa expandida en las andesitas y junto a la actinolita forman la mayoría de los minerales de alteración en la roca caja. La albita es restringida mayoritariamente a cuerpos leucocráticos tabulares (Aguirre, 1999).

Se observan vetillas de actinolita con magnetita, una zona de feldespato potásico representando una alteración silíceo. Además, se presenta epidota como mineral accesorio común en este tipo de alteración. La actinolita también se presenta como vetillas pegmatíticas formada por cristales euhedrales que pueden bordear los 10 cm de largo, se presenta intercrecida con la mena de magnetita o asociada con cristales de apatita en vetillas. Apatita es encontrada solo como una fase diseminada menor en la roca caja alterada. También es observada clorita en vetillas y bolsones que se superponen previa a la mineralización de magnetita, actinolita y feldespato. Esta es a menudo encontrada en vetillas monominerales o como agregados radiales, a veces alterando a la actinolita o en vetillas con epidota. Pirita y calcopirita a menudo aparece creciendo en estas vetillas de clorita + epidota cuando estas cortan la mena de hierro. Estos sulfuros son particularmente abundantes en Bronce Sur. Asimismo, se encuentran vetillas de calcita de grosor de 30 cm que pareciera que son cortados por la mena de hierro y la roca caja. Cuando corta la mena de hierro, la calcita está asociada a apatita, feldespato potásico y pirita. Además, son encontradas en los bordes de estas venas clorita de grano fino, epidota y actinolita. Finalmente se reconocieron vetillas de cuarzo tardío reactivando vetilla de clorita y calcita, y formando la matriz de la brecha de clastos de magnetita (Aguirre, 1999).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En el presente capítulo se detallan los resultados relevantes para este estudio, los cuales fueron entregados por todas las metodologías aplicadas a las muestras macroscópicas y microscópicas.

Para efectos de este estudio, se realizaron descripciones macroscópicas de muestras de mano en los galpones de CMP en las cercanías de la zona de estudio y observaciones microscópicas mediante estudios a luz transmitida y reflejada de cortes transparentes-pulidos realizadas en este trabajo en el laboratorio Geocronos y posteriormente estudiadas vía Qemscan y microsonda electrónica en la universidad de Concepción, las cuales son presentadas en ANEXO C. A continuación, se describen las litologías reconocidas en el área.

4.1 Descripciones Petrográficas

En base a las observaciones de los sondajes realizadas en este trabajo pertenecientes a Mina Bronce Sur y al estudio petro-calcográfico en el cual se realizó con ayuda de Geocronos, se logró identificar la litología presente en la tabla 3. La litología predominante está constituida por rocas volcánicas andesíticas de textura porfídicas de color gris verdoso con fenocristales de plagioclasa y una marcada cloritización y actinolitización la cual oblitera la textura original (Figura 9). Cortando a esta litología se distinguen la ocurrencia de diques andesíticos hipabisales de textura afanítica. Como minerales de alteración destaca la presencia de abundante magnetita masiva intercrecida principalmente con actinolita (15%), trazas de apatito (2%), pirita diseminada y calcopirita. Los minerales de ganga que se pueden observar son feldespatos potásico (vetillas), epidota (vetillas y diseminada), escapolita (diseminada), clorita (diseminada), sílice, carbonatos, yeso, arcillas, escaso esfeno y turmalina, los cuales ocurren en forma de vetillas o diseminadas que cortan la mena de magnetita o a la roca caja.

La mineralización metálica se encuentra constituida casi exclusivamente por magnetita masiva de cristales anhedrales a subhedrales asociada con sulfuros de hierro principalmente pirita, y calcopirita. Las piritas observadas presentan cristales subhedrales, color amarillo pálido, hábito cúbico, con caras estriadas, los cuales se presentan diseminada, en cúmulos o como relleno de espacios abiertos siendo constituyente mayoritario de algunas vetillas casi exclusivamente de este sulfuro. La calcopirita se presenta en forma diseminada y formando parte de algunas vetillas, pero su abundancia es muy inferior a la pirita. Además, se observa especularita y esfalerita en vetillas de manera puntual en algunas zonas. La ocurrencia de estos minerales es en forma de vetillas que cortan la mena de hierro y la roca andesítica generando una alteración de la litología original. En la tabla 3 se resumen de los minerales encontrados en las muestras.

Tabla 3 resume los principales minerales de alteración y metales de las muestras analizadas.

Muestra	Mineralogía de Alteración	Mineralogía Metálica
266352	Chl, Act, Qz, Ap, Scp, Car	Py, Mt, Sph, Cpy, Hm
266356	Ser, Arc, Act, Ep, Scp, Fk, Ef	Mt, Py, Cpy, Hm
266357	Car, Ep	Py, Mt, Hm, Cc, Cpy
266358	Qz, Ep, Fk, Chl, Car, Ap, Arc	Py, Mt, Hm
266359	Act, Fk, Qz, Ep, Arc, Ap, Tur, Car	Py, Mt, Hm, HFe
266360	Fk, Chl, Ep, Tur, Arc, Gy, Car	Mt, Py, Hm, Cpy, HFe
266362	Qz, Act, Chl, Car, Fk, Arc	Py, Mt, Hm, Cpy
266366	Ab, Arc, Car, Act, Fk, Ep, Ap	Py, Mt, Hm, Cpy
266367	Arc, Ser, Ab, Act, Chli, Ep, Car, Scp	Py, Mt, Cc, Cpy, Cv, Hm
266368	Act, Scp, Car, Ap, Ep, Chl	Py, Mt, Hm, Cpy, Ru
266370	Act, Scp, Ap, Fk, Arc, Chl	Py, Mt, Hm, Cpy
266505	Car, Qz, Ap, Chl, Act	Py, Mt, Cpy, Hm
266508	Act, Scp, Ep, Car, Ap	Py, Mt, Cpy, Ru, Hm
266511	Act, Ep, Ap, Scp, Car	Py, Mt, Hm, Cpy
266513	Ep, All, Act, Fk, Car, Qz, Ap	Py, Mt, Ru, Cpy
266518	Fk, Act, Arc, Chl, Ap, Scp, Car	Py, Mt, Cpy, Ru

Chl: Clorita, **Fk:** Feldespato potásico, **Arc:** Arcillas, **Ser:** Sericita, **Car:** Carbonato, **Ep:** Epidota, **Qz:** Cuarzo, **Act:** Actinolita, **Ab:** Albita, **Tur:** Turmlina, **Gy:** Yeso; **Ap:** Apatito; **Ef:** Esfeno; **All:** Alanita; **Scp:** Escapolita;; **Mt:** Magnetita; **Hm:** Hematita; **Ru:** Rutilo; **Py:** Pirita; **Cpy:** Calcopirita; **Cc:** Calcosina; **HFe:** Hidróxidos de Hierro; **Sph:** Esfalerita

4.1.1 Petrografía

En la zona de estudio, según las descripciones realizadas en este trabajo de los sondajes, se observan rocas volcánicas andesíticas de color verde oscuro a negro (figura 9) de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa de hasta 2 mm en una masa fundamental de textura afanítica (imagen a y b, Figura 10), la cual presenta albitización, sericitación y argilización. La mayoría de los fenocristales se encuentran alteros a albita. Estas rocas se pueden observar en la parte superior del rajo en forma de cúpula sobre la mena de Fe. En general la textura original de la roca fue obliterada por una alteración pervasiva de actinolita y clorita. En algunos sondajes se observaron diques andesíticos de grano fino, textura afanítica y de color gris los cuales tienen algunos metros de espesor.



Figura 9 Muestra de roca andesítica afectada por una anfíbolitización

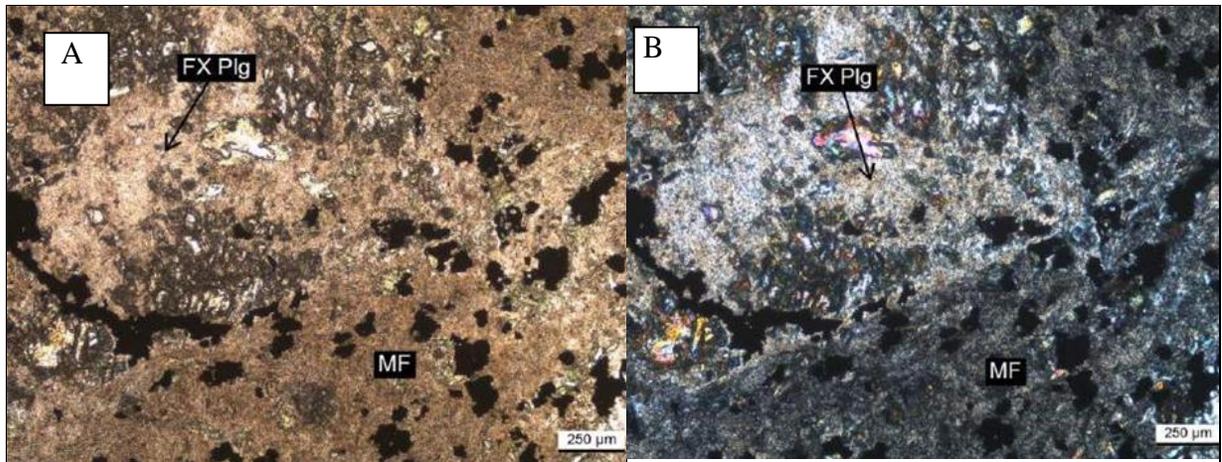


Figura 10: Muestra 266367: A) corte a nicoles paralelos B) corte a nicoles cruzados. Textura porfídica compuesta de fenocristales de plagioclasas inmersos en una masa fundamental que esboza un arreglo hipidiomórfico granular, 50X. Fk: Feldespato potásico, MF: Masa fundamental. Plg: Plagioclasa.

4.1.2 Alteraciones

El depósito muestra el patrón de alteración descrito por (Travisany et al., 1995) para el distrito El Pleito y tiene concordancia con la alteración observada en los depósitos de la Franja Ferrífera Cretácica (Vivallo et al. 1994).

Como producto de alteración de la roca caja, ocurre cloritización y anfibolitización de la masa fundamental afanítica y sericitación-albitización de los fenocristales de plagioclasa. Esta alteración tiene un carácter regional ya que son reconocidas en otros sectores de la zona. También se observa una silicificación en forma de parches sobre la roca lo cual le da un aspecto blanquecino a la roca.

El mineral de alteración más abundante es la actinolita el cual se presenta diseminado, en vetillas de cristales gruesos, como mineral único o intercrecida junto a magnetita, en brechas con clastos de magnetita formando la matriz de éstas. En las muestras de los sondajes estudiados ocupaba alrededor del 20 - 25% de la roca. Los minerales accesorios asociados a la actinolita son apatito, escapolita, clorita, sílice, pirita, calcopirita, escaso esfeno, turmalina los cuales están relacionados junto a la actinolita a una etapa syngenética a la mineralización de magnetita. Otro mineral que sigue en proporción es el feldespato potásico, el cual se presenta principalmente como abundantes vetillas que cortan la mena y los cristales de actinolita, junto a esta alteración también se ve stockwork de magnetita que está asociada a feldespato potásico. En el sector también se puede observar epidota la cual se presenta como finas vetillas asociadas con apatito, pirita, calcopirita, carbonatos y albita.

4.1.2.1 Anfibolitización

Se expresa como un agregado masivo de abundante actinolita acicular de cristales subhedrales que bordean los 5 cm de largo, en algunos casos son reconocidos como un componente importante de reemplazo de la roca original, ocupan una amplia extensión de la parte expuesta del rajo. Esta alteración se encuentra asociada a minerales como magnetita masiva, apatito, escapolita, clorita y sulfuros diseminados como pirita y calcopirita. Generalmente esta textura se observa en vetillas de actinolita que cortan la mena de hierro masivo. Además, es un componente importante que acompaña al hierro en las brechas hidrotermales que se observan en las paredes de la mina.

Asimismo, esta alteración se observa en forma diseminada afectando a la masa fundamental de las rocas volcánicas andesíticas con intensidad desde débil a moderada, asociada a esta alteración ocurre sericitización y albitización de las plagioclasas de la roca caja.

La muestra 266370 (Figura 11) correspondiente a un tramo de sondaje de 10 cm, presenta color gris verdoso oscuro, duro, compacto, se observan cristales aciculares de actinolita intercrecidos con magnetita, vetillas irregulares de color blanco y vetillas de 5mm de espesor de pirita. Al microscopio (Figura 12) se observa contacto de actinolita y apatito.

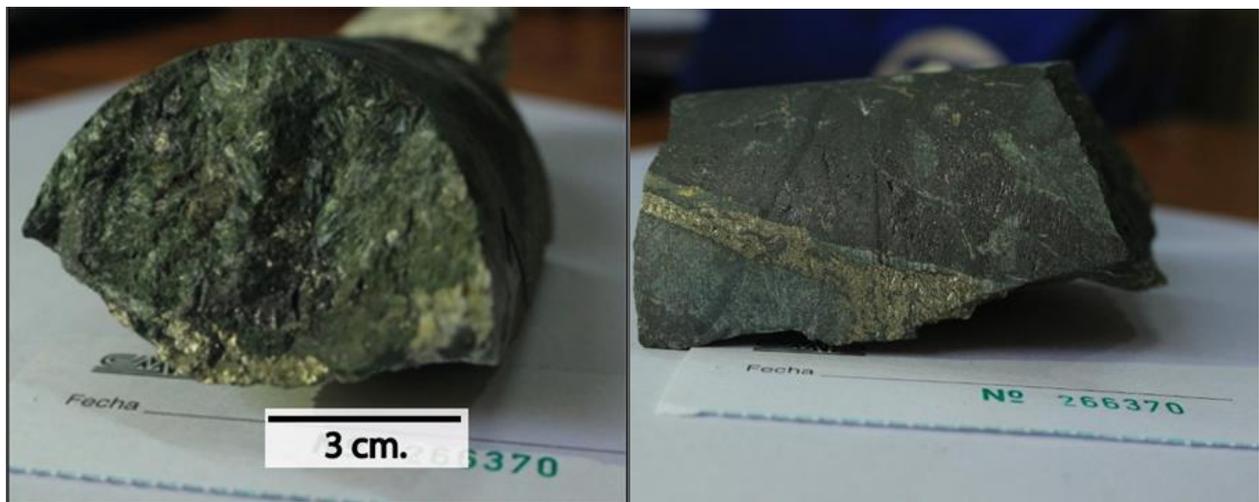


Figura 11: Muestra 266370: roca actinolitizada con cristales de actinolita acicular

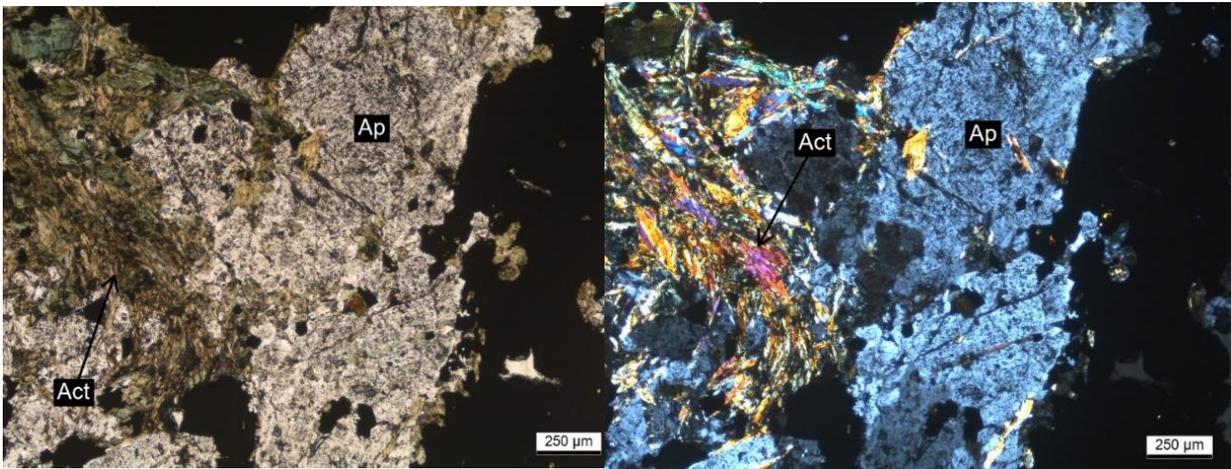


Figura 12: Muestra 266370 Apatito junto a minerales metálicos y actinolita, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. Act:actinolita, Ap:Apatita.

4.1.2.2 Feldespatización y silicificación

Se expresa como brechas hidrotermales con presencia de feldespato potásico + cuarzo secundario + pirita + menor epidota y calcopirita, la cual corta al cuerpo de magnetita maciza. A muestra de mano (Figura 13 y 16) se observa como vetas irregulares que cortan la roca actinolitizada y magnetita vetiformes. El feldespato potásico se observa de corte transparente (figura 14) como cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,2 mm, los que exhiben una moderada a fuerte argilización y que se presenta como un constituyente importante del agregado de reemplazo. La pirita se expone como cristales de un mayor tamaño que las asociadas a la magnetita masiva. Este evento se encuentra asociado a una alteración en forma de vetillas irregulares, además presenta parches los cuales consisten en un agregado masivo de aspecto granular compuesto principalmente de feldespato K, epidota, apatito, pirita, magnetita, menor calcopirita, esta asociación está en contacto con el evento feldespático.

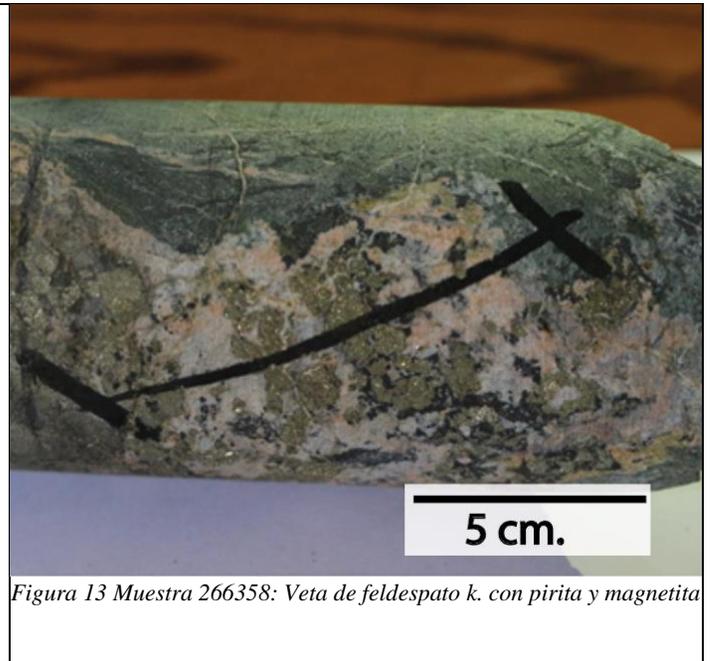


Figura 13 Muestra 266358: Veta de feldspato k. con pirita y magnetita

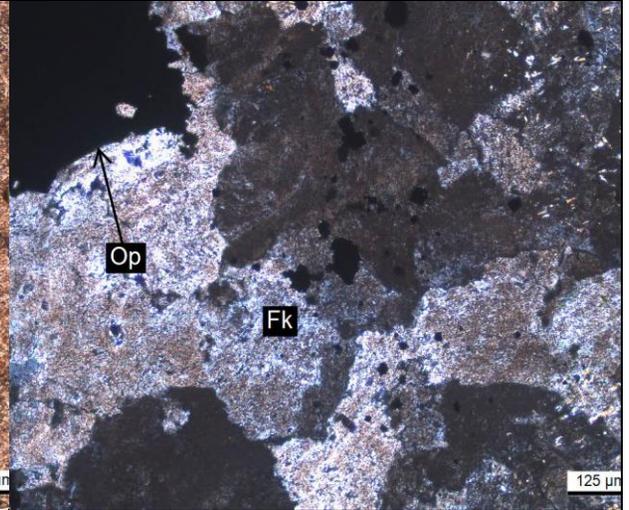
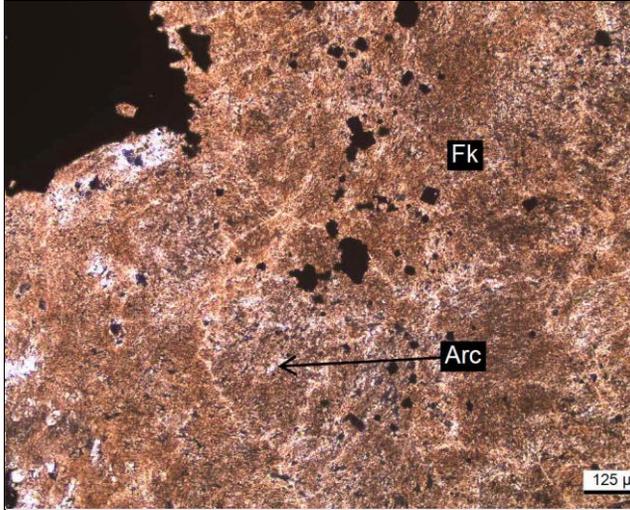


Figura 14 **Muestra 266358:** Agregado de feldspatos potásicos afectados por una moderada a fuerte argilización, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. Fk: Feldspato potásico. Op: opaco, Arc: arcilla

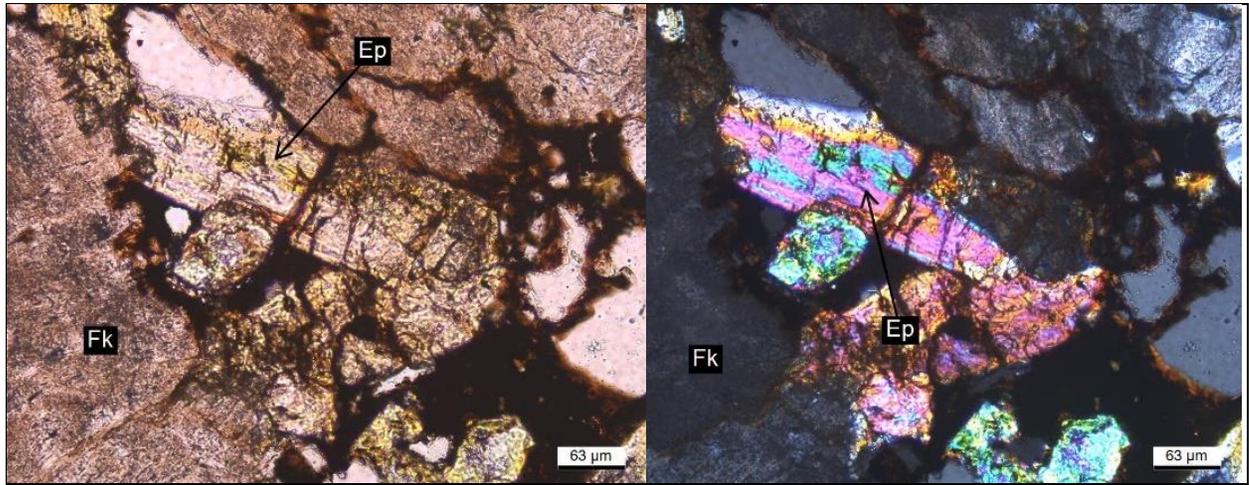


Figura 15 Muestra 266358: Parches de epidota, nicoles paralelos y cruzados, 200X. Fk: feldespato K, Ep: epidota



Figura 16 Muestra 266360: Se observa la textura de agregado cristalino de grano fino compuesto por epidota, feldespato, pirita, magnetita. Vetillas de magnetita cortan la textura descrita.

4.1.2.3 Epidotización y carbonatación

Se presenta como vetillas finas irregulares de epidota + carbonato + apatito + pirita + calcopirita + magnetita. Se puede considerar como una alteración propilítica. Estas vetillas cortan la roca actinolitizada, siendo representadas como un evento posterior de menor temperatura. También se observan vetillas finas de carbonato las cuales cortan la litología anteriormente descritas. La vetilla de epidota se observa en la figura 17 y a luz transmitida en la figura 18.

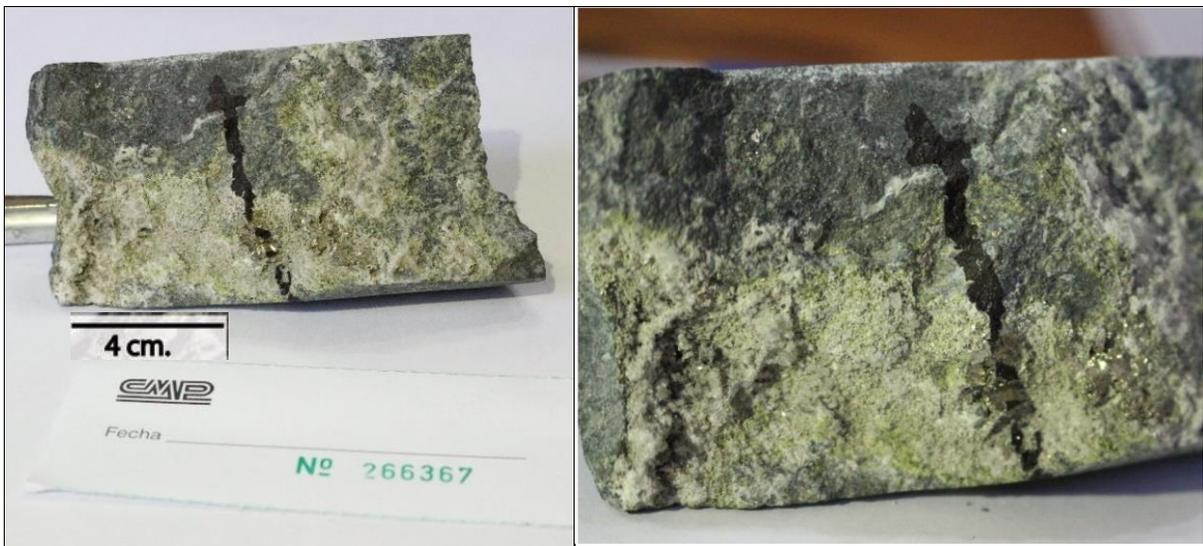


Figura 17 Muestra 266367: roca con alteración propilítica con epidota, carbonato, apatito.

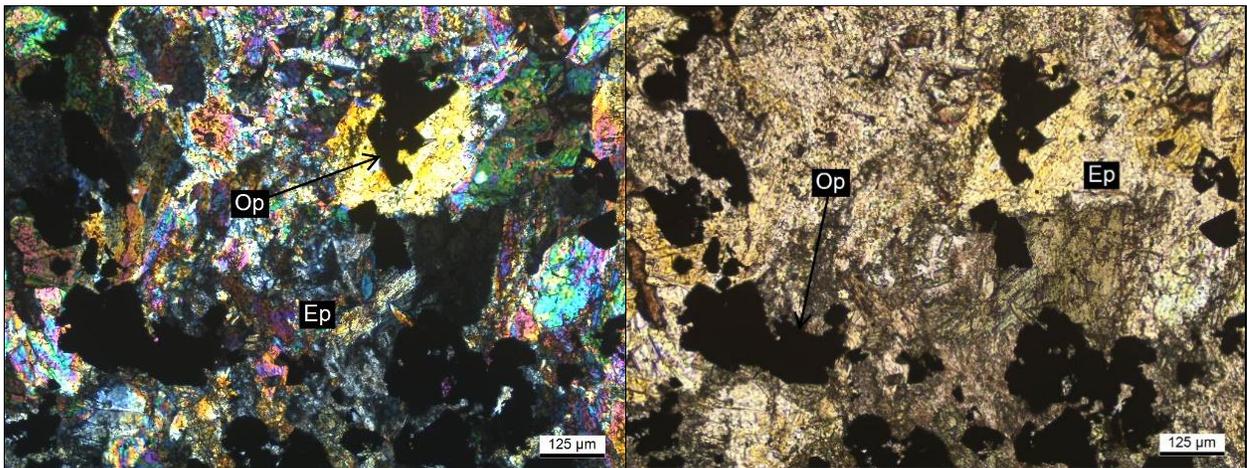


Figura 18 **Muestra 266367**: Cúmulo de epidota y minerales metálicos (magnetita martitizada y calcopirita), nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. Op: opaco, Ep:epidota.

4.1.2.4 Alteración supergena

Se presenta como alteración débil, no muy extendida en la mina, se observa en los niveles superiores del yacimiento. Está representada principalmente como argilización de feldespatos y como oxidación de los bordes de magnetita a hematita, calcopirita se altera a covelina o calcosina. En las partes más superficiales hay presencia de oquedades irregulares rellenos de óxidos de Fe.

4.1.3 Mineralización

En trabajos anteriores como (Aguirre, 2000)(Travisany et al., 1995) el distrito se destaca por ocurrencia de abundantes minerales de hierro.

La mineralización más intensa corresponde a un cuerpo principal de magnetita maciza de disposición tabular de rumbo general NNW de una potencia de 50 m y manto subvertical. La magnetita se caracteriza por ser de cristales anhedrales a subhedrales, en algunos casos son apreciables cristales octahedrales de magnetita de hasta 5mm. La mena se encuentra asociada con escasa ganga de actinolita de cristales finos, en algunos casos se presenta como cúmulos. Además, se observan cuerpos de brecha de magnetita intercrecida con grandes cristales de actinolita y apatita, también se pueden observar clastos angulosos de roca caja, esta textura se presenta rodeando a la magnetita maciza. Luego, grada a una zona de stockwork de vetillas de magnetitas que afectan a la roca caja. Por último, se encuentra diseminada intercrecida con cristales de actinolita, se presenta como un halo distal de las texturas anteriormente mencionadas. En el rajo se observa la magnetita masiva como una veta de al menos 20 metros de ancho de la cual solo queda el contacto del hierro macizo con el brechoso.

En algunos sectores, según observaciones microscópicas se puede observar, una textura de reemplazo de la magnetita por hematita (figura 20B), esto ocurre en los bordes de los cristales y en las zonas de debilidad. Por lo general, la magnetita se encuentra muy poco alterada, lo cual le confiere una mejor calidad como yacimiento ferrífero.

La mineralización sulfurada está representada principalmente por pirita en forma diseminada a muestra de mano (Figura 21A), siendo la textura más común en el yacimiento para este mineral, además se observa en vetillas finas como relleno de espacios abiertos, vetillas gruesas con cristales subhedrales de hábito cúbico, asociada a magnetita o intercrecida con calcopirita. En algunos cortes se presenta como cristales subhedrales los cuales exhiben una incipiente anisotropía en algunos casos, atribuible a impurezas dentro del cristal. Su ocurrencia principalmente es relleno de espacios abiertos en la magnetita masiva y en algunos casos se encuentra asociado a su vez con calcopirita.

El sulfuro de cobre de mayor abundancia es la calcopirita, la cual se encuentra en forma de vetillas y diseminada, en algunos casos la calcopirita esta intercrecida con la pirita (Figura 19D), además a nivel de microscopio se observa calcosina y covelina en niveles trazas como bordes de reacción de la calcopirita, producto de la oxidación. Además, se observa, en niveles trazas, la presencia de rutilo asociado a cristales de magnetitas.

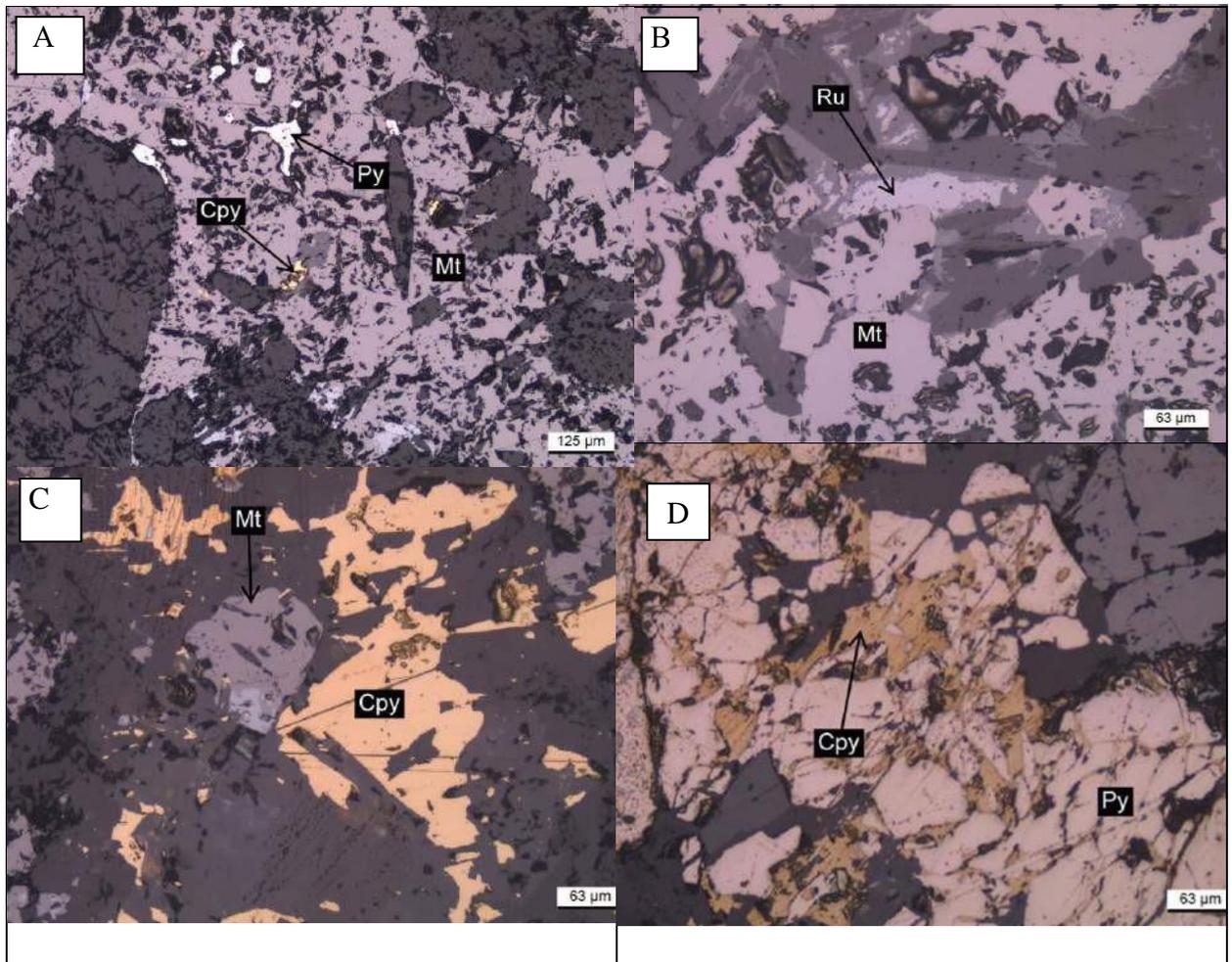


Figura 19 Muestra 266508: **(A)** Pirita y calcopirita relleno de espacios abiertos en magnetita, luz reflejada, 100X. **(B)** Rutilo en contacto simple con magnetita, luz reflejada, 200X. **(C)** Cristales de magnetita martitizada junto a calcopirita, luz reflejada, 200X. **(D)** Calcopirita relleno de espacios abiertos en pirita, luz reflejada, 200X. Cpy:calcopirita, Py:pirita, Mt:magnetita.

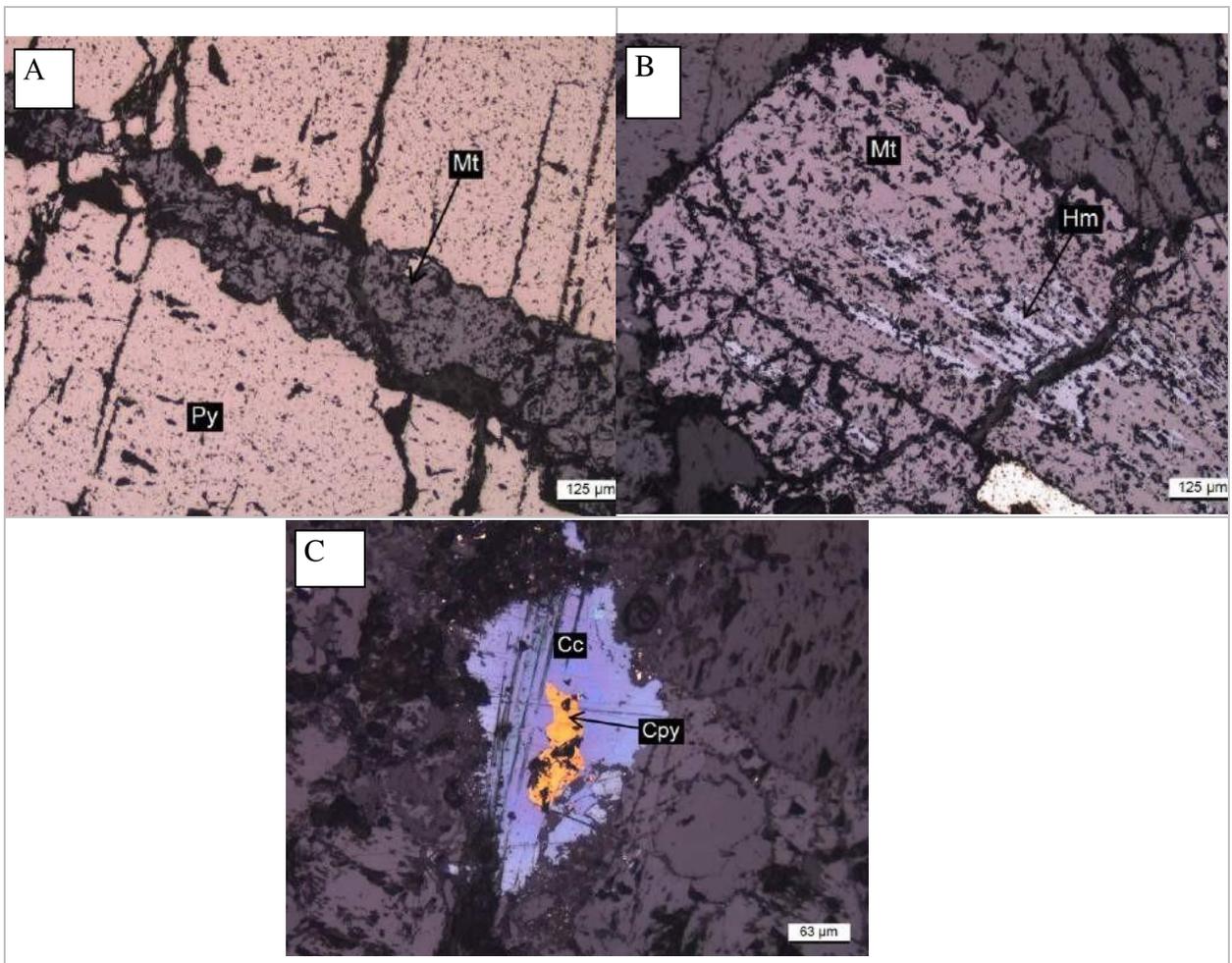


Figura 20 Muestra 266357 A) Magnetita relleno de espacios abiertos en pirita, luz reflejada, 100X. (B) Reemplazo de hematita por magnetita a partir de los bordes, luz reflejada, 100X. (C) Calcopirita reemplazada a partir de los bordes por calcosina, luz reflejada, 200X. Py: pirita, Mt:magnetita, Hm:hematita. Cc:calcosina

4.1.3.1 Descripción de piritas

Las distintas texturas presentes para las piritas están estrechamente relacionadas con los pulsos que generaron la mena de hierro siendo cristalizados como fases magmáticas-hidrotermales asociadas al hierro macizo, y otras asociadas a fases hidrotermales posteriores de alta y baja temperatura.

Piritas diseminadas

Se observan cristales de piritas anhedrales a subhedrales de tamaño que van de los 0.1 mm a los 2 mm, en algunos casos puede corresponder hasta el 40% de la roca, pero generalmente, bordea el 5% del total de la muestra. Se encuentra asociada a la magnetita maciza, apatito, actinolita y escapolita. En algunos cortes pulidos se observa esta pirita con hábito cúbico con bordes definidos y regulares (Figura 22A). Son de color amarillo, y está asociada al evento ferrífero principal junto a magnetita, actinolita, apatito y menor calcopirita.

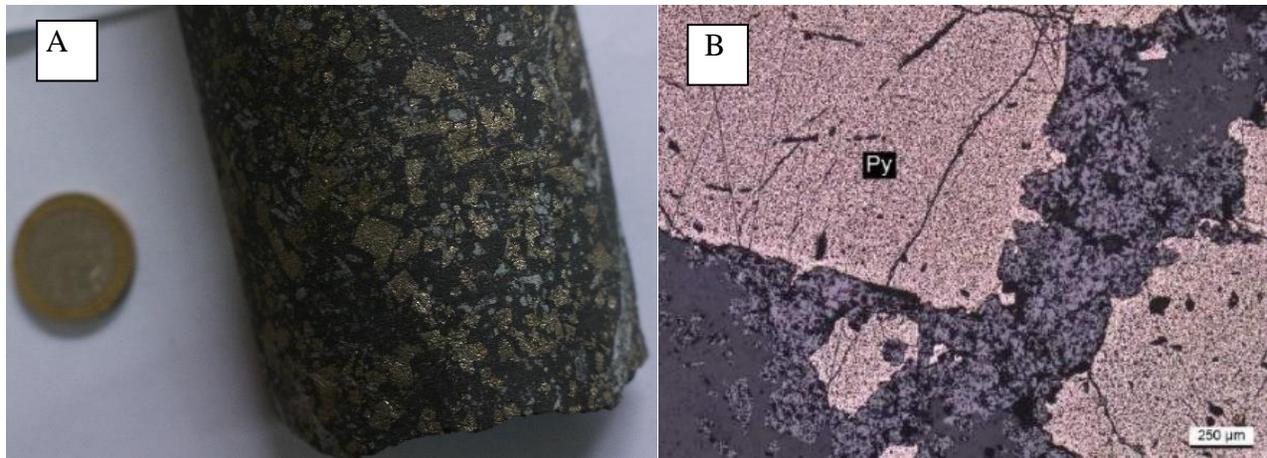


Figura 21 Muestra 266505: A Se observa pirita diseminada 38% de la roca a la derecha, B en muestra de mano a la izquierda corte a nicoles cruzados 50X.: Py:pirita

Piritas en vetillas

Se ha podido identificar al menos tres eventos diferentes los cuales están asociados con pirita vetiformes.

1. **Vetillas asociadas a feldespato potásico:** cristales de hasta 3 mm de habito cúbico, gruesos, estriados, de color amarillo pálido los cuales están asociados principalmente a la alteración de feldespato potásico, epidota y calcita brechizando la roca (Figura 22). Estas piritas son las que se observan como vetillas gruesas, a corte pulido se observa una leve anisotropía de los cristales. Estas piritas son las que pudiera estar asociadas al cobalto.

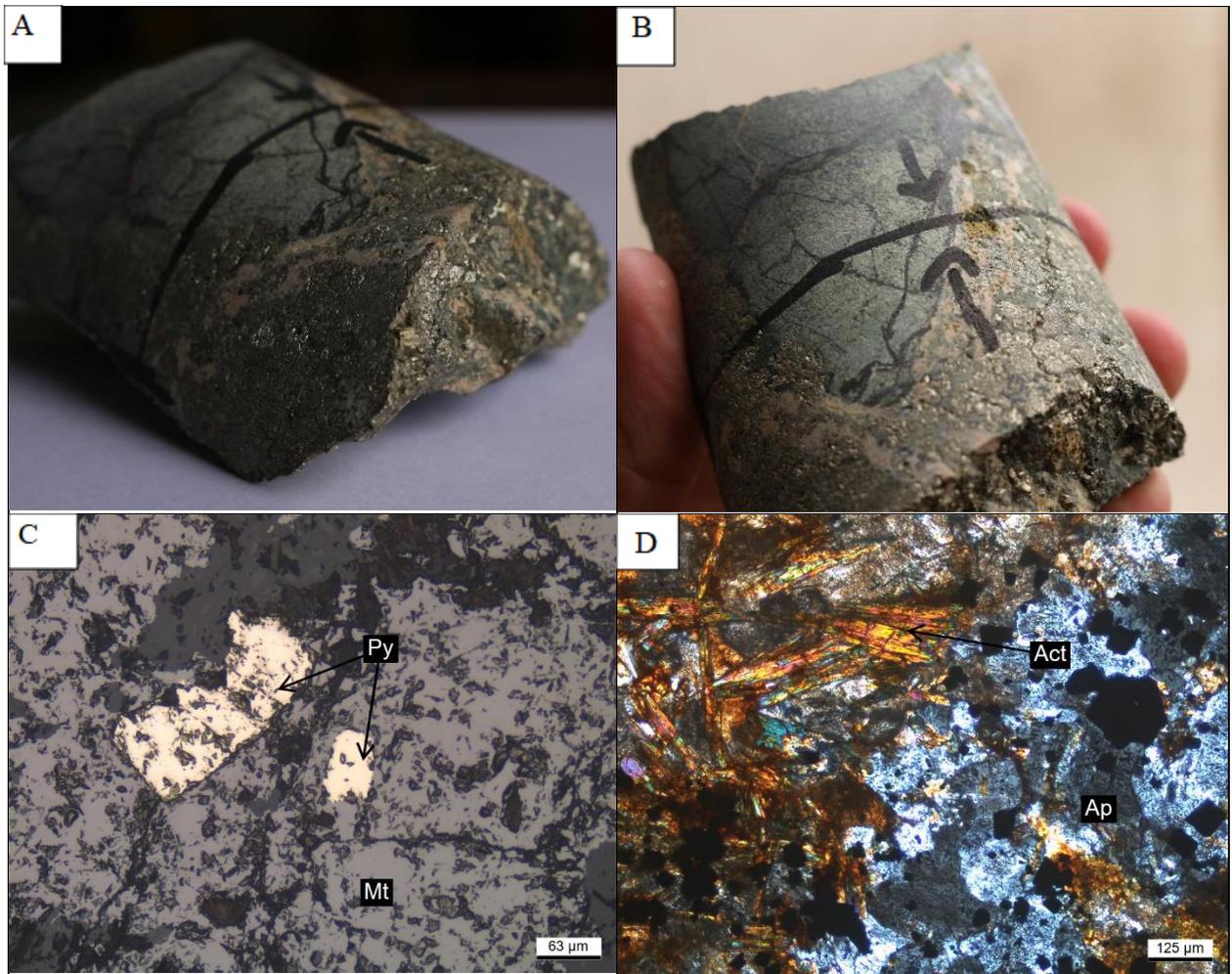


Figura 22 Muestra 266359: brecha hidrotermal con gran contenido de pirita, feldespato potasico y magnetita. Py:pirita, Act:actinolita, Ap:apatita, Mt:magnetita.

2. **Asociados al evento propilítico:** Se observan vetillas irregulares con un componente importante de epidota asociada con carbonatos, magnetita, pirita y calcopirita (Figura 24A). Los cristales de pirita en esta asociación son de menor tamaño, según imágenes a luz transmitida (Figura 23 C y D) estas piritas están asociadas a minerales como epidota, apatito, carbonatos como minerales de ganga, además se observan trazas de calcopirita y magnetita. Es menos extensa y son vetillas más finas según observaciones de sondajes.

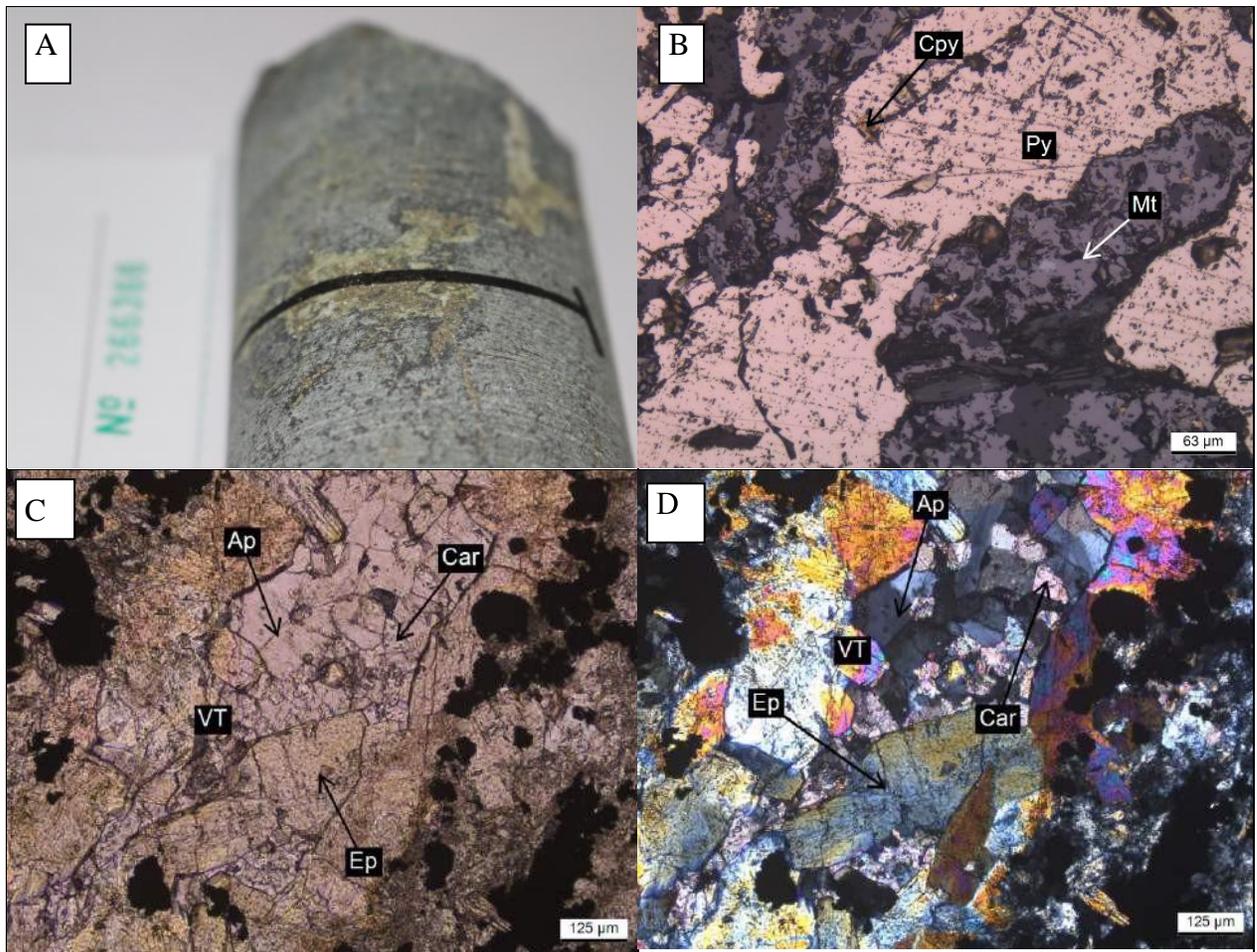


Figura 23 Muestra 266366: Vetilla compuesta de epidota, apatito, carbonatos y minerales metálicos, A) Vetilla de epidota con piritita a muestra de mano. B) Piritita, calcopiritita y magnetita a luz reflejada C) Y D) corte a nicols paralelos y cruzados respectivamente, 100X. Cpy: calcopiritita, Py:pirita, Mt:magnetita, Ap:apatita, Vt:vetilla, Ep:epidota, Car:carbonato.

3. **Vetillas asociadas al evento ferrífero principal:** Se presentan como vetillas finas de 2 mm casi exclusivamente de piritita (Figura 24A), se observa asociada a magnetita y calcopiritita, estas estarían ligadas al evento ferrífero principal. Estas vetillas ocurren inmediatamente después que se deposita la magnetita.

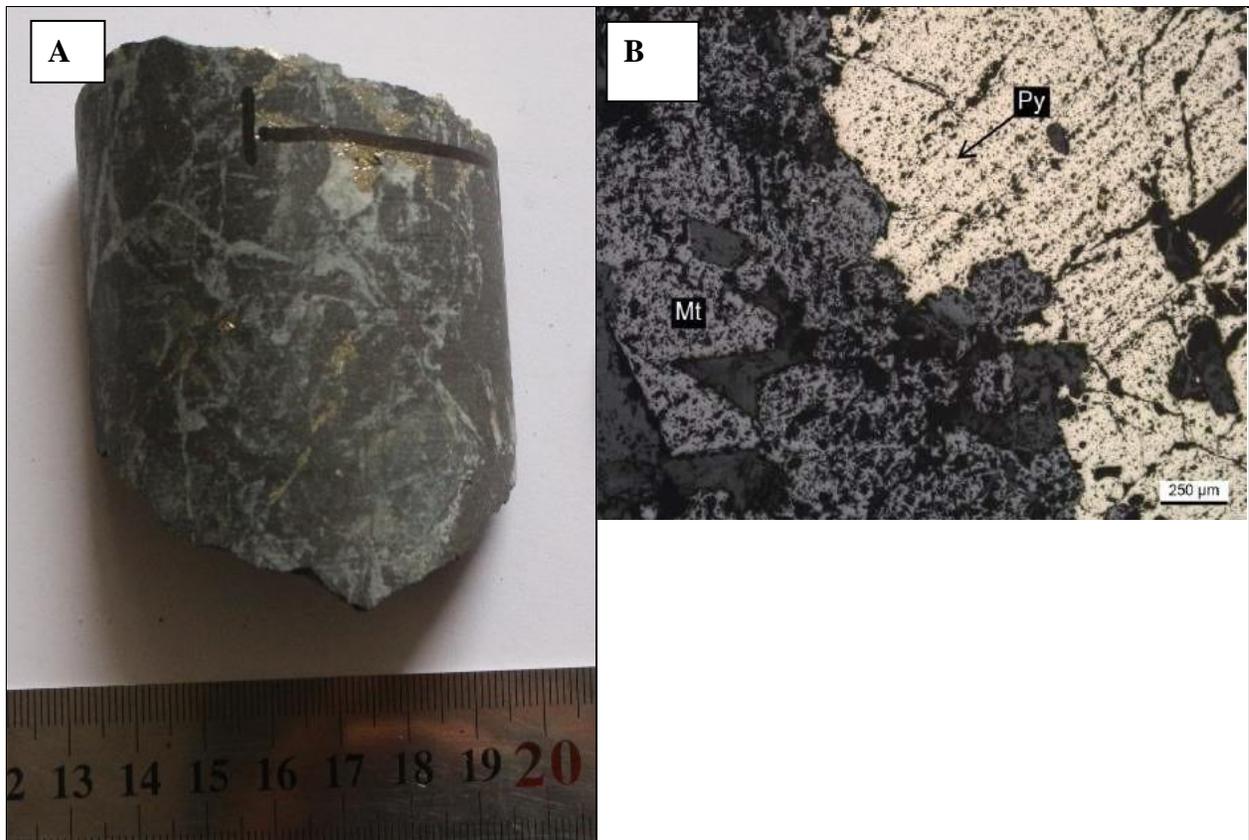


Figura 24 Muestra 266352: A) a la derecha a muestra de mano magnetita con vetillas de apatito y pirita, B) a la izquierda corte pulido/transparente a luz reflejada. Pirita rellenando espacios abiertos en magnetita 50X. Mt:magnetita, Py: pirita.

4.2 Análisis Químicos

En el siguiente apartado se trabaja en base a los resultados obtenidos de los análisis de ICP MS/OES de los laboratorios sobre las 150 muestras de polvo seleccionadas. Para el análisis exploratorio de datos, en primera instancia, se obtienen directamente los estadísticos básicos e histogramas de los datos numéricos obtenidos del laboratorio en base aritmética. Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento, pero con los datos convertidos en base lognormal ya que es el patrón más aplicable en prospección geoquímica de elementos traza pues estos elementos siguen una distribución normal, o cercana a esta, cuando son transformados a base logarítmica (Ahrens, 1957).

4.2.1 Análisis univariable

4.2.1.1 Cobalto

Con respecto al cobalto, se puede indicar que para el total de muestras presentan una media aritmética de 207 ppm de Co, lo que representa un enriquecimiento de 8 veces la concentración promedio de cobalto en la corteza terrestre de 23 ppm (Clarke y Washington, 1924), además según

la tabla 4 su media normalizada y luego trasformada es de 117 ppm de Co, presenta una mediana de 98 ppm, una concentración máxima de 1917 ppm y una mínima de 15 ppm. Con respecto a la desviación estándar esta es de 295, el primer cuartil es de 62ppm y el tercer cuartil es 221ppm, su varianza es de 2,83ppm. Todos los valores para las muestras analizadas están sobre el límite de detección de 1 ppm para el caso del cobalto.

En base al histograma de cobalto (Figura 25), se observa que sigue una distribución normal, la mayoría de las muestras están en el centro de la distribución. Se distinguen dos familias de datos. Un primer peak de 73ppm el cual corresponde a la moda. El 50% de las muestras analizadas presentan concentraciones entre los 62 y 221 ppm. Además, entre los 500 y 550 ppm es el rango con mayor frecuencia de resultados.

El histograma de la figura 25 con la variable normalizada muestra dos familias de datos, la primera va desde los 2,5 a 5,5 con un peak de frecuencia en 4,25, la segunda familia va desde los 5,5 a los 7,5, esta posee menor frecuencia de muestras, pero mayores leyes que la primera familia.

Tabla 4: Resultados transformados para Co.

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Co	116,77	2,77	2,83	15,00	62,23	97,49	221,19	1916,97

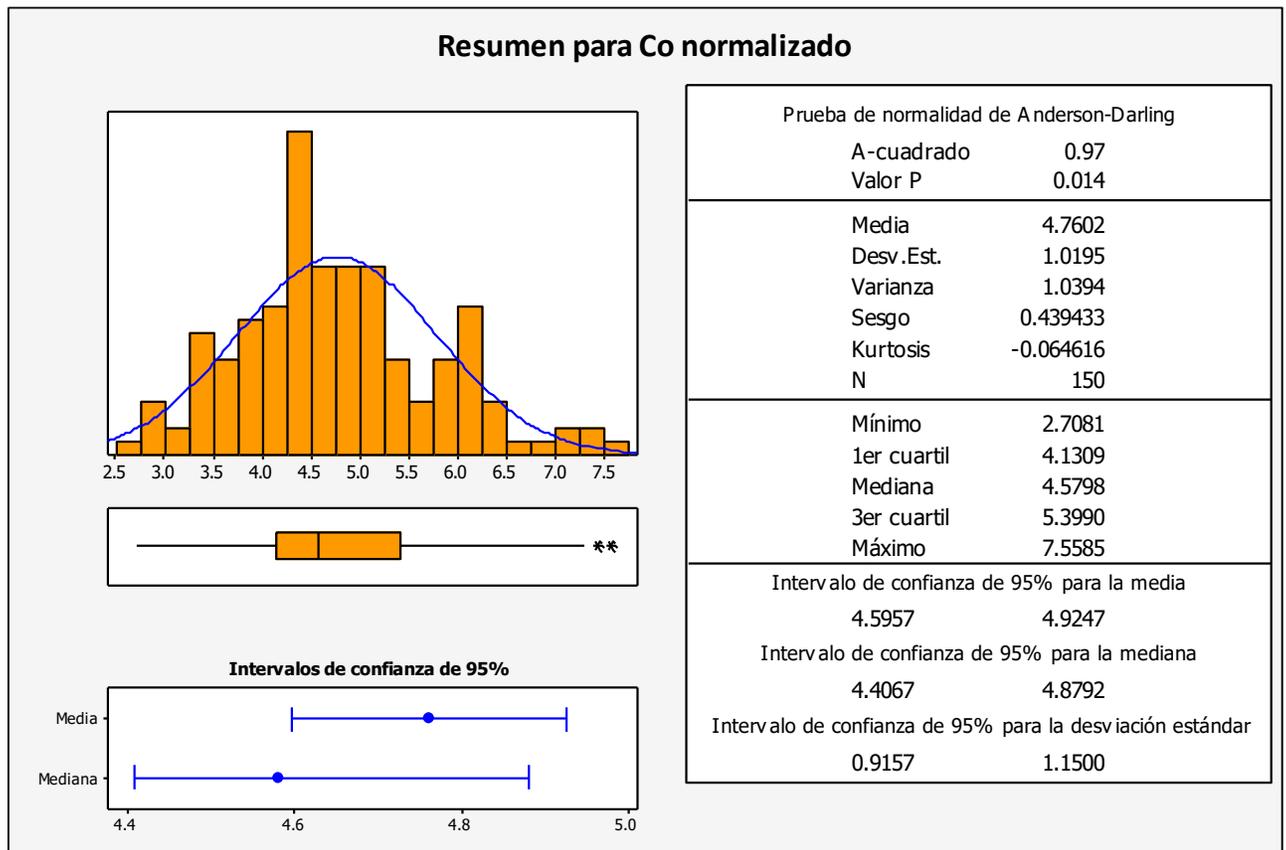


Figura 25 Histograma y datos estadísticos Co.

4.2.1.2 Azufre

Para el estudio del azufre en primer lugar se descartaron 3 valores out-layer sobre los 29 wt. % de S, posteriormente se realizaron los estudios estadísticos y de correlaciones. Para el caso del azufre no seguía una distribución normal, por lo que se ha normalizado para identificar sus parámetros estadísticos y su histograma es mostrado en la tabla 5 y figura 26 respectivamente, Luego transformando los resultados se obtiene que, una media de 1 wt. %, la media aritmética es de 2 wt. % de S. Presenta mediana de 1,2 wt. %. El mínimo es de 0,066 wt. % y el máximo es de 15 wt.%, el primer cuartil (25% de las muestras) está en 0,77 y el tercer cuartil en 2,17

El histograma de la figura 26 indica que se observa una familia de datos, la mayor frecuencia de S entre 9 y 9,5 presentan una concentración entre 0,5 y 1,5wt. %, en concreto el 50% de las muestras se encuentra entre 8,9 y 9,9 (0,7 y 2,1 wt.%). Se distingue una primera familia que presentan una concentración < 2,5 wt. %, luego con menor frecuencia se presenta otra familia de datos entre 2,5 y 4 wt. %.

Tabla 5 Resultados transformados para S

Variable	Media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
S (wt.%)	1,2781	0,0003	0,066	0,777	1,19	2,17	15,39

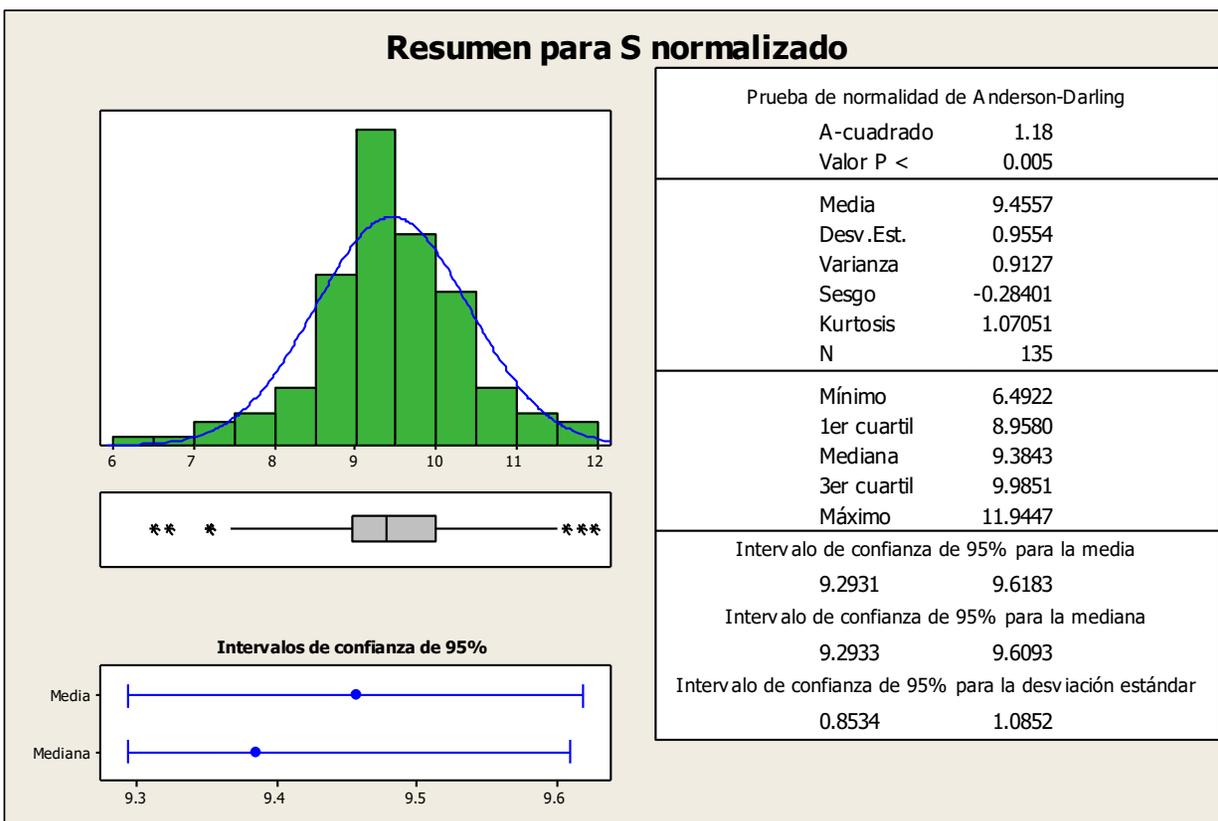


Figura 26: Histograma y datos estadísticos S

A continuación, en la figura 27 A, B, C, D y E se muestran los tramos de sondajes los cuales se realizaron los análisis ICP y se comparan con las leyes de S. se puede apreciar en donde las leyes de azufre son más altas, lo mismo ocurre con las del cobalto.

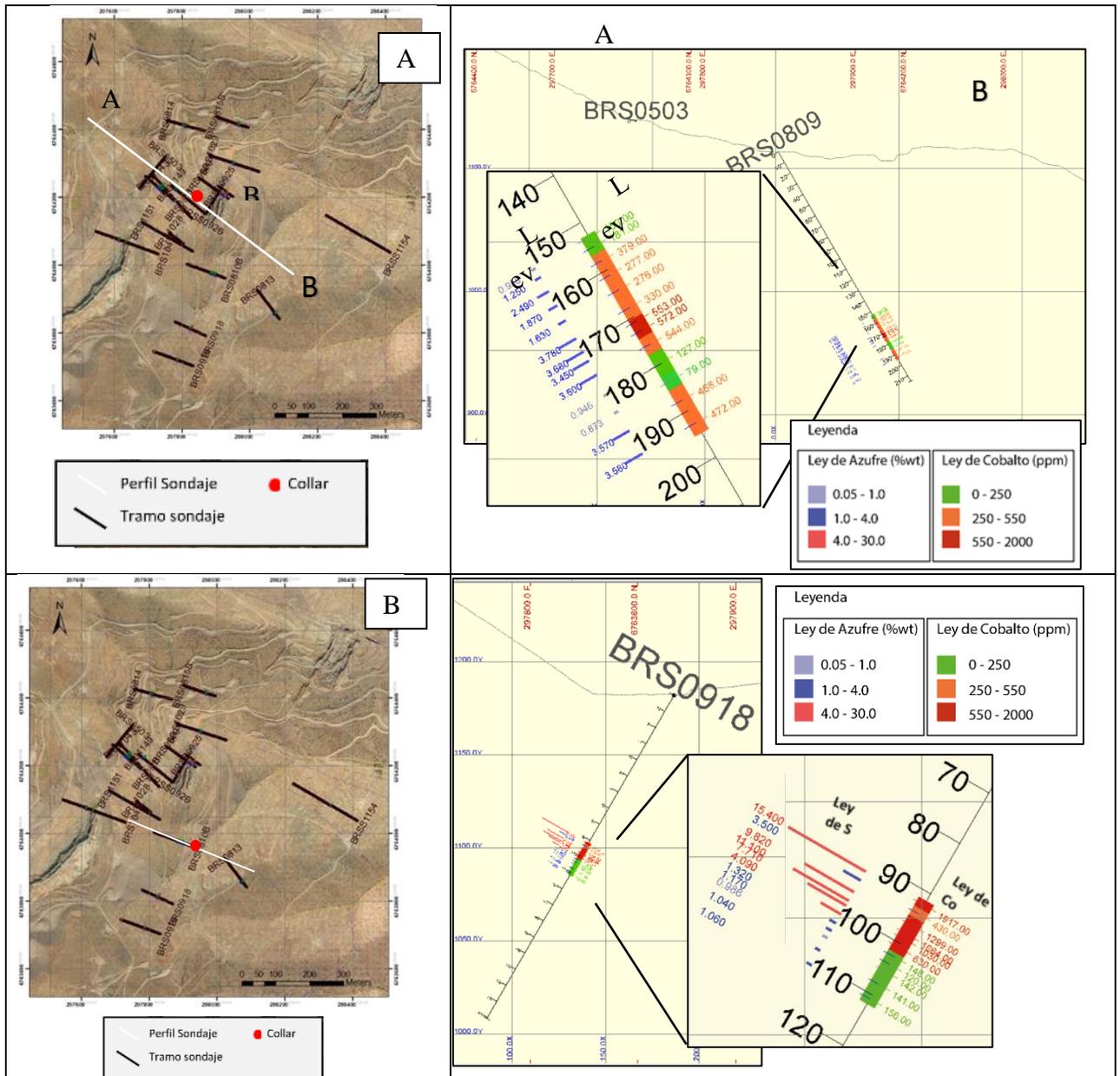
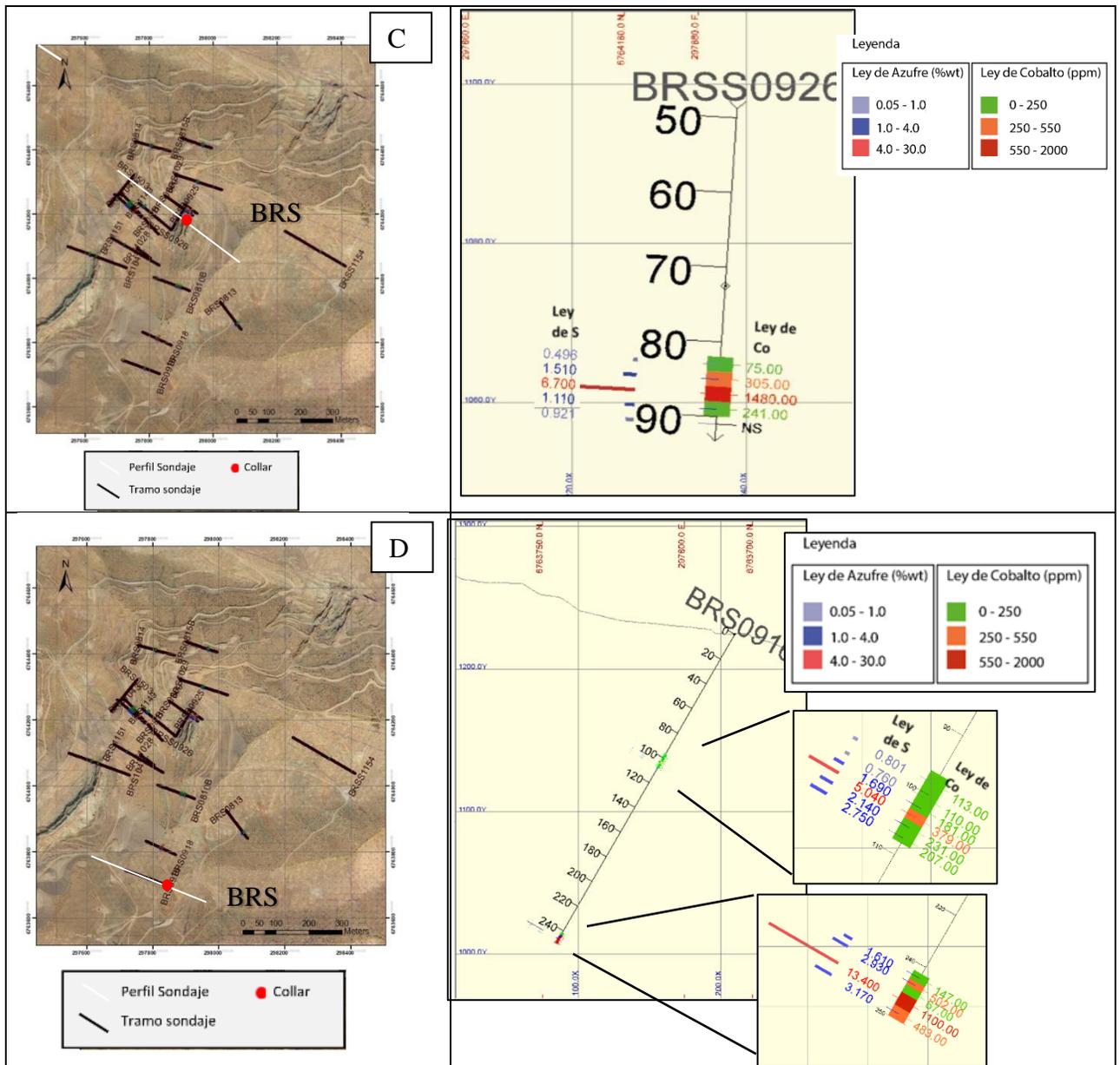
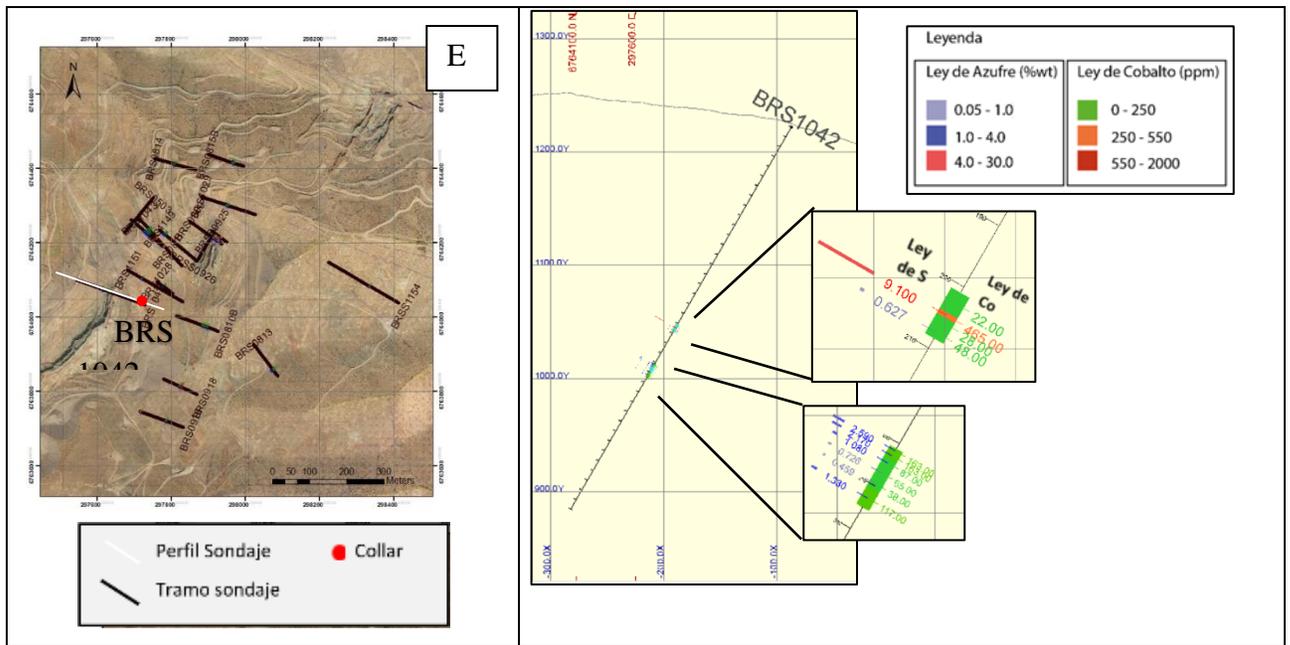


Figura 27 A, B, C, D y E tramos de sondajes de Bronce Sur con despliegue de leyes de S y de Co.



(continuación) Figura 27 A, B, C, D y E tramos de sondajes de Bronce Sur con despliegue de leyes de S y de Co.



(Continuación) Figura 27 A, B, C, D y E tramos de sondajes de Bronce Sur con despliegue de leyes de S y de Co.

4.2.1.3 Elementos trazas

Para este estudio se trabajó con las variables normalizadas para los estudios univariados y variables en base aritmética para los estudios bivariados, Se encontraron variables con más del 50% de las muestras bajo el límite de detección, Estas son: Tl, Cs, In, Nb, Bi, Ta y Be, En esta primera parte serán estudiados los elementos metálicos, luego los elementos mayores y por ultimo las tierras raras, Cabe señalar que no se identificaron muestras outliers de roca en la base de datos de estos elementos.

Se puede apreciar que los valores de las medias de los elementos normalizadas son menores que las aritméticas tras aplicarle la transformación logarítmica, por otro lado, las medianas y cuartiles tienden a mantenerse constante entre uno y otro análisis, En relación con las medidas de dispersión de los datos, la desviación estándar disminuyó en el análisis normalizado.

Se analizaron las medianas, ya que es un estadístico más robusto en comparación con las medias, Del estudio, se puede extraer de las tablas que los elementos metálicos que presentan una mayor concentración son el vanadio (608 ppm), Cu (200ppm), Ba (186ppm), Co (98ppm), Sr (80ppm) y el Zn, As, Ni con 50ppm cada uno. Los elementos que presentan medianas más altas son el Cu, W, Sr, As, Mo y Th y las variables que presentan valores más bajos son Ga, U, Ge y Nb.

Del diagrama de caja figura 28 se extrae que los elementos cuyos valores son más altos son el V, Ba, Co, As, Zr, Ni. En el caso del Pb muestra una gran dispersión, lo mismo pasa con el W y Ag, por otro lado, los elementos con menor dispersión son el Ga, U y Zr. El Ni presenta varios valores extremos. El caso del estudio de los histogramas figura 29 para los elementos con mayor interés económico se puede observar que para el caso del oro hay dos familias de datos, el cobre

presenta una familia, ambos poseen una distribución normal, la mayor cantidad de datos se concentra en la mediana. Para el caso de Ag, Pb, Zn y Mo, se observa que varias muestras arrojaron valores bajo el límite de detección lo cual produce una distorsión del gráfico. El As tiende a tener una mayor cantidad de datos hacia leyes mayores que la mediana, el V tiende a presentar una distribución pareja de sus frecuencias. Por último, el Ni presenta dos familias de datos, la de mayor frecuencia posee menor ley, pero la de menor frecuencia presenta mayor ley.

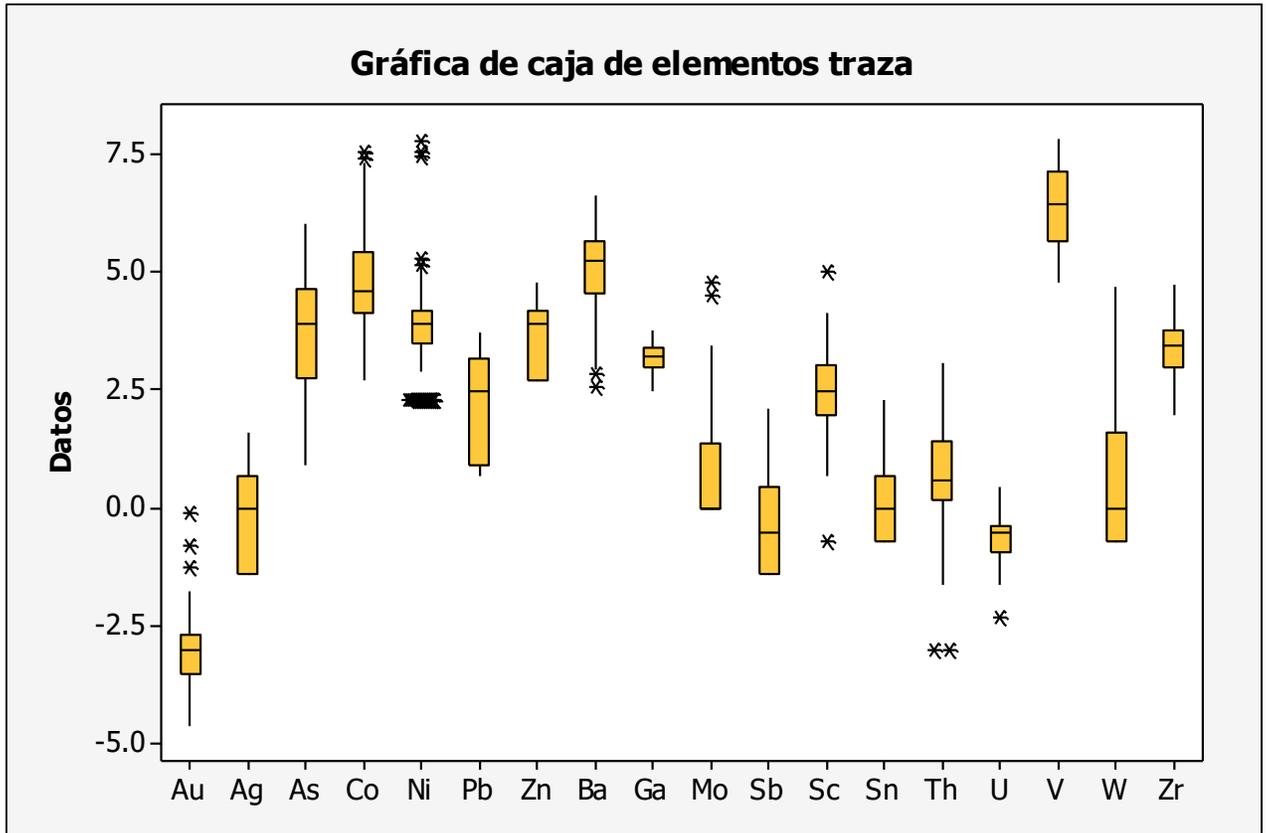


Figura 28: Diagrama de caja de elementos traza

Histograma de elementos traza

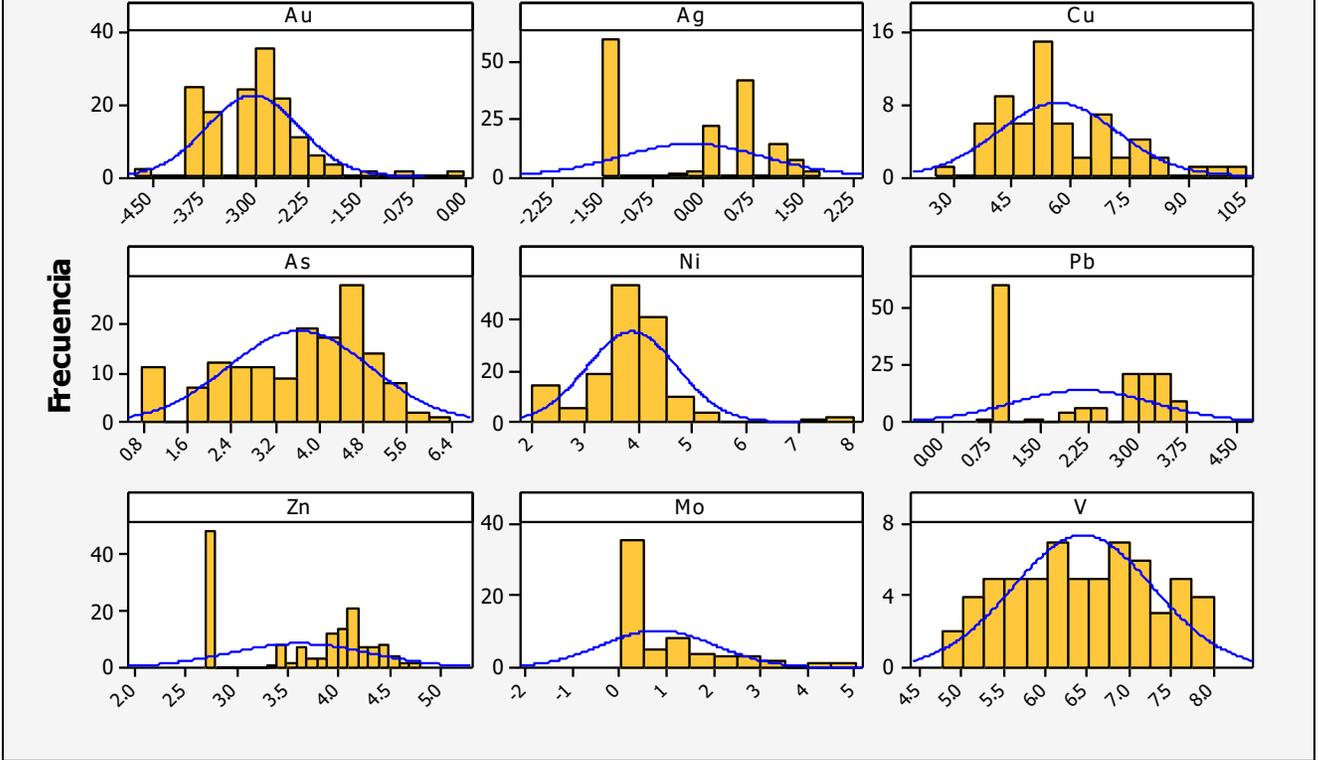


Figura 9: Histogramas elementos traza

Tabla 6 Resumen estadísticos para elementos traza normalizados.

Variable	Media	Media del error estándar	Desv,Est,	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Ag	0,84	1,09	2,88	0,25	0,25	1,00	2,00	5,00
As	38,55	1,11	3,62	2,50	15,74	50,00	102,21	414,06
Co	116,77	1,09	2,77	15,00	62,23	97,49	221,19	1916,97
Ni	47,55	1,07	2,32	10,00	33,00	50,00	63,74	2309,99
Pb	8,44	1,09	2,95	2,00	2,50	12,00	24,00	42,00
Zn	37,46	1,06	2,00	15,00	15,00	50,00	66,00	120,00
Ba	151,26	1,13	2,69	13,00	93,97	186,05	284,01	747,70
Cu	280,62	1,21	4,63	20,01	90,02	199,94	779,77	22994,26
Ga	24,60	1,04	1,36	12,00	20,00	25,00	30,00	43,00
Ge	1,14	1,06	1,62	0,50	1,00	1,00	2,00	3,00
Hf	0,66	1,11	2,36	0,10	0,50	0,80	1,20	2,70
Mo	2,25	1,16	3,32	1,00	1,00	1,00	4,00	119,94
Nb	0,57	1,07	1,74	0,50	0,50	0,50	0,50	15,00

Rb	11,43	1,15	2,98	1,00	9,00	15,00	26,00	49,01
Sb	0,62	1,13	2,56	0,25	0,25	0,60	1,60	8,20
Sn	1,08	1,09	2,05	0,50	0,50	1,00	2,00	10,00
Sr	67,02	1,19	3,98	3,00	24,00	80,96	215,94	557,80
Th	1,94	1,16	3,15	0,05	1,20	1,80	4,10	21,09
U	0,55	1,06	1,61	0,10	0,40	0,60	0,70	1,60
V	622,66	1,11	2,33	118,99	286,86	607,89	1231,51	2450,38
W	1,91	1,20	4,34	0,50	0,50	1,00	5,00	107,99
Zr	28,95	1,07	1,75	7,00	20,00	31,00	43,00	114,00

(Continuación) Tabla 6 Resumen estadísticos para elemetablantos traza normalizados

Luego, se ha comparado los valores obtenidos con respecto a los contenidos de los elementos de la corteza, esta información fue extraída de Mason (1959) el cual está basado en el estudio de composiciones de rocas ígneas realizado por Clarke y Washington (1924), basado en el análisis de varias muestras, varios tipos de rocas para esto se dividió los valores de las medianas con respecto a los valores promedio de elementos de la corteza (Mason, 1959), En la figura 30 se destaca que los valores mayores a la unidad, por lo tanto, los que están enriquecidos son Ag, As, Co, Cu, Ga y V.



Figura 30 Diagrama de elementos normalizados a valores de la corteza

4.2.1.4 Comportamiento elementos traza c/r al Fe.

Como el hierro es el elemento más abundante en el yacimiento se ha realizado un estudio en donde se han separado distintos rangos de leyes de Fe para ver las concentraciones de los distintos elementos trazas. Se separaron las leyes de hierro según como se trabaja en la explotación en la mina, <18% Fe es asociado con material estéril, 18-30% Fe es asignado al material de baja ley de hierro de textura diseminado, 30-45% Fe material más brechoso de mayor ley, por último >45% material de alta ley que puede ser brechoso o masivo (Yañez, 2015).

De este análisis de las medianas de la tabla 7 se puede extraer que el Co, se concentra predominantemente en el Fe de alta ley. Para el caso de los otros metales se puede ver que el Au, está en el Fe de baja ley, al igual que el As, Cu, Ba y Zn. El Ag tiende a ser constante y no depende mucho de la ley de Fe, el Ni y Pb tienen mayor concentración en el Fe entre 30-45%, Por último, el Sr esta preferentemente en la baja ley.

Tabla 7 Concentración de elementos traza según ley de Fe.

Ley Fe	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	V (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	Zn (ppm)
<18%	0,05	0,25	20	37	210	20	2,5	331,5	305,5	179,5	36
18-30%	0,06	2	78	111,5	250	41,5	18	441	131	222	58,5
30-45%	0,05	2	56	117	190	59	20	994	99	186	54
>45%	0,03	0,25	15	229,5	160	66	2,5	1507	17	115	15

4.2.1.4 Elementos mayores

Para el trabajo con los elementos mayores, estos están normalizados y medidos en % en peso, se muestran en la tabla 8 y en el gráfico de caja (Figura 31), Con respecto a las medias el valor más alto es el Fe₂O₃ (41,96 wt, %), seguido por SiO₂ (24,55%), Al₂O₃ (6,54%) y MgO (3,48%) y CaO (3,06). Asimismo, las medianas tienen el mismo orden de abundancia, siendo más alto para el Fe₂O₃ con 49,83 y el SiO₂ con 28,18 wt, %. Por otro lado, la variable que presenta mayor desviación estándar es P₂O₅ con 5,77. Los histogramas de la figura 32 muestra que los resultados tienden a estar sobre la media.

Tabla 8 Resumen estadístico elementos mayores.

Variable	Media wt, %	Media del error estándar	Desv,Est	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
SiO ₂	24,55	1,08	1,79	5,36	16,24	28,18	40,47	59,36
Al ₂ O ₃	6,54	1,10	2,20	1,02	3,90	8,93	12,62	17,95
Fe ₂ O ₃	41,96	1,08	1,79	7,86	28,18	49,83	70,01	88,91
MgO	3,48	1,07	1,71	0,52	2,56	4,00	4,95	11,17
MnO	0,11	1,05	1,44	0,03	0,09	0,11	0,14	0,19
CaO	3,06	1,10	2,18	0,21	1,93	3,63	5,53	10,33
TiO ₂	0,35	1,09	2,04	0,03	0,30	0,37	0,49	1,47
Na ₂ O	0,96	1,19	3,92	0,02	0,36	1,61	3,27	5,01
K ₂ O	0,77	1,12	2,50	0,07	0,51	1,00	1,43	3,31
P ₂ O ₅	0,07	1,25	5,77	0,00	0,01	0,12	0,26	3,70

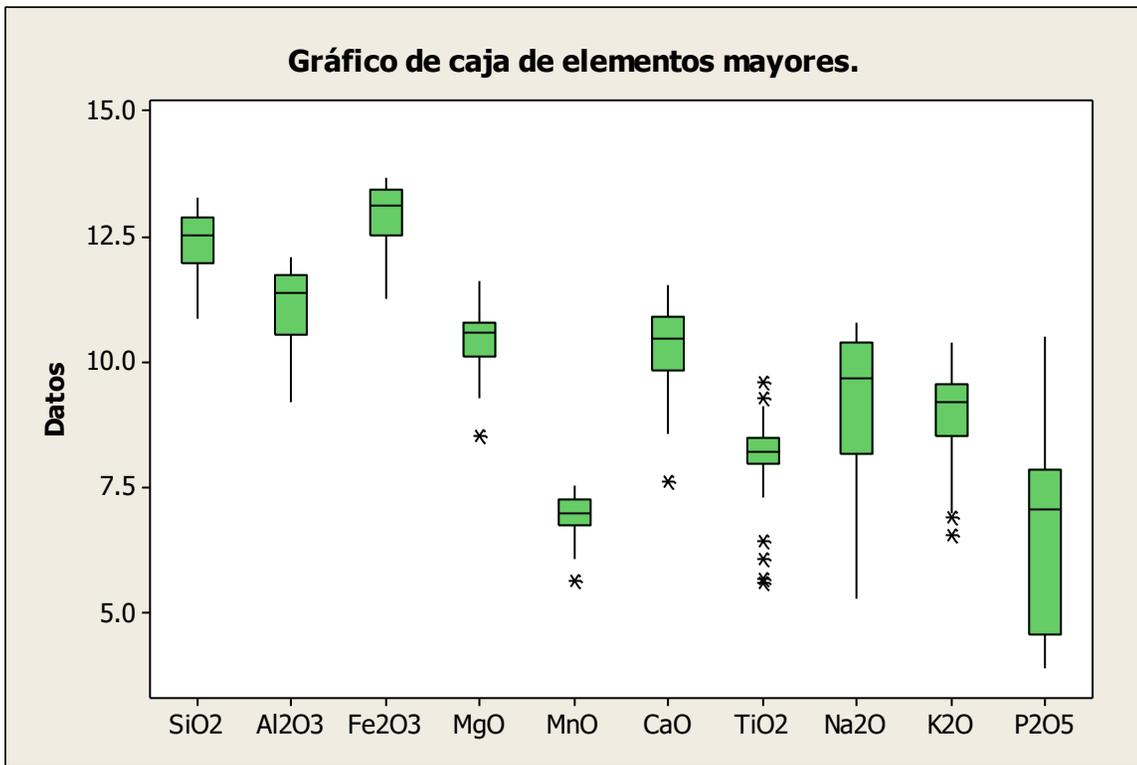


Figura 31: Gráfico de caja elementos mayores

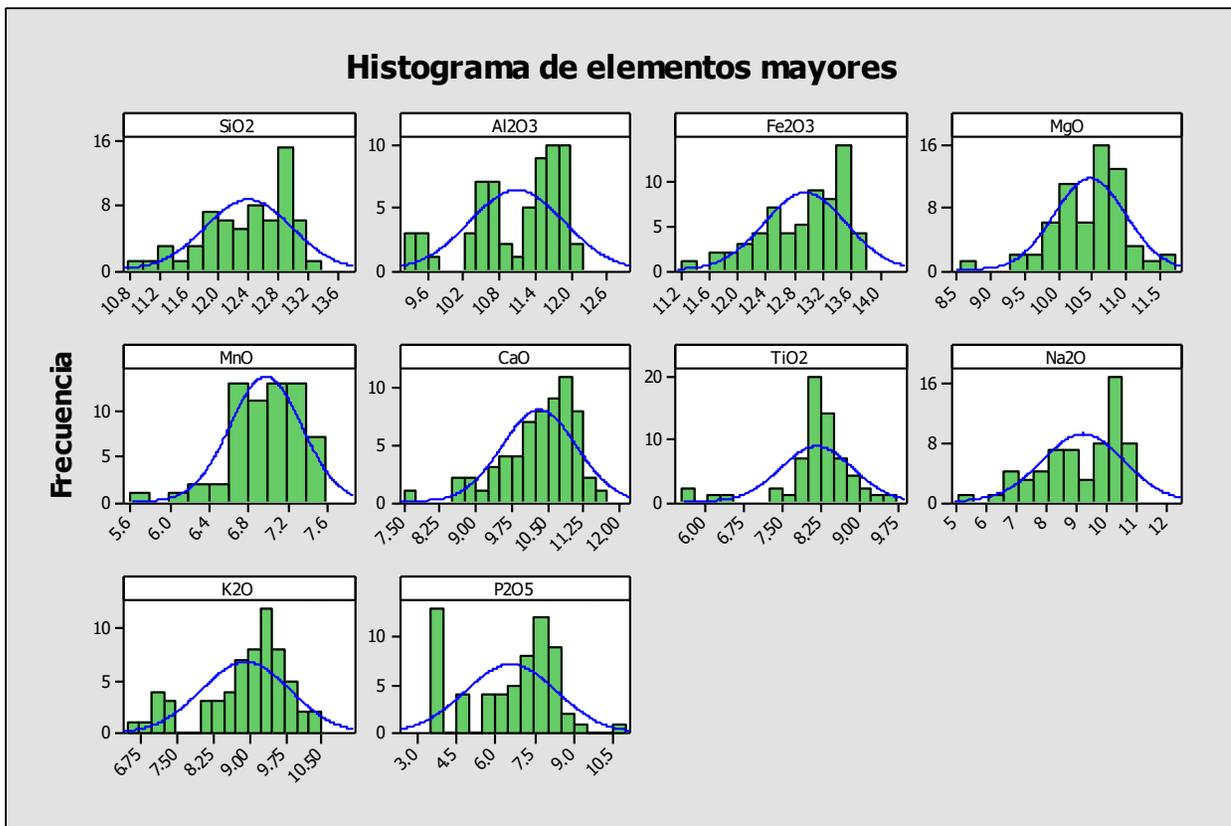


Figura 32: Histograma de elementos mayores

4.2.1.5 Tierras raras

Con respecto a las tierras raras se ha procedido a hacer un análisis similar que para los elementos mayores y elementos trazas, Los resultados se presentan en la tabla 9 y figura 33.

Estudiando las medianas, los elementos que presentan valores más altos son Y (15ppm), Ce (12ppm), Sc (12ppm) y Nd (8ppm). En general, se observa en la figura 33 que las muestras están enriquecidas en tierras raras livianas (LREE). Todas están muy correlacionadas ($r > 0,9$). El estudio de histogramas (figura 34) permite observar que las muestras presentan en general valores que tienden a aproximarse a la media, por lo tanto, no tienen tanta dispersión de los datos.

Tabla 9 Resumen estadístico tierras raras.

Variable	Media	Media del error estándar	Desv,Est,	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Sc	11,72	1,12	2,40	0,50	7,00	12,00	21,01	146,94
Y	12,96	1,11	2,33	1,00	11,00	15,00	20,01	43,99
La	5,30	1,13	2,68	0,20	2,90	5,20	9,90	62,49
Ce	12,10	1,11	2,30	0,70	8,10	12,10	20,01	83,18
Pr	1,68	1,10	2,19	0,08	1,22	1,76	2,77	7,36
Nd	7,71	1,10	2,07	0,50	5,80	8,10	12,30	27,50
Sm	02,14	1,10	2,13	0,10	1,60	2,30	3,60	7,80
Eu	0,52	1,09	2,00	0,05	0,39	0,57	0,85	1,58
Gd	2,46	1,09	2,05	0,20	1,90	2,60	4,00	7,90
Tb	0,43	1,10	2,09	0,05	0,30	0,50	0,70	1,30
Dy	2,68	1,10	2,15	0,20	2,20	2,90	4,20	7,90
Ho	0,54	1,10	2,20	0,05	0,50	0,60	0,90	1,60
Er	1,61	1,10	2,17	0,10	1,30	1,80	2,60	4,90
Tm	0,24	1,10	2,11	0,02	0,20	0,27	0,38	0,76
Yb	1,55	1,11	2,29	0,05	1,30	1,80	2,50	5,10
Lu	0,24	1,11	2,23	0,02	0,21	0,28	0,37	0,79

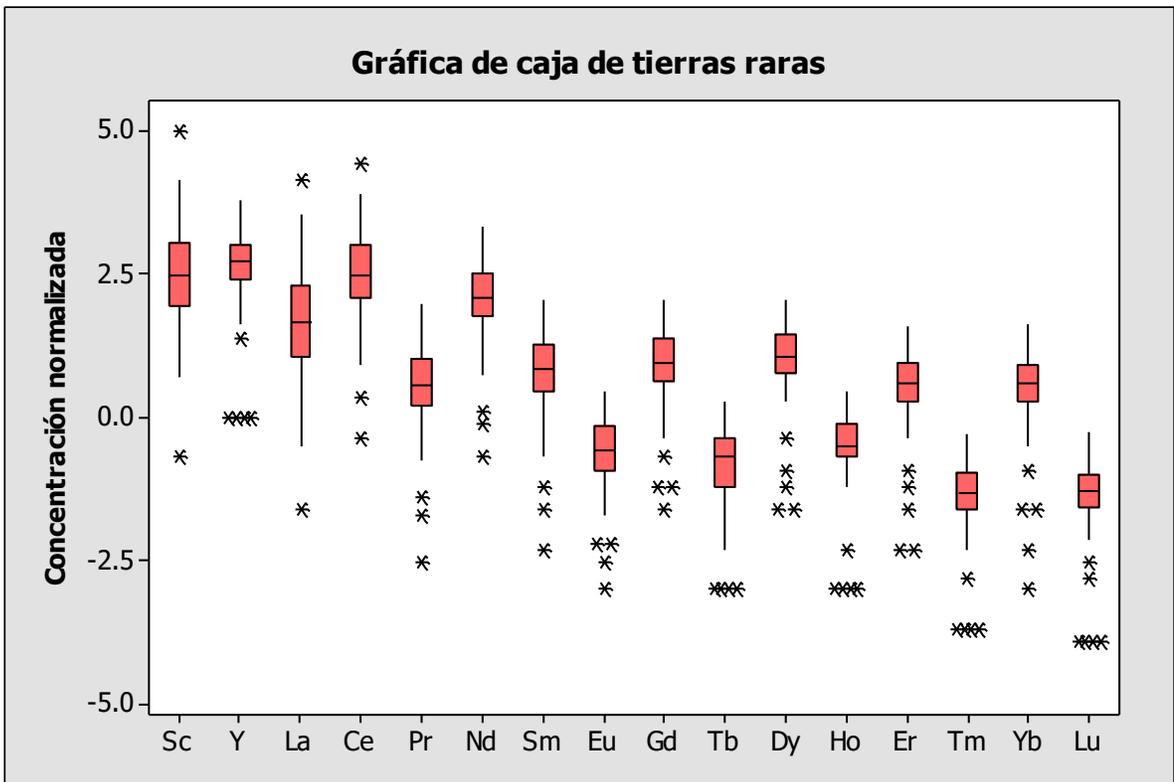


Figura 33: Gráfico de caja de tierras raras.

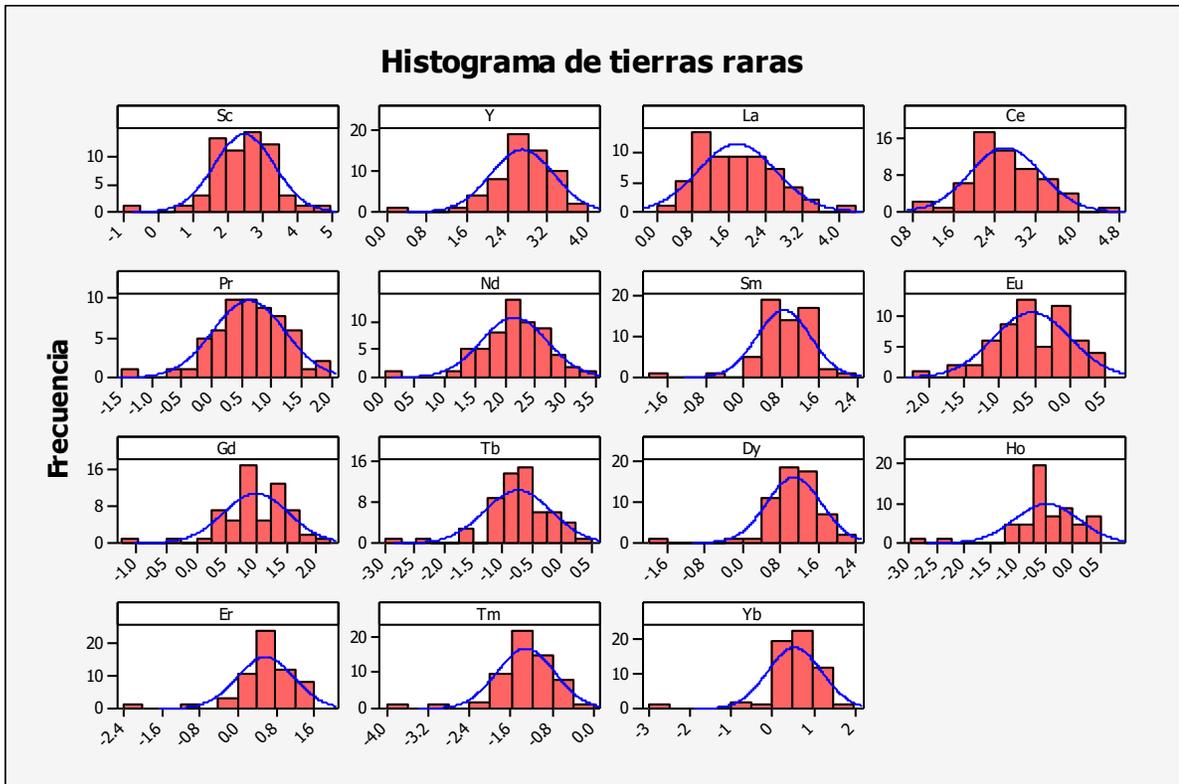


Figura 34: Histogramas tierras raras

4.2.2 Análisis multivariable

El análisis multivariable consiste en un conjunto de métodos estadísticos que permiten el análisis simultáneo de dos o más variables con el objetivo de identificar patrones y relaciones entre estas. Para evaluar las relaciones que existen entre las variables presentes en la base de datos se realizó estudios de distribución y análisis de componentes principales. Las variables utilizadas fueron obtenidas de los análisis ICP de roca total están en base aritmética.

4.2.2.1 Matriz de correlación de Pearson

Es un método de estimación del grado de asociación lineal entre dos variables. El coeficiente de correlación de Pearson tiene un rango de valores que va de -1 a +1, donde los valores positivos indican una relación directa y los valores negativos indican una relación inversa entre las variables. Un valor igual a 0 refleja que no existe relación lineal entre las variables. Como regla general, se acepta que valores superiores a $|0,5|$ indican una asociación significativa, ya sea directa o inversa, entre dos variables. Tomando en consideración esto, se ha determinado que valores entre $|0,5|$ y $|0,7|$ indican buena correlación, entre $|0,7|$ y $|0,9|$ indican muy buena correlación y valores sobre $|0,9|$ indican una correlación lineal excelente.

En este estudio, se debe conocer la relación de la concentración de Co con respecto a las concentraciones de otros elementos de interés en el depósito. Para esto se realizaron correlaciones con elementos paragenéticos al cobalto como es el caso del Fe, Cu, Ni, Pb, Ag, Au, As.

En primer lugar, se analiza la correlación que tiene con el Hierro debido a que el depósito posee grandes concentraciones de Fe y la textura de la roca está relacionada a este elemento. La correlación entre Co y As se estudia en función de posibles minerales que contienen ambos (ej.: arsenopirita cobaltífera, Safflorita, Skutterudita). Se estudia la correlación con el níquel debido a que ambos poseen características comunes y el cobre por existir minerales de cobre cobalto y porque la mineralización de este último está ligada al Cu.

4.2.2.1.1 Correlación entre cobalto y azufre

Se observa en la figura 35 que el cobalto y el azufre poseen una correlación positiva, lo cual indica que a mayores leyes de Co se tendrán leyes mayores de S. Esto puede insinuar una ocurrencia en común entre el azufre y el cobalto dado que su error cuadrático es de 0,8327, además se aprecia que las muestras tienen mayor cercanía de los puntos en la parte baja de la gráfica, en la cual están más correlacionados, en cambio en la parte alta de la gráfica los datos presentan mayor dispersión, también se observa que hay la mayor proporción de muestras se encuentra entre los 100 y 500 ppm de cobalto y entre 1 y 4 %wf de azufre. El Co y el azufre muestran una anomalía positiva con respecto a los valores de la corteza.

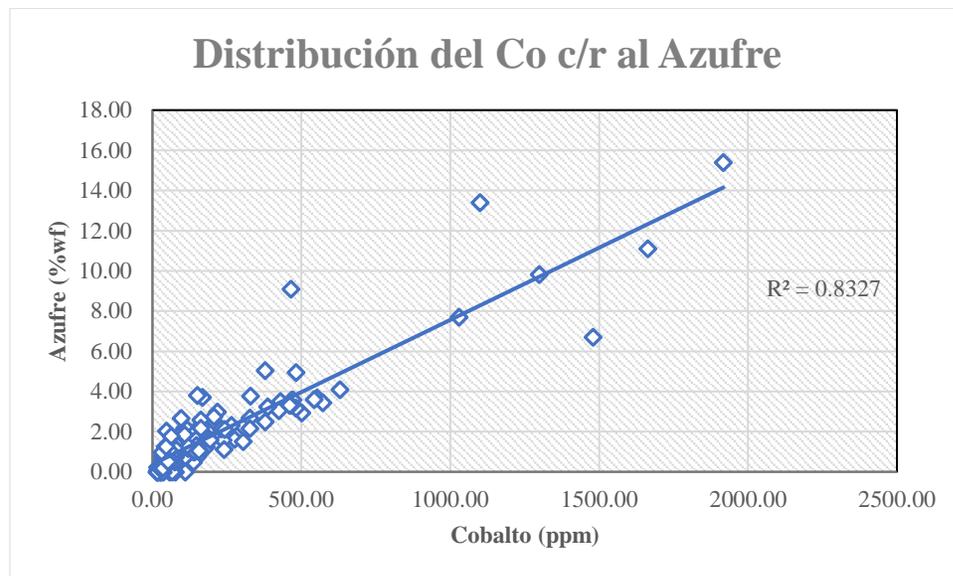


Figura 35: Gráfico dispersión Co v/s S,

4.2.2.1.2 Correlación con elementos metálicos

La correlación entre el Co y otros elementos traza con interés económico presentan valores bajos ($r < 0,5$) (Tabla 10), el metal que presenta la mayor correlación con el Co es el Ni (0,2). El cobalto comparado con otros metales trazas con importancia económica presentan una mala correlación por lo tanto, no presenta una relación clara con estos elementos para este estudio, Pero entre los otros metales, los presentan una buena correlación son el Zinc con el plomo ($r = 0,67$) y la plata con el plomo ($r = 0,61$) y Zinc y plata ($r = 0,55$),

Tabla 10 Tabla correlación metales trazas,

	Co	Ni	Pb	Zn	As	Au (ppb)	Ag
Co	1						
Ni	0,20	1					
Pb	0,04	-0,10	1				
Zn	-0,06	-0,14	0,67	1			
As	-0,12	0,04	0,42	0,46	1		
Au (ppb)	-0,09	0,02	0,08	-0,07	-0,13	1	
Ag	0,15	-0,05	0,61	0,55	0,34	-0,08	1

Del análisis de los gráficos de dispersión (figura 36) se puede extraer que el níquel es la variable que muestra una mayor correlación positiva con el Co, en cambio el bario es el que muestra mayor correlación negativa con el Co.

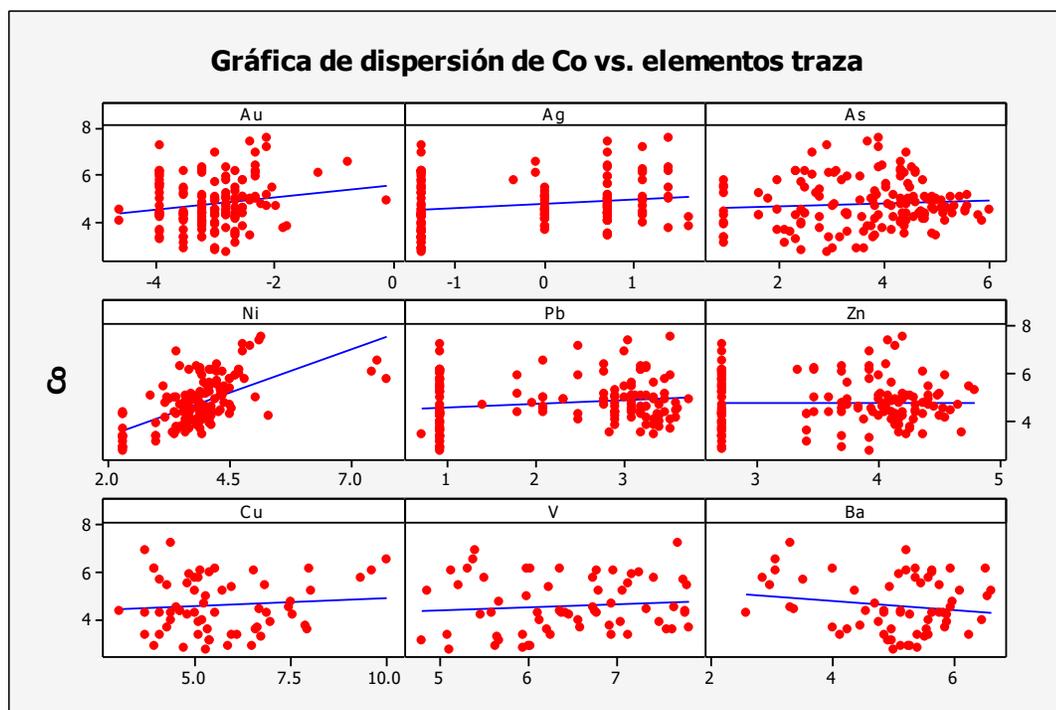


Figura 36: Gráfico de dispersión de elementos traza

4.2.2.1.3 Elementos mayores y correlación con cobalto

La tabla 11 y figura 37 muestran la correlación de los elementos mayores, estos presentan en general una buena correlación negativa con el cobalto, SiO₂ (-0,55), Al₂O₃ (-0,53) y Na₂O (-0,53). El cobalto y el P₂O₅ no presentan una correlación ($r=0,06$) siendo casi independientes estas variables. Analizando los elementos mayores entre ellos, se ha observado que el SiO₂ presenta una buena correlación con MgO, MnO, una muy buena correlación con CaO y Na₂O y una correlación excelente con Al₂O₃. Otra correlación que destaca es entre Al₂O₃ y Na₂O ($r=0,91$), una relación negativa con el Fe₂O₃ (-0,89).

Tabla 11 Correlación R de Pearson entre Co v/s elementos mayores,

	Co	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Co	1,00										
SiO ₂	-0,55	1,00									
Al ₂ O ₃	-0,53	0,90	1,00								
Fe ₂ O ₃	0,48	-0,96	-0,89	1,00							
MgO	-0,40	0,61	0,33	-0,60	1,00						
MnO	-0,44	0,66	0,65	-0,65	0,63	1,00					
CaO	-0,49	0,78	0,64	-0,78	0,74	0,64	1,00				
TiO ₂	-0,29	0,31	0,26	-0,29	0,48	0,45	0,56	1,00			
Na ₂ O	-0,53	0,87	0,91	-0,84	0,24	0,51	0,64	0,14	1,00		
K ₂ O	-0,11	0,39	0,42	-0,36	0,18	0,21	0,00	0,11	0,14	1,00	
P ₂ O ₅	0,06	-0,14	-0,13	0,07	-0,06	-0,12	0,15	0,00	-0,07	-0,13	1,00

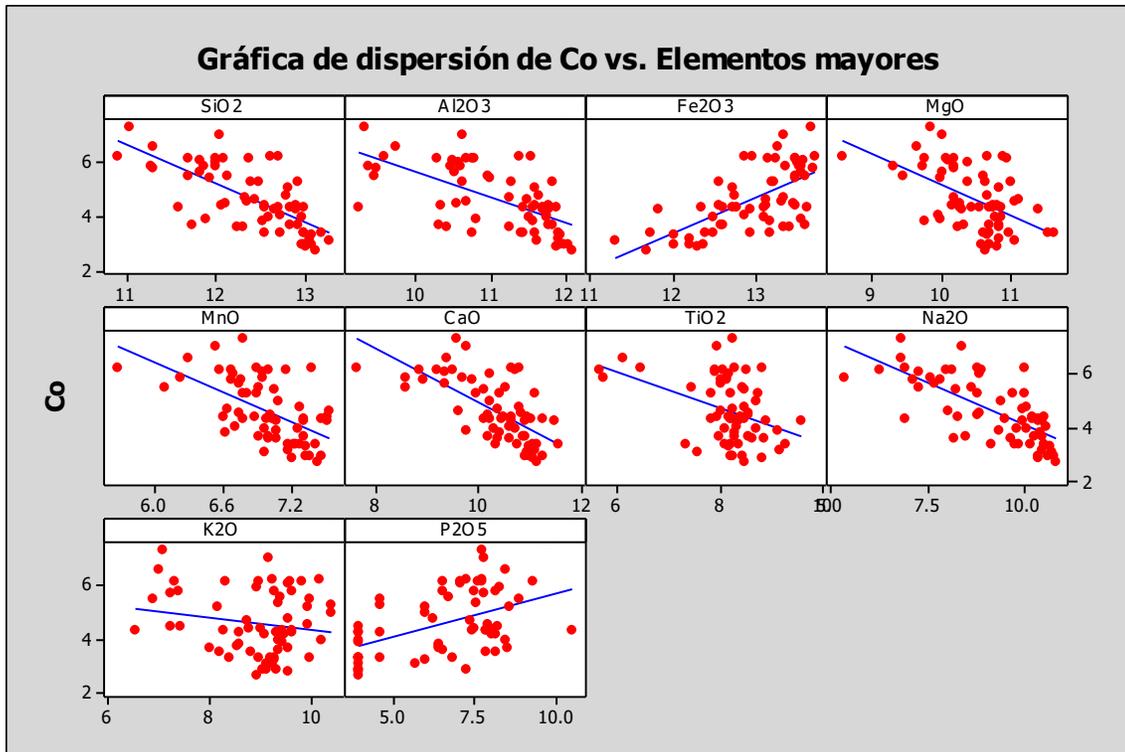


Figura 37: gráfico de dispersión elementos mayores

4.2.2.1.4 Tierras raras

Con respecto al comportamiento de las tierras raras (REE) se puede extraer de la tabla 12 que las pesadas (HREE) presentan una correlación lineal excelente ($R > 0,96$) entre ellas, entre las tierras raras livianas (LREE) presentan una buena correlación lineal entre ellas. Con respecto al cobalto, según el gráfico 38 se puede observar que el cobalto presenta una correlación negativa en general con las tierras raras.

Tabla 12: Correlación tierras raras v/s cobalto

Correl...	Co	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Co	1	-0.3	-0.44	-0.12	-0.19	-0.29	-0.36	-0.42	-0.41	-0.43	-0.43	-0.43	-0.42	-0.43	-0.44	-0.45
Sc	-0.3	1	0.64	0.25	0.3	0.37	0.41	0.48	0.46	0.58	0.59	0.62	0.61	0.62	0.64	0.65
Y	-0.44	0.64	1	0.28	0.42	0.59	0.73	0.9	0.75	0.96	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
La	-0.12	0.25	0.28	1	0.97	0.86	0.74	0.46	0.37	0.38	0.33	0.31	0.28	0.28	0.27	0.24
Ce	-0.19	0.3	0.42	0.97	1	0.96	0.87	0.63	0.54	0.54	0.48	0.45	0.42	0.41	0.4	0.37
Pr	-0.29	0.37	0.59	0.86	0.96	1	0.97	0.81	0.71	0.72	0.66	0.64	0.6	0.59	0.58	0.54
Nd	-0.36	0.41	0.73	0.74	0.87	0.97	1	0.92	0.8	0.84	0.79	0.77	0.73	0.72	0.71	0.68
Sm	-0.42	0.48	0.9	0.46	0.63	0.81	0.92	1	0.85	0.97	0.94	0.93	0.91	0.9	0.89	0.87
Eu	-0.41	0.46	0.75	0.37	0.54	0.71	0.8	0.85	1	0.83	0.81	0.8	0.77	0.76	0.75	0.73
Gd	-0.43	0.58	0.96	0.38	0.54	0.72	0.84	0.97	0.83	1	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94
Tb	-0.43	0.59	0.97	0.33	0.48	0.66	0.79	0.94	0.81	0.98	1	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96
Dy	-0.43	0.62	0.99	0.31	0.45	0.64	0.77	0.93	0.8	0.98	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.98
Ho	-0.42	0.61	0.99	0.28	0.42	0.6	0.73	0.91	0.77	0.97	0.98	0.99	1	0.99	0.99	0.98
Er	-0.43	0.62	0.99	0.28	0.41	0.59	0.72	0.9	0.76	0.96	0.97	0.99	0.99	1	1	0.99
Tm	-0.44	0.64	0.98	0.27	0.4	0.58	0.71	0.89	0.75	0.95	0.97	0.99	0.99	1	1	1
Yb	-0.45	0.65	0.98	0.24	0.37	0.54	0.68	0.87	0.73	0.94	0.96	0.98	0.98	0.99	1	1

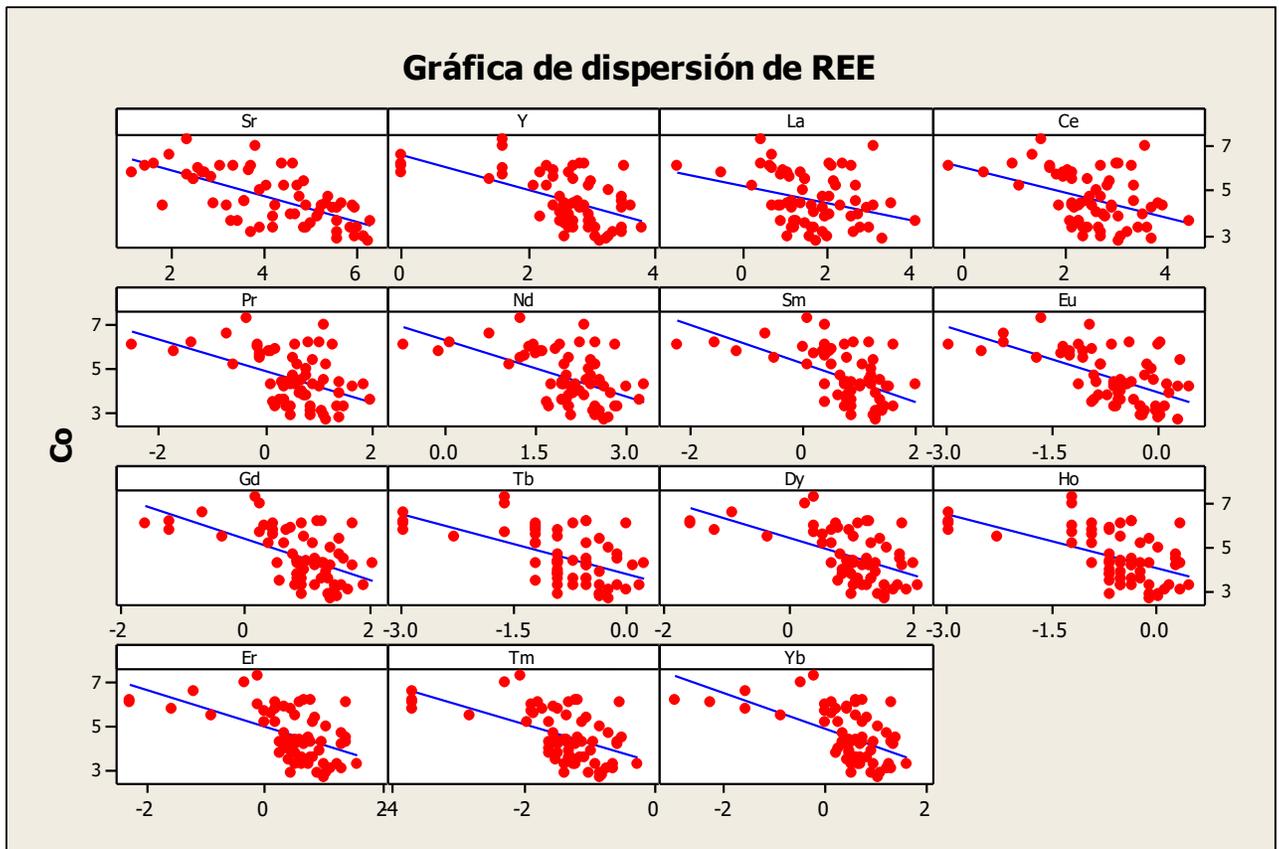


Figura 38: gráfico de dispersión para tierras raras

4.2.2.2 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Es utilizada para describir un conjunto de datos en términos de nuevas variables ("componentes") no correlacionadas. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo tanto, la técnica en este caso nos permite comparar todos los elementos con los cuales se ha trabajado. Para este análisis se han utilizado los resultados de análisis de roca total ICP/MS en base aritmética en el programa ioGAS.

En primer lugar, es necesario hasta la séptima componente principal para explicar el 80% de la varianza, además sus valores propios están sobre 1 (tabla 13 y figura 39), pero por conveniencia de este trabajo se han utilizado los tres primeros componentes principales ya que explican casi el 70% de la varianza y es un número más manejable.

De la intersección entre la primera componente principal (PC1) y la segunda (PC2), con un 51% de la información, se asocian dos grupos de variables, un grupo están más relacionadas son Dy, Tb, Tm, Ho, Gd, Y, Er, Lu, Yb, Sm y Eu, las cuales correspondientes a tierras raras. De los círculos de correlación de la figura 40 también se puede desprender que el As, S, Au Ag están relacionadas y se asocian al CP1, al igual que entre el Fe, V y el Ga. De la segunda componente principal (CP2) se extrae que las variables que están más relacionadas con el S, Ag, Cu, Ni, As y Au y las que

presentan una mayor relación negativa con estas son el V y Ga. La CP3 entrega como resultado que las variables Rb, K₂O, Ba, Al₂O₃, Zr, Sr, Na₂O, Hf y SiO₂ están correlacionadas, Por último, de CP4 se asocia con las variables Sr, Cao, Y, Sc.

Con respecto al cobalto, es posible identificar que en PC1 tiene una relación negativa, esto quiere decir que cuando CP1 aumenta el Co disminuye. También se observa que está relacionado con el Fe₂O₃, por lo cual estos dos elementos estarían relacionados.

Tabla 13: Tabla valores propios.

	Valores propios	Porcentaje	% acumulado
PC1	20,75	39,9	39,9
PC2	6,213	11,95	51,85
PC3	5,299	10,19	62,04
PC4	3,486	6,704	68,74
PC5	2,56	4,923	73,66
PC6	1,782	3,427	77,09
PC7	1,673	3,218	80,31

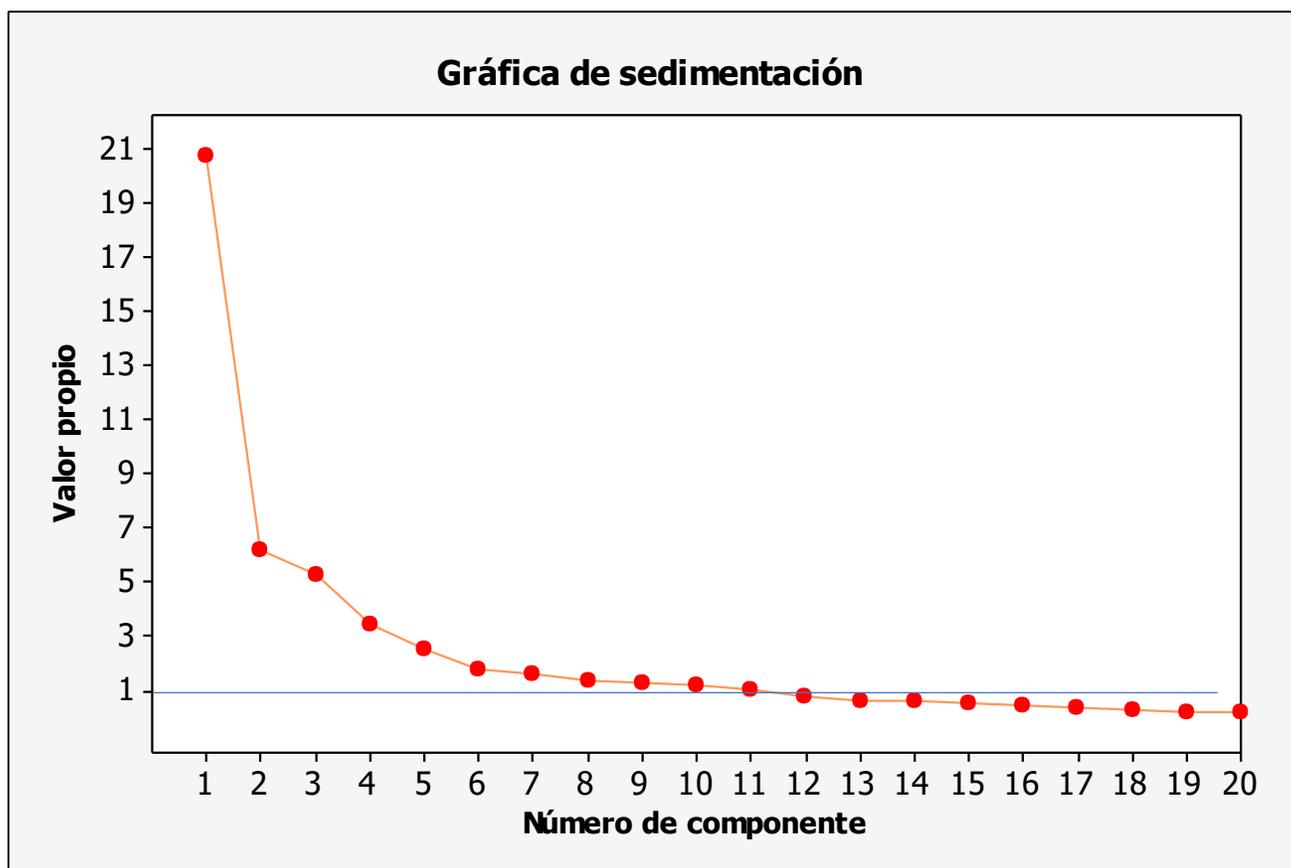


Figura 39: gráfico de sedimentación

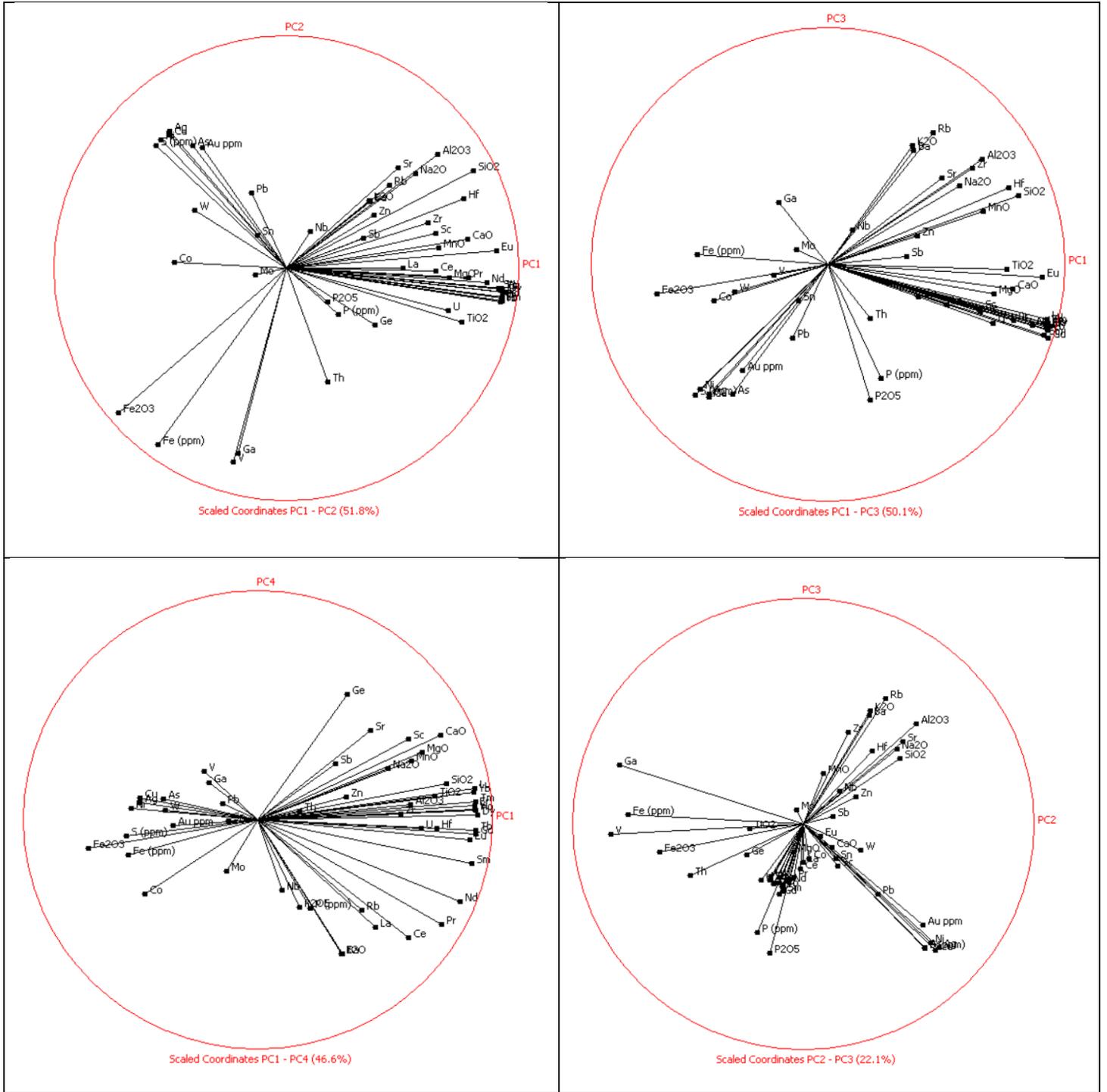


Figura 40: Círculos de correlación

4.3 Qemscan

Se realizó el análisis semicuantitativo Qemscan con el objetivo de ir cerrando posibilidades con respecto a minerales presentes en las muestras que sean portadores de cobalto y descartar la presencia de minerales de cobalto (cobaltita, asbolana, heterogenita, etc). Para ello, se estudió un corte transparente/pulido de la muestra 266359, la cual se reconocía la presencia de pirita y según análisis ICP indican una concentración de cobalto de 1664 ppm. Fue utilizada La lista Secundaria Condensada (SIP) (figura 41), software de interpretación y análisis de datos, la cual agrupa algunas especies minerales y resalta las fases relevantes para el estudio.

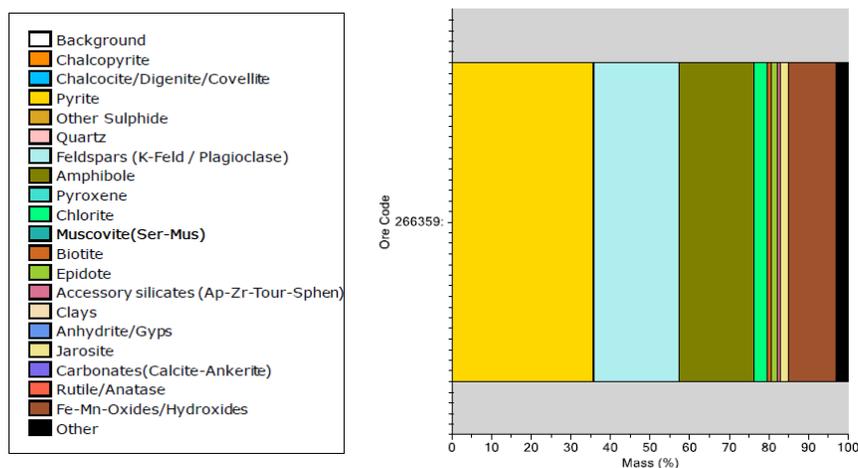


Figura 41 Lista secundaria condensada a la izquierda, recuento modal a la derecha.

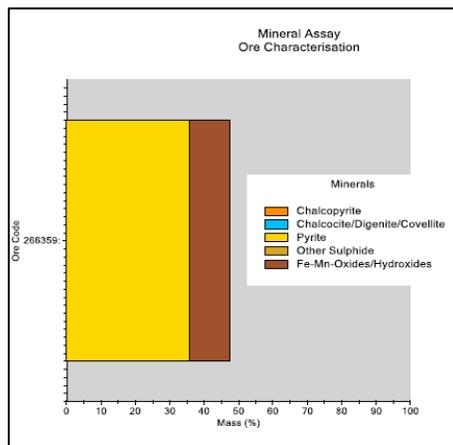
Los principales minerales de mena y ganga medidos son indicados en el recuento modal, expresados en porcentaje en peso (Tabla 14). En el destaca que la fase mineral más abundante en el corte es la pirita con un 35,64% en peso, seguida por el feldespato potásico (21,58%) y los anfíboles (18,86%) parcialmente alteradas a clorita, epidota y carbonatos. No se observan fases minerales de cobalto. Con respecto al tamaño de grano, la pirita es la que presenta un mayor tamaño con 289,2 μm , seguida por feldespato K (87,3 μm), silicatos (86,7 μm) y óxidos de hierro 78,6 μm).

Tabla 14 Porcentaje en peso y tamaño de la mineralogía de mena y ganga muestra 266359

Mineral/Sample	Porcentaje en eso (wt.%)	Tamaño (µm)
Calcopirita	0,01	21,2
Calcosina/Digenita/Covellina	0,00	15,8
Pirita	35,64	289,2
Otros Sulfuros	0,00	14,8
Cuarzo	0,11	21,3
Feldespatos (K-Feld / Plagioclasa)	21,58	87,3
Anfibola	18,86	70,1
Piroxeno	0,00	14,8
Clorita	3,40	24,1
Muscovita (Ser-Mus)	0,03	16,1
Biotita	0,94	17,1
Epidota	1,46	25,4
Silicatos Accesorios (Ap-Zr-Tour-Sphen)	0,87	86,7
Arcillas	0,00	0,0
Anhidrita/yeso	0,02	15,6
Jarosita	1,95	24,7
Carbonatos (Calcita, Ankerita)	0,01	19,7
Rutilo/Anatasa	0,06	24,6
Fe-Mn-Oxidos/Hidroxidos	11,97	78,6
Otros	3,10	18,2

4.3.1 Caracterización mineral

Los principales minerales de mena que se detectaron que pueden ser portadores de cobalto son calcopirita (0.01wt. %), pirita (35,64 wt. %) y óxidos e hidróxidos de Fe-Mn (11,97 wt. %) (Figura 42 y tabla 15). No se reconocen minerales de cobalto.



Masa Mineral (wt.%)	
Mineral/Sample	266359
Calcopirita	0,01
Pirita	35,64
Fe-Mn	11,97
Oxidos/Hidroxidos	

Figura 42 y Tabla 15 Diagrama y datos del porcentaje en peso acumulado de los principales minerales de mena en las muestras, incluyendo la pirita.

4.3.2 Asociación mineral

Para identificar las asociaciones minerales se cuantifico el área de contacto de las diferentes especies minerales en la muestra. Dos fases están “asociadas” o presentan una transición, si un pixel de una de ellas ocurre en contacto con un pixel de otra fase. Esta información es útil para reconocer la asociatividad de cada especie.

Según la tabla 16 de transiciones entre minerales se observa que la pirita está asociada fuertemente a la calcopirita, al igual que ocurre con calcosina/digenita/covelina y a la jarosita. De las otras asociaciones destaca feldespato potásico con sericita, con biotita, epidota con las arcillas.

Tabla 16 Representación numérica de las transiciones minerales.

Transitions (%)	Chalcopyrite	Chalcocite/Digenite/Covellite	Pyrite	Other Sulphide	Quartz	Feldspars (K-Feld / Plagioclase)	Amphibole	Pyroxene	Chlorite	Muscovite(Ser-Mus)	Biotite	Epidote	Accessory silicates (Ap-Zr-Tour-Sphen)	Clays	Anhydrite/Gyps	Jarosite	Carbonates (Calcite-Ankerite)	Rutile/Anatase	Fe-Mn-Oxides/Hydroxides	Other
Background	5,4	4,5	40,1	0,0	16,0	7,7	10,0	4,9	7,3	26,3	2,6	3,5	5,9	9,0	25,3	26,3	4,2	6,1	7,7	3,0
Chalcopyrite	0,0	28,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chalcocite/Digenite/Covellite	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pyrite	78,9	46,6	0,0	66,7	5,0	0,5	0,5	0,5	0,6	2,2	0,5	0,2	3,2	0,6	7,3	42,1	0,2	3,5	3,4	3,2
Other Sulphide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quartz	0,5	4,5	0,4	0,0	0,0	0,5	0,1	8,2	0,6	0,3	0,2	0,4	0,0	1,3	1,8	1,2	0,1	0,1	0,1	0,3
Feldspars (K-Feld / Plagioclase)	0,4	2,3	2,0	0,0	23,9	0,0	29,6	5,4	37,0	50,3	53,6	45,5	18,4	49,4	7,7	5,5	4,9	15,2	10,8	34,8
Amphibole	0,4	0,0	1,9	16,7	6,0	26,9	0,0	23,9	30,1	1,2	7,0	11,2	19,6	2,6	21,8	6,8	16,1	9,0	31,5	36,0
Pyroxene	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Chlorite	2,0	2,3	1,1	0,0	14,4	19,3	17,2	17,4	0,0	2,7	9,3	18,9	3,0	19,9	3,9	6,3	3,0	6,3	12,0	2,7
Muscovite(Ser-Mus)	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Biotite	0,2	2,3	0,3	0,0	2,2	9,9	1,4	3,8	3,3	5,1	0,0	1,8	0,7	2,6	0,5	1,0	1,2	1,5	7,1	3,0
Epidote	0,2	0,0	0,1	0,0	3,8	8,2	2,2	0,0	6,5	0,2	1,8	0,0	1,7	3,8	3,5	0,4	53,0	0,5	2,1	1,0
Accessory silicates (Ap-Zr-Tour-Sphen)	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,6	0,7	15,8	0,2	0,0	0,1	0,3	0,0	0,6	0,5	0,2	8,7	41,4	1,2	0,8
Clays	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anhydrite/Gyps	0,4	0,0	0,1	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,1	0,1
Jarosite	4,6	0,0	41,2	16,7	15,1	1,4	1,9	3,3	3,1	2,5	1,4	0,6	1,6	1,9	14,9	0,0	0,5	1,2	2,8	2,5
Carbonates (Calcite-Ankerite)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,6	6,5	0,2	0,0	0,2	10,0	9,1	0,0	1,9	0,1	0,0	0,2	0,2	0,3
Rutile/Anatase	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	8,8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
Fe-Mn-Oxides/Hydroxides	1,1	9,1	4,6	0,0	2,3	3,8	12,0	3,3	8,0	6,5	13,4	4,1	13,1	1,9	2,0	3,9	2,0	9,1	0,0	12,1
Other	1,4	0,0	7,3	0,0	10,2	20,7	23,5	7,1	3,1	2,6	9,7	3,4	14,6	5,1	8,8	5,8	5,6	5,8	20,7	0,0

Con los resultados de las asociaciones minerales se generó una Imagen de falso color del mapeo mineralógico de la sección pulida-transparente (Figura 43), el cual reconstruye el corte y como están distribuidos los minerales de mena y ganga.

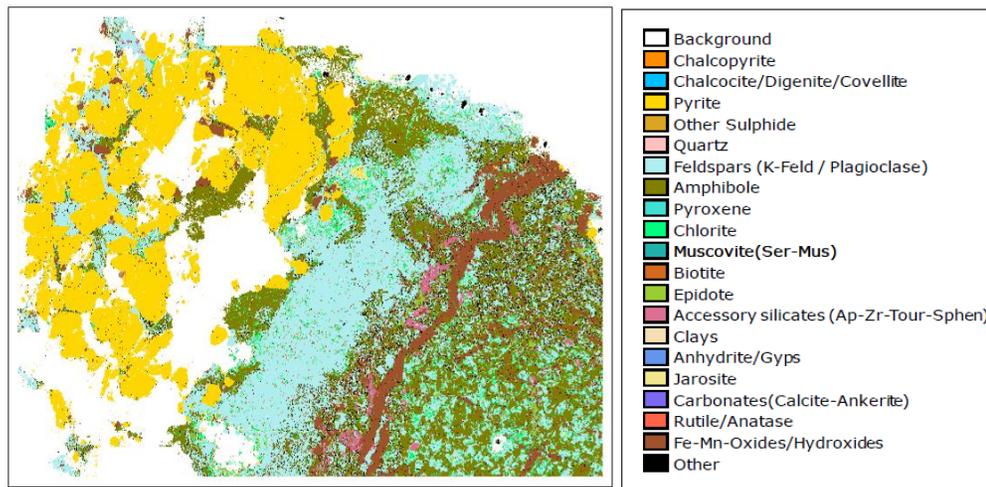


Figura 43: Mapeo falso color de la sección petrográfica, con la mineralogía de mena y ganga medida en la modalidad de Fieldscan.

4.4 Microsonda electrónica.

Con el propósito de obtener mayor información respecto de la distribución espacial de los metales en la pirita, así como de su especiación en las muestras, se realizaron mapas químicos cuantitativos de intensidad de rayos X (WDS) mediante Microsonda electrónica (EMPA), este instrumento permite obtener imágenes de intensidad de rayos X cuyos pixeles representan valores cuantitativos de concentración para el elemento seleccionado y así obtener información acerca de la distribución y/o variaciones composicionales (zonaciones, presencia de inclusiones, etc.).

Para este estudio, se contó con análisis ICP-MS con valores de cobalto de 1917 ppm para las muestras 266357 y 266358, ya que pertenecían al mismo tramo de sondaje analizado. Estas muestras se habían trabajado como corte pulido/trasparentes. Para la microsonda se midieron los elementos metálicos de Fe, Cu y Co ya que pueden formar la parte catiónica siendo el Cu y el Co elementos comunes que reemplazan al Fe en la estructura de la pirita; y S como elemento no metálico en la parte aniónica, esto se realizó en 2 granos de cada muestra. En total se realizaron 197 análisis cuantitativos a los granos de piritas, de los cuales 91 pertenecían a la muestra 266357 y 106 a la muestra 266358. Los resultados cuantitativos figuran en el Anexo B.

Según la tabla 17 el estudio de microsonda para la muestra 266357 se obtuvo que los contenidos de cobalto en las piritas varían entre 0,04 y 1,67 wt. %, con un valor promedio de 0,80 wt. %. En el caso de la muestra 266358 los contenidos de cobalto varían entre 0,00 y 1,43% en peso, con un valor promedio de 0,57 wt. %. En los cristales de pirita, para ambos casos la distribución de cobalto en los granos de pirita no es homogénea, debido a que se observan mayor contenido de cobalto en los bordes de los cristales (Figura 45 y 46), con un centro deprimido en cobalto. Además, el contenido es heterogéneo entre distintos granos de una misma muestra.

En el caso del Cu, el contenido es mucho menor en las piritas en comparación con el contenido de cobalto Co, se obtuvo que la concentración de Cu varía entre 0 y 0,02 wt. %. El contenido de hierro varía entre 44,72 y 47,09 wt. % y el de azufre varía entre 53,48 y 44,48 wt.%. Según los análisis, también se observa que cuando disminuye el contenido de Fe aumenta el del cobalto, lo que quiere decir que el cobalto ocupa el lugar del Fe en la estructura de la pirita. Por otro lado, no se observa una dependencia entre el Co y el S dentro de la pirita.

Tabla 17 Resumen de análisis composicionales mediante microsonda electrónica para el cobalto Los valores están mostrados en wt %. Límite de detección para el Co es de 0.0065 wt. %.

Muestra	n	Media Co wt. %	Media del error estándar	Desv. Est	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
266357	91	0,804	0,0411	0,3918	0,0400	0,5400	0,780	1,140	1,670
266358	106	0,5738	0,0200	0,0302	0,0200	0,3111	0,575	0,790	1,430

4.4.1 Imágenes BSE y perfiles cuantitativos

A continuación, se presentan los resultados gráficos derivados de la microsonda electrónica. En estos se presentan las imágenes BSE, para la muestra 266357 Figura 44(A) y para la muestra 266358 las Figura 45 (A) y (B) y los perfiles cuantitativos representados con las Figuras 44 B y C y 45 C y D respectivamente. De estos, se observa una tendencia del cobalto a tener mayor concentración en los bordes de los cristales de pirita. Del estudio de los histogramas (figuras 46 y 47) se observa que no siguen una distribución normal, las concentraciones no responden a un patrón, se observa que las frecuencias de los valores no siguen una tendencia.

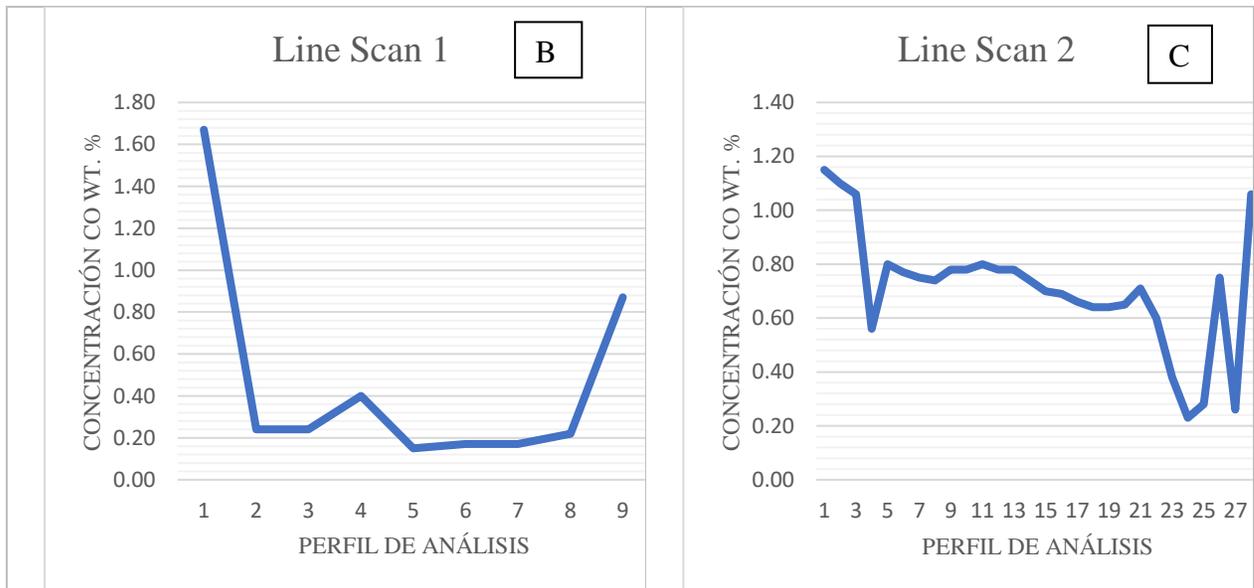
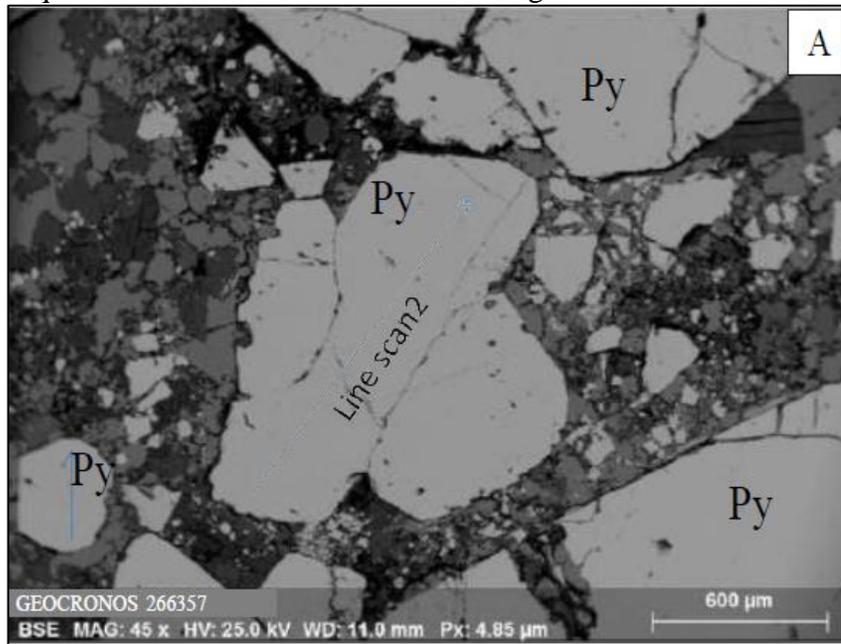


Figura 44: **A:** Imagen de electrones retrodispersados de granos de pirita en muestra 266357. **B y C:** perfiles cuantitativos de la variación de cobalto en dos granos diferentes de pirita presentes en A (Line scan 1 y 2, respectivamente. Py: pirita.)

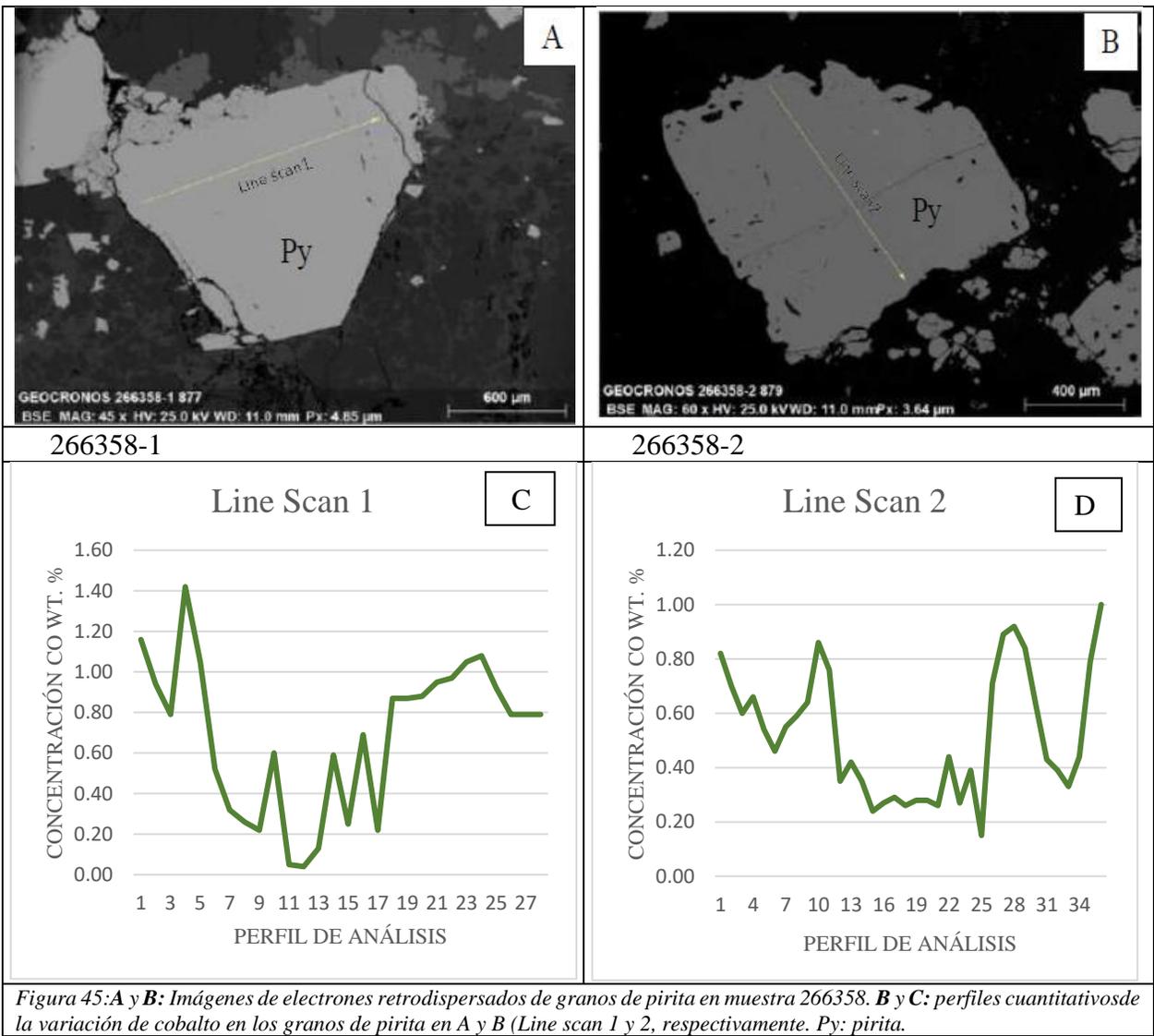


Figura 45: **A** y **B**: Imágenes de electrones retrodispersados de granos de pirita en muestra 266358. **B** y **C**: perfiles cuantitativos de la variación de cobalto en los granos de pirita en A y B (Line scan 1 y 2, respectivamente. Py: pirita).

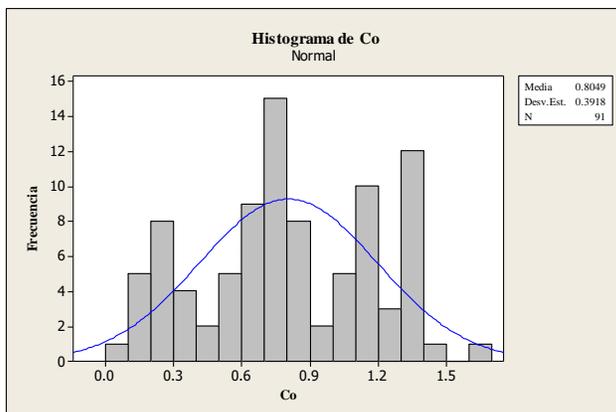


Figura 46 Histograma Co muestra 266357

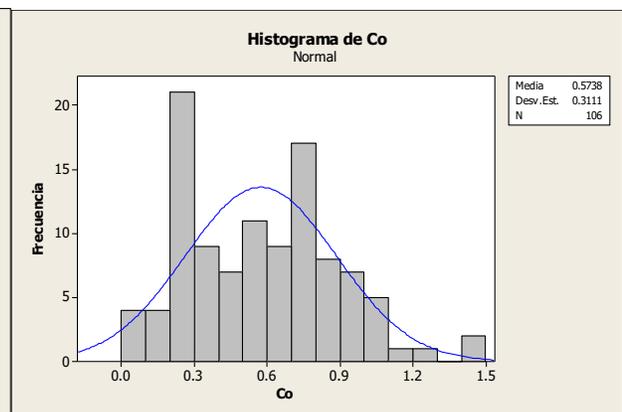


Figura 47: Histograma Co muestra 266358

Con el diagrama de caja (figura 48) se puede observar que su varianza es similar pero sus medias muestran diferencias, dando concentraciones mayores de cobalto para la muestra 266357 que para la muestra 266358.

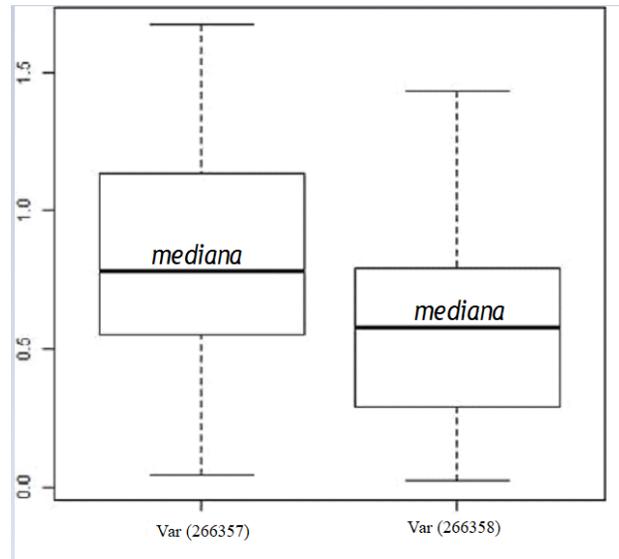


Figura 48:: Diagrama de caja para ambas muestras.

4.4.2 Gráficos de Dispersión

Se puede observar a partir de los gráficos de dispersión (figura 49 y 50) que el Co y el Fe presentan una relación inversa, es presumible que el cobalto reemplace al Hierro en los sitios octaédricos de la estructura de la pirita. Sin embargo, el Co con el S (figura 51) no presentan alguna relación dentro de la pirita, por lo tanto la incorporación de cobalto a la estructura es independiente del contenido de S.

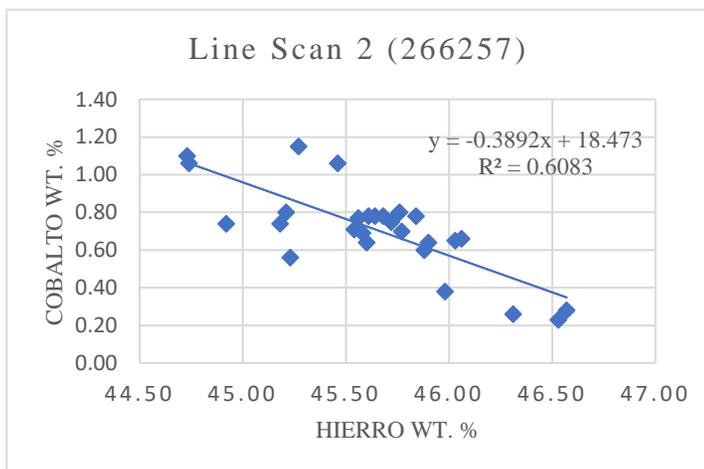


Figura 49 Grafico de dispersión Co v/s Fe muestra 266257.

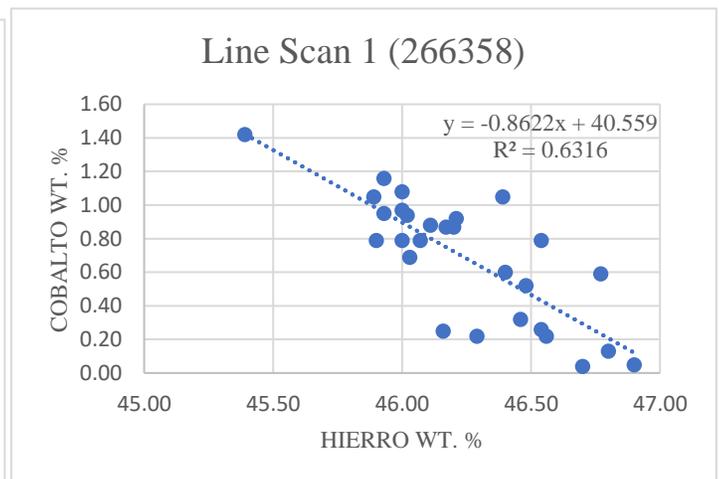


Figura 50: Grafico de dispersión Co v/s Fe muestra 266358

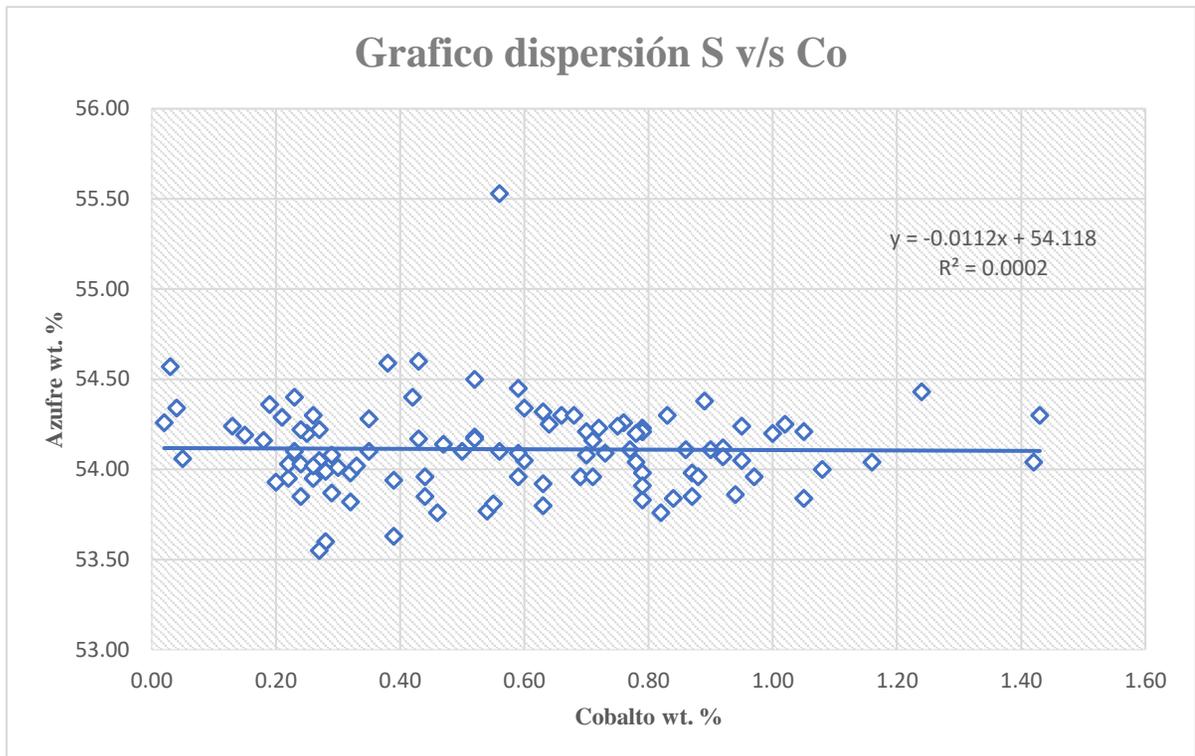


Figura 51: Grafico de dispersión S v/s Co.

CAPÍTULO 5

DISCUSIONES

5.1 Mineralización y alteración hidrotermal

A partir de los estudios petrográficos - calcográficos y a muestra de mano se identificó que en el depósito Bronce Sur ocurrieron varios eventos de mineralización y alteración hidrotermal, los cuales se encuentran sobrepuestos. Se identificaron al menos 4 eventos de alteración en donde se identifican en la Figura 52 las principales asociaciones. Los eventos observados corresponden a:

En primer lugar, ocurrió un evento caracterizado por actinolita I – clorita – albita como evento anterior a la mineralización de hierro considerado como un metamorfismo regional que afectó a la roca caja andesítica. Luego, un segundo evento de alteración, en este caso de origen magmático-hidrotermal, asociado genéticamente con el emplazamiento del cuerpo de hierro, el cual produjo la obliteración de la textura original de la roca caja por una fuerte anfibolitización caracterizado por minerales como actinolita II – apatito – escapolita – piritita I - calcopiritita I asociada al cuerpo mineralizado de hierro macizo. Este evento magmático-hidrotermal se cree que fue originado como producto la inmiscibilidad de líquidos a partir de un fundido silicatado, en donde se separa una fase rica en hierro con abundante contenido gaseoso rico en elementos incompatibles, el cual asciende por diferencia de densidad. Este evento ferrífero se presume que está ligado genéticamente con el emplazamiento de los intrusivos dacíticos del cretácico inferior (Travisany et al., 1995). Posteriormente, hubo una disminución de temperatura provocando que precipiten fases ricas en Si, Al y Na (Pincheira, 1981). Esta disminución gradual de la temperatura del sistema, generando un nuevo evento de alteración hidrotermal, el cual promovió la brechización de la roca. Este evento está caracterizado por una asociación hidrotermal de feldespato potásico- epidota I-carbonatos- piritita II- magnetita II en forma de vetillas que cortan la mena masiva reconocido como un evento posterior al evento ferrífero. En este evento destacan vetillas gruesas con piritita las cuales se destacan por tener contenidos de cobalto mayores que el resto. La presencia de minerales alteración le confieren condiciones mesotermiales a este evento, el cual ocurre en el mismo espacio que el evento de hierro principal. Posteriormente, sobrepuesta a la alteración feldespática ocurre una alteración caracterizada por epidota II-carbonatos- piritita III -calcopiritita II asociadas con un evento propilítico. Esta alteración ocurre en forma de vetillas tardías de menor temperatura. Por último, sobrepuesta a todas las alteraciones anteriormente descritas, ocurre una alteración supérgena de carácter leve la que produce una escasa martitización de la magnetita y formación de sulfuros enriquecidos de cobre como covelina y calcosina de manera puntual. En general en el evento ferrífero, feldespático y propilítico está presente la piritita, pero según las descripciones aquí realizadas no todas poseen las mismas características.

Estos eventos evidencian una disminución progresiva de la temperatura, desde condiciones magmáticas-hidrotermales (700 - 1200°C) a condiciones hidrotermales formando minerales de alta temperatura, como actinolita, feldespato potásico (~450°C), luego, a menor temperatura forma minerales como epidota, clorita, carbonatos, piritita y por último, terminando con la formación de arcillas, óxido y escaso yeso, a condiciones superficiales.

La asociación mineral es similar al de otros depósitos IOA. como Romeral o Los Colorados, presentándose como magnetita masiva en forma de dique subvertical en dirección de la estructura principal, Bordeando esta textura se presenta la magnetita brechosa con matriz de magnetita y clastos de actinolita gradando a una zona de stockwork de vetillas de hierro afectando la roca caja. Por último, la magnetita se encuentra diseminada como un halo distal de las otras texturas.

No obstante, la secuencia paragenética es distinta ya que en este depósito se observa muy poca turmalina y la presencia de sulfuros de hierro es más abundante. La escasa biotita secundaria presente se debe a que la mayor parte de ésta alterada a clorita. En general la alteración que afecta la roca caja es calcosilicatada formada en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, es de origen hidrotermal y es producida por una disminución del sistema, generando metamorfismo retrogrado.

	Evento Pre-Hierro	Evento Ferrifero Principal	Evento I	Evento II	Evento III
Clorita	██████████				
Actinolita I	██████████				
Albita	██████████				
Magnetita I		██████████			
Actinolita II		██████████			
Apatita		██████████			
Escapolita		██████████			
Pirita I		██████████			
Calcopirita I		██████████			
Magnetita II			██████████		
Pirita II			██████████		
Feldespatos K			██████████		
Epidota I			██████████		
Pirita III				██████████	
Magnetita III				██████████	
Epidota II				██████████	
Apatito II				██████████	
Carbonatos				██████████	
Sílice			██████████		
Yeso					██████████
Turmalina		██████████			
Esfeno		██████████			
Especularita		██████████			██████████
Cc. y Cov.					██████████
Arcillas					██████████
Ox. Fe					██████████

Figura 52: Secuencia de eventos mineralizadores de El Bronce Sur a partir de observaciones petrográficas realizadas en este trabajo.

5.2 Contenido de cobalto

Al comparar los contenidos de cobalto en los sondeos con los de otros elementos se pudo identificar una buena correlación fue con el azufre ($R^2=0,83$), la fuerte correlación que se alcanzó da a entender que el cobalto si estaría relacionado con los sulfuros como la pirita y la calcopirita, pero en este yacimiento al ser la pirita el sulfuro de mayor abundancia se considera que el cobalto está genéticamente relacionado a este mineral.

La pirita comúnmente se encuentra presente en los depósitos Ferríferos Tipo IOA en Chile y en el mundo, sin embargo, se tiene poca información con respecto a su composición química en este tipo de depósitos y la posible extracción de algún elemento de interés económico contenido en ellas. Con esto en mente, para este apartado se han realizado estudios en donde se reconoce elementos trazas en las piritas de los yacimientos IOA Algarrobo y El Romera (Lorca, 1990), en el caso de Algarrobo las piritas presentan concentraciones de cobalto hasta 1,9 wt. %, mientras tanto en Romeral se tienen valores hasta los 2800 ppm de Co. Otros estudios realizados en piritas fueron hechos por Campbell y Ethier (1984) para El Faro (Yukon), Canadá. En los cuales se reportaron contenidos promedio de cobalto de 0,08 wt. %. Lagos (2016) reporta para Yacimiento Los Colorados (Región de Atacama) contenidos de cobalto en piritas con una variación de entre 900 ppm y 4 wt. %. Por otro lado, en depósitos IOCG, como El Distrito Mantoverde se reportan contenidos de cobalto hasta 5 wt. % de Co en las piritas (Rieger et al, 2010). Otro deposito IOCG, Ernest Henry (Australia), se obtuvieron importantes concentraciones de cobalto hasta 2 wt. % (Rusk et al, 2010). En el caso de Bronce Sur, el contenido de cobalto varía entre 0,04% y 1,67% en las piritas es similar al de los otros depósitos IOA anteriormente descritos. Lo cual aporta para ceñir el rango de este elemento en tal tipo de yacimientos.

Además, basado en Fleischer (1955), el rango más común de Co contenido en las piritas se encuentra entre 200 y 5000 ppm, siendo 2,5 wt. % el contenido máximo de Co que puede tener estequiométricamente la estructura de la pirita. En este sentido, los valores que se obtuvieron llegaban hasta los 1,67% de Co, lo que quiere decir, el enriquecimiento de cobalto estaría fuertemente relacionado a un empobrecimiento de Fe, como se muestra en los gráficos de dispersión (Figura 42 y 43), es probable que el Co reemplace al Fe en los sitios octaédricos en la estructura de la pirita.

Según los diagramas cuantitativos obtenidos en este estudio, se observa que las piritas de El Bronce Sur presentan zonaciones de las concentraciones de Co, esto se debe a que presentan un enriquecimiento de Co en los bordes de los cristales en comparación con el centro de este, como se puede observar en las imágenes BSE (figura 44 y 45) lo cual se puede relacionar con cambios químicos en los fluidos mineralizadores durante la formación de los cristales de pirita. Además, basado en estas imágenes, sumado al estudio Qemscan y de microscopia realizados, se descarta la presencia de inclusiones de minerales de cobalto ya que no fueron detectados a pequeña escala. Por lo tanto, estas zonaciones lo más probables es que se deban a un reemplazo, en donde el cobalto pudo haber ingresado como impureza a la estructura de la pirita, lo cual generó que ingresara Co^{+2} a la estructura en un espacio que ocupaba Fe^{+2} .

Por otro lado, según los estudios de componentes principales y de correlaciones realizadas para el cobalto no presentan una buena correlación con otros metales de interés dentro del yacimiento Bronce Sur, siendo la excepción el Ni que en algunos casos muestra valores más elevados. Esto quiere decir que la fuente mineralizadora de cobalto no estaría ligada con la del resto de elementos. Como es de esperarse el cobalto a ser un elemento sideróforo, presenta una buena correlación con el Fe, además los análisis ICP, ubican las mayores concentraciones de Co en las mayores leyes de Fe, lo cual muestra su relación, cuyas leyes pueden venir del contenido de Fe en la pirita sumado a la de magnetita. Con los otros elementos que mostraron mayor relación son el V, Mo y W.

El cobalto no mostro buenas correlaciones con elementos presentes en los depósitos vetiformes de Co-Cu encontrados en Chile formando minerales entre ellos (Hornkohl, 1944). Las correlaciones realizadas con estos elementos arrojaron valores bajo 0,3 para r de pearson. Esta evidencia ratifica que la presencia de Co en el yacimiento Bronce Sur no estaría vinculada directamente con la ocurrencia de los depósitos cobaltífero de la Región de Atacama, aunque la mineralización de estos depósitos está cercana en el tiempo y en espacio con la mineralización de Hierro (cretácico inf.) (Townley et. al, 2017). Además, sabiendo que el cobalto presente en este depósito está en las piritas descarta su relación.

Cabe destacar, que los depósitos de Cobalto y los IOA pertenecen a la provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa de la región de Atacama, la cual está constituida, en parte por rocas ígneas y sedimentarias del Mesozoico que incluyen rocas plutónicas, volcánicas y sedimentarias marinas, en el caso de los depósitos de Hierro (Vivallo, 2009), interpretadas como arco magmático-cuenca de tras arco, y por otro, constituida de rocas metamórficas del Paleozoico como parte de un prisma de acreción en el caso de los depósitos de Cobalto. Además, son afectados por el Sistema de Falla de Atacama por esta razón la mineralización se encuentra profundamente ligada a este sistema estructural, de igual modo, la litología en que son emplazados los depósitos es diferente, por un lado, los depósitos IOA están emplazados en rocas volcánicas en las cercanías de intrusivos, por otro la mineralización cobaltífera se encuentra asociada a rocas metamórficas y a intrusivos.

Por otro lado, según los análisis realizados, el depósito está enriquecido en vanadio (863,1 ppm) y tierras raras, en especial de tierras raras livianas (10ppm), lo cual es congruente con los depósitos IOA pertenecientes a la franja ferrífera, como El Romeral o Algarrobo, en los cuales, según estudios previos (Dobbs, 1977), el vanadio está ligado a la estructura de la magnetita y las tierras raras están contenidas en el apatito, minerales comunes en estos depósitos.

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusiones

- Mediante el estudio trazable realizado para esta memoria, desde la descripción de sondajes, análisis químicos, estudios petro-calcográficos, microanalíticos Qemscan y de microsonda electrónica, permiten confirmar la presencia de contenidos anómalos de cobalto dentro de algunas piritas del yacimiento tipo Magnetita-Apatito (IOA) Bronce Sur. Las piritas reconocidas como “cobaltíferas”, están caracterizadas por un estilo de mineralización en guías, en las cuales se observa una relación de corte con la mena de alta ley de Fe. Estas piritas presentan hábito cúbico, más pulido en comparación con las piritas diseminadas, estas últimas están relacionadas al evento magmático-hidrotermal el cual provocó la mineralización de magnetita maciza. Además, las piritas con anomalías de Co presentan un color más blanquecino que el resto de las piritas.
- Con respecto a la evolución del depósito, se identifican al menos 3 eventos de alteración hidrotermal posteriores al evento ferrífero principal. El primero de estos se reconoce como un evento vetiformes caracterizado principalmente por feldespático K. Luego, es seguido por un evento propilítico caracterizado por epidota, pirita, apatito. Para finalmente, ser afectada por una alteración supergena, esta última solo se observa en los niveles más somero del depósito. Estas alteraciones ocurren en el mismo espacio, sobreimponiéndose y generando relaciones de corte entre ellas, esto quiere decir que estos eventos ocurrieron en épocas distintas las cuales reflejan cambios químicos en el medio en que se formaron.
- Según los estudios de ICP MS/OES realizados a muestras de sondajes, entregan valores de cobalto que llegan hasta los 1917 ppm con una mediana de cobalto de 229 ppm para el hierro de alta ley (macizo). Además, no se detectaron buenas correlaciones con elementos paragenéticos al cobalto (Ni, Zn, Cu, Pb, As o Cr), esto sugiere que la ocurrencia de cobalto en el yacimiento no estaría relacionada a la mineralización de los depósitos cobaltíferos históricos chilenos, los cuales presentan fases minerales de Co junto a estos elementos. El estudio PCA permitió identificar que el cobalto estaría muy ligado con el Fe y tiende a estar alejado de los otros metales.
- Mediante la descripción macroscópica de sondajes acompañado de los análisis químicos, se pudo constreñir la información hasta aclarar que el evento de metasomatismo responsable de incorporar el cobalto a la pirita sería de origen hidrotermal y estaría caracterizado por una asociación mineral conformada principalmente por feldespato potásico, junto a epidota, sílice, carbonatos, pirita, magnetita y trazas de calcopirita. El modo de ocurrencia de esta asociación consiste en brechas hidrotermales irregulares que cortan la mena de magnetita maciza. Además, se pudo identificar, según los estudios de corte transparente/pulido, que estas piritas presentan bordes definidos, anisotropías a nicoles cruzados. Estas características permiten reconocer una guía de exploración de este metal en otros depósitos de similares características.

- Basado en las observaciones microscópicas y la ratificación con Qemscan se descarta la presencia de minerales de cobalto tal como cobaltita, asbolana, heterogenita, eritrina, etc. Por lo tanto, el único candidato viable de ser el responsable de la anomalía de cobalto son las piritas, por ser el sulfuro de mayor abundancia.
- Los resultados de microsonda electrónica entregan valores de cobalto hasta los 1.67 wt. %. los cuales son concordantes con los valores de cobalto de depósitos tipo IOA de la Franja Ferrífera chilena. La distribución del cobalto en los cristales de pirita es heterogénea dentro de un grano y entre los granos. Además, presenta zonaciones en el contenido de Co dentro del cristal aumentando el contenido hacia los bordes. Con respecto al hierro en la pirita se detectó que inversamente correlacionado con el cobalto, por lo tanto, lo más probable es que el Co se presenta como una impureza en la estructura de la pirita reemplazando al Fe y no como un elemento formador del mineral, con lo cual, es muy difícil predecir su contenido dentro de una muestra. Además, se ratifica que las piritas son las responsables de las anomalías de cobalto presentes en el depósito.

6.2 Recomendaciones

- Como el azufre tiene una buena correlación con el cobalto, y se cuentan un mayor número de análisis en la totalidad de los sondeos, se recomienda modelar el cuerpo mineralizado por la variable azufre, con esto se podría saber en qué zona hay mayor concentración de S y con eso saber dónde se localiza una mayor proporción de piritas, las cuales serían el objetivo a explotar para obtener el cobalto contenido en ellas.
- También se recomienda seguir realizando estudio de microsonda electrónica a más cortes con abundancia de pirita, para fortalecer este estudio con una mayor población estudiada, con ello también se podría hacer un estudio a las piritas de cada tipo de alteración para analizar similitudes y diferencias entre estas piritas con respecto al cobalto. Además, se podría incluir un mayor número de elementos para saber cómo se comporta por ejemplo Ni o Cu, los cuales podrían afectar una posible obtención del Co.
- Como este yacimiento está dentro de una zona mineralizada mayor se recomienda realizar este mismo estudio a otros depósitos del sector, así se tendría información de una zona más extensa, lo cual beneficiaría al volumen de información que se tenga y así poder seguir una dirección de anomalía de cobalto y con esto definir de mejor modo la espacialidad del enriquecimiento y la alteración la cual estaría ligado.
- Basado en que el yacimiento va a ser explotado por hierro, este proceso de obtención separa el material magnético de alta ley de Fe de las impurezas, destacándose los sulfuros como la pirita, la cual es enviada como desecho en los botaderos y relaves, aumentando su abundancia relativa en el material, de este modo la pirita se encontraría liberada de la roca y con una granulometría más fina. Esto permite que una futura extracción de cobalto

ocluido en las piritas tenga un costo mucho menor ya se ahorra el chancado del material. Además, el proceso de obtención del cobalto no interferiría en el proceso del hierro porque se trabajaría con los relaves los cuales siempre son un problema en las mineras, de esta forma se contribuiría en el aspecto ambiental ya que se trabajaría con estos pasivos que son un potencial agente contaminante y de drenaje ácido. Ligado a esto también se recomienda estudiar los relaves de depósitos ferríferos con alta proporción de pirita.

- Aumentar el número de análisis de ICP a los sondajes del distrito para poder crear un modelo por la variable cobalto para poder realizar una estimación del recurso de cobalto en el depósito.
- Otro mineral el cual se podría estudiar son las calcopiritas, aunque en este depósito era escaso.

CAPITULO 7

Bibliografía

AHRENS, L. 1957. The lognormal distribution of the elements - a fundamental law of geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 11, N° 4.

AGUIRRE, H., 1991. Informe geológico preliminar del distrito ferrífero Pleito: Minas Falda, Bronce Sur y Pleito Sur. Compañía Minera del Pacífico Internal Report.

AGUIRRE, Hugo. 2000. "Recopilación de antecedentes, interpretación geológica y evaluación del yacimiento Bronce Sur".

AGUIRRE, Ramón. 1999. "magmatic iron ore breccias in the hilean Coastal Cordillera la Falda and Bronce Sur mines Pleito-mPlón district III Región, Chile".

AGUIRRE, Ramón. 2003. "Cuerpos intrusivos de magnetita en la Franja Ferrífera Cretácica : minas La Falda y Bronce Sur, región de Atacama".

ARÉVALO, C.; Grocott, J.; Welkner, D. 2003. The Atacama Fault System in the Huasco Province, Southern Atacama Desert, Chile. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas, CD-Rom. Concepción.

ARÉVALO, C. 2005b. Carta Los Loros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 92.

ARÉVALO, C.; Mourgues, F.A.; Chávez, R. 2009. Carta Vallenar-Domeyko. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica 120: 64 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

ARÉVALO, C.; Creixell, C. 2010. Geología del área Cruz Grande-Junta de Chingoles, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10-40: 133 p., 6 mapas escala 1:50.000. Santiago.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. 2009. Cobalt. Mineral UK. Centre for sustainable mineral development.

BROWN, M., Díaz, F. & Grocott, J. 1993. Displacement History of the Atacama Fault System, 25°00'S 27°00'S, Northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 105, p. 1165-1174.

CAP, 2017. Compañía Minera del Pacífico. Memoria Anual 2017.

CAP, 2014. Compañía Minera del Pacífico. Memoria Anual 2014: 36.

CARRASCO, Marco 1998. "Geología prospectos Pleito Norte- Pleito Sur".

CHONG-HU WU, 2012. Low Energy-Consumption Industrial Production of Ultra-Fine Spherical Cobalt Powders.

CORNEJO, Paula. 2012. Estudio piloto acerca de la relacion petrologica y geocronologica entre yacimientos de fe-ap e IOCG, sector el Tofo-Pleito

CORONA, Rodolfo. 2004. “modelo magmático del yacimiento de hierro Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de hierro en México”.

CAMPBELL, Finley A.; ETHIER, Valerie G. 1984. Nickel and cobalt in pyrrhotite and pyrite from The Faro and Sullivan orebodies. *The Canadian Mineralogist* 28: 1-16.

CARABALLO, M., Townley, B., González, E., Riquelme, B., 2017. Elementos de interés económico en relaves chilenos: Estado del Arte. Informe Corfo, P1, Programas Tecnológicos, Valorización de Relaves. 175 p.

CREIXELL, Christian; ORTIZ, Miguel; ARÉVALO, Carlos. 2012. “Geología del área Carrizalillo–El Tofo, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nos. 133-134”. 133–134(December): 100.

D'AUBAREDE, Guillermo. 1969. Evaluación de los conocimientos existentes sobre cobalto, manganeso. Corporacion del fomento (CORFO) mercurio:27-33p.

DESOUKY, Hamdy A. et al. 2010. “Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo)”. *Mineralium Deposita* 45(8): 735–63.

DÍAZ, A.; Lacassie, J.P.; Vivallo, W. 2010. Yacimientos Metalíferos del área Andacollo- Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 31, 28 p., 1 mapa escala 1:100.000.

DOBBS, M., 1977. Distribución de vanadio y titanio en el cuerpo principal de la mina El Romeral. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

ELGUETA, Roberto. 1979. Informe geológico Distrito Pleito, III región, Chile.

EMPARAN, C.; Pineda, G. 2000. Área La Serena - La Higuera. Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile No. 18. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología, Chile.

FORTIN M., Heriberto 2012. *Geología Sector Pleito Central. III Región de Atacama*. Geología CMP La Serena, Chile.

- GEIJER, P., 1910, Igneous rocks and iron ores of Kiirunavaara, Luossavaara and Tuolluvaara: Stockholm, Scientific and Practical Researches in Lapland Arranged by Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, 278 p
- GEOEXPLORACIONES. 1983. Proyecto Cobalto-Freirina, publicado en: Diversificación de la pequeña y mediana minería, SERPLAC - Atacama. Copiapó.
- GONZALEZ, Gabriel. 1999. "Tectonics of the Jurassic- Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary ? 18(5): 895–910.
- GOMEZ, Osvaldo. 2018. Informe proyecto cobalto, CAP Minería, La Serena, Chile.
- GOMEZ, Osvaldo. 2018. Estudio de cobalto en relaves de hierro, CAP Minería, Chile
- GROCOTT, J., y G. K. Taylor. 2002. "Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25 30'S to 27 00'S)". *Journal of the Geological Society* 159(4): 425–43.
- HILDEBRAND, R. S. 1986. "Kiruna-type deposits: their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, northwest Canada." *Economic Geology* 81(3): 640–59.
- HITZMAN, M.W.; Oreskes, N.; Einaudi, M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu – U – Au – REE) deposits. *Precambrian Research* 58: 241-287.
- HORNKOHL, Herbert. 1944. "El cobalto en Chile, anales del primer congreso panamericano de ingeniería de minas y geología".
- LEVINSON, A 1973. Introduction to exploration geochemistry, 612 applied publishing ltd calgary Canadá.
- LORCA, Gladys; 1990. Caracterización geoquímica y cristalográfica de las piritas de los yacimientos de Fe El Algarrobo y El Romeral. Memoria de Título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Chile.
- MAKSAEV, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. 2007, Metallic ore deposits (Chapter 6). In: *The Geology of Chile*, T. Moreno, W. Gibbons (eds.), England, p. 181-201.
- MAKSAEV, V.; Almonacid, T.; Munizaga, F.; Valencia, V.; McWilliams, M.; Barra, F. 2010. Geochronological and thermochronological constraints on porphyry copper mineralization in the Domeyko alteration zone, northern Chile. *Andean Geology* 37 (1): 144-176.
- MASON, Brian. 1959. "Principles of Geochemistry".

MÉNARD, J.J., 1995. Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama Region, Chile). *Mineralium Deposita*, V. 30, p. 268- 274.

NASLUND, H. R., et al. 2002. Magmatic iron ores and associated mineralization: Examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective 2: 207-226.

NYSTROM, J. O., y F. Henriquez. 1994. “Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry”. *Economic Geology* 89(4): 820–39.

Park, F. 1961. “A magnetite ‘flow’ in northern Chile”. 56: 431–36.

OSSES, Leonidas. 2017. El cobalto en el mundo y en Chile.

PINCHEIRA, Marcos; 1981. “Geología de la mitad oriental del cuadrángulo Astillas. Nuevos antecedentes de la franja Ferrífera principal entre los 28°15' y 28°30' latitud sur. Chile”.

RUIZ, C., Aguirre, L., Corvalan, J., Klohn, C., Klohn, E., Levi, B. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas [Chile], 386 p.

PARK, F. 1961. “A magnetite ‘flow’ in northern Chile”. 56: 431–36.

REICH, Martin et al. 2016. “Trace element signature of pyrite from the los colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: a missing link between Andean IOA and Iron Oxide Copper-Gold Systems?” : 743–61.

RIEGER, Ana A. et al. The Hypogene Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Mantoverde District, Northern Chile. In: *Economic Geology*, 2010, vol. 105, n° 7, p. 1271-1299

RIVANO, S., Sepúlveda, P. (1991) Hoja Illapel. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000, N° 69, 132 pp.

SCHEUBER, E. y GONZÁLEZ, G. 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* v. 18; n°5.

SILLITOE H. Richard, 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, Volume 38, Number 7, 78p.

SILLITOE, R. H., Cooper, C., Sale, M. J., Soechting, W., Echavarría, D., and Gallardo, J. L., 2002, Discovery and geology of the Esquel low-sulfidation epithermal gold deposit, Patagonia, Argentina: *Society of Economic Geologists Special Publication* 9, p. 227–240.

SEGERSTROM, K.; Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas,

Carta Geológica de Chile 6: 115 p., 1 mapa escala 1:50.000

THIELE, R. y Pincheira, M. 1987. Tectónica transpresiva y movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, n°31, p.77-94

TOWNLEY, Brian, y Alejandro Díaz. 2017. “Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile”:17-27p.

TOWNLEY, Brian, Alejandro Díaz, y Rodrigo Luca. 2017. “Recursos Minerales por Cobalto en Chile - Potencial de Exploración & Explotación Minera”. *Comité Minería No Metálica* (November).

TOWNLEY, Brian K et al. 2000. “Base and precious metals geochemistry of rock units of the mainland Aysén region, Chilean Patagonia”. *Journal of Geochemical Exploration* 68(1–2): 21–46.

TRAVISANY, Vinicio; HENRIQUEZ, Fernando; NYSTROM, Jan Olov. 1995. “Magnetite lava flows in the Pleito-Melon district of the Chilean iron belt”. *Economic Geology* 90(2): 438–44.

Vivallo, Waldo et al. 1994. “mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile”. 21.7

TRAVISANY, Vinicio. 1991. “Informe geológico de los distritos El Pleito; Compañía; Minera del Pacífico. La Serena; Chile.”

VIVALLO, Waldo; HENRÍQUEZ, Fernando. 1995. “Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferrífero Cerro Negro Norte”. 22(1): 75–88.

VIVALLO, Waldo et al. 1994. “Mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile”. 21.

VIVALLO, W.; Henríquez, F.; Espinoza, S. 1991. Alteración hidrotermal en el complejo volcánico El Laco, Norte de Chile. In Congreso Geológico chileno, No. 6, Actas. Viña del Mar.

XIANG Jun-feng, XIANG Jun-feng, MAO Jing-wen, Rong-fu1, YE Hui-shou1, WANG Chun-yi. 2012. New geochronological data of granites and ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo(W) deposit .

YAÑEZ, P, 2015. “Informe de los recursos geológicos del yacimiento Tofo Norte”.

CAPITULO 8

Anexos

Anexo A: Resultados Análisis Químicos.

Sondaje	muestra	Au	Ag	Ni	Zn	Pb	Co	As
BRS0809	266996	0.02	4	41	66	28	150	42
BRS0809	266997	0.04	2	54	66	32	181	66
BRS0809	266998	0.06	2	52	54	34	379	76
BRS0809	266999	0.02	2	59	42	22	277	56
BRS0809	267000	0.02	2	54	60	28	276	86
BRS0809	267001	0.06	3	122	50	32	330	24
BRS0809	267002	0.04	4	46	50	24	553	94
BRS0809	267003	0.06	2	33	40	26	572	50
BRS0809	267004	0.04	3	50	32	26	544	74
BRS0809	267005	0.04	2	37	60	16	127	100
BRS0809	267006	0.04	2	50	32	22	79	84
BRS0809	267007	0.03	3	60	32	24	468	74
BRS0809	267008	0.1	4	63	28	24	472	98
BRS0810B	266871	0.06	4	37	54	18	157	136
BRS0810B	266872	0.08	2	36	58	18	98	136
BRS0810B	266873	0.06	2	25	36	8	152	121
BRS0810B	266874	0.08	2	40	57	8	82	205
BRS0810B	266875	0.04	2	38	42	4	111	207
BRS0810B	266876	0.04	2	55	56	8	97	181
BRS0810B	266877	0.07	2	52	68	2	30	147
BRS0810B	266878	0.04	2	46	48	18	58	175
BRS0810B	266879	0.03	2	35	36	6	77	171
BRS0810B	266880	0.04	1	75	59	23	162	232
BRS0810B	266881	0.02	1	75	98	36	88	262
BRS0810B	266882	0.06	2	51	82	30	108	269
BRS0810B	266883	0.05	1	93	93	37	95	263
BRS0811	301335	0.03	1	56	55	16	168	270
BRS0811	301336	0.03	1	57	78	12	76	327
BRS0811	301337	0.01	1	39	51	8	91	414
BRS0811	301338	0.01	2	37	60	12	56	358
BRS0811	301339	0.07	1	24	94	26	64	114
BRS0811	301340	0.07	3	29	52	18	81	106
BRS0811	301341	0.06	3	41	58	22	84	112
BRS0811	301342	0.07	2	26	42	32	138	132

BRS0811	301343	0.08	2	18	88	24	159	198
BRS0811	301344	0.07	1	23	82	22	238	90
BRS0811	301345	0.05	2	28	107	17	33	139
BRS0811	301346	0.08	2	63	46	26	97	178
BRS0811	301347	0.06	1	39	46	22	91	144
BRS0815	302031	0.06	1	24	58	22	116	84
BRS0815	302032	0.05	3	42	66	28	137	164
BRS0815	302033	0.05	3	29	32	18	145	146
BRS0815	302034	0.09	1	48	62	42	139	146
BRS0815	302035	0.07	1	48	86	24	98	162
BRS0815	302036	0.07	2	52	54	30	70	66
BRS0815	302037	0.06	2	51	60	18	82	26
BRS0815	302038	0.05	2	66	54	16	142	34
BRS0916	306555	0.12	2	33	104	22	113	62
BRS0916	306556	0.14	3	37	74	16	110	46
BRS0916	306557	0.12	2	41	90	6	181	48
BRS0916	306558	0.1	2	101	94	12	379	34
BRS0916	306559	0.13	4	57	114	20	231	56
BRS0916	306560	0.07	1	76	120	18	207	46
BRS-0918	307096	0.12	4	175	66	34	1917	88
BRS-0918	307097	0.1	3	78	78	16	430	82
BRS-0918	307098	0.12	3	138	62	12	1299	50
BRS-0918	307099	0.09	2	164	59	21	1664	40
BRS-0918	307100	0.05	2	120	50	20	1030	84
BRS-0918	307101	0.1	2	69	58	16	630	52
BRS-0918	307102	0.1	2	41	66	8	148	76
BRS-0918	307103	0.11	2	40	78	18	120	74
BRS-0918	307104	0.9	3	42	82	10	142	44
BRS-0918	307105	0.05	2	38	66	10	141	84
BRS-0918	307106	0.08	3	43	68	22	156	16
BRS1029	320364	0.09	2	156	72	20	151	86
BRS1029	320365	0.05	3	57	62	24	75	116
BRS1029	320366	0.03	2	62	66	18	77	108
BRS1029	320367	0.08	5	62	64	18	45	82
BRS1029	320368	0.07	5	63	66	18	69	96
BRS1029	320369	0.05	2	71	60	24	78	120
BRS1042	359502	0.1	1	75	70	22	163	118
BRS1042	359503	0.05	1	77	82	26	163	96
BRS1042	359504	0.03	2	62	74	24	87	110
BRS1042	359505	0.03	1	54	62	36	65	46
BRS1042	359506	0.04	1	50	70	34	38	64
BRS1042	359507	0.04	2	47	64	36	117	58

BRS1149	424218	0.03	1	53	62	29	74	118
BRS1149	424219	0.04	3	40	62	30	53	76
BRS1149	424220	0.03	2	59	72	28	60	74
BRS1149	424221	0.04	1	56	74	32	81	78
BRS1149	424222	0.04	2	51	64	34	56	84
BRS1149	424223	0.07	2	37	64	24	34	80
BRS1149	424224	0.17	1	45	64	28	47	40
BRS1149	424225	0.16	4	33	70	30	43	52
BRS1149	424226	0.09	2	29	78	28	32	46
BRS1149	424227	0.04	1	35	62	26	46	42
BRS1149	424228	0.03	1	50	62	22	63	118

Anexo B: Resultados perfiles Microsonda Electrónica (EMPA).

MUESTRA 266357						
n	Label	Fe	Co	Cu	S	Total
1	266357-1	46.07	0.18	0.02	54.48	100.75
2	266357-2	45.91	0.80	0.01	54.43	101.15
3	266357-3 Line#1-1	44.72	1.67	0.00	53.77	100.16
4	266357-3 Line#1-2	45.89	0.24	0.01	53.99	100.13
5	266357-3 Line#1-3	45.69	0.24	0.01	53.48	99.42
6	266357-3 Line#1-4	45.68	0.40	0.02	53.96	100.06
7	266357-3 Line#1-5	45.70	0.15	0.01	53.57	99.43
8	266357-3 Line#1-6	45.80	0.17	0.02	54.11	100.10
9	266357-3 Line#1-7	46.01	0.17	0.01	53.87	100.06
10	266357-3 Line#1-8	45.69	0.22	0.02	53.78	99.71
11	266357-3 Line#1-9	45.33	0.87	0.01	53.87	100.08
12	266357-4 Line#2-1	45.27	1.15	0.01	54.02	100.45
13	266357-4 Line#2-2	44.73	1.10	0.01	53.61	99.45
14	266357-4 Line#2-3	44.74	1.06	0.01	54.20	100.01
15	266357-4 Line#2-4	45.23	0.56	0.01	53.71	99.51
16	266357-4 Line#2-5	45.21	0.80	0.00	54.21	100.22
17	266357-4 Line#2-6	45.56	0.77	0.00	53.79	100.12
18	266357-4 Line#2-7	45.72	0.75	0.01	54.15	100.63
19	266357-4 Line#2-8	44.92	0.74	0.02	53.78	99.46
20	266357-4 Line#2-9	45.68	0.78	0.01	53.95	100.42
21	266357-4 Line#2-10	45.64	0.78	0.01	53.76	100.19
22	266357-4 Line#2-11	45.76	0.80	0.00	53.63	100.19
23	266357-4 Line#2-12	45.84	0.78	0.00	53.99	100.61
24	266357-4 Line#2-13	45.61	0.78	0.01	54.21	100.61
25	266357-4 Line#2-14	45.18	0.74	0.01	53.79	99.72
26	266357-4 Line#2-15	45.77	0.70	0.01	54.04	100.52
27	266357-4 Line#2-16	45.58	0.69	0.01	54.15	100.43
28	266357-4 Line#2-17	46.06	0.66	0.01	54.07	100.80
29	266357-4 Line#2-18	45.60	0.64	0.00	53.66	99.90
30	266357-4 Line#2-19	45.90	0.64	0.00	54.02	100.56
31	266357-4 Line#2-20	46.03	0.65	0.01	54.03	100.72
32	266357-4 Line#2-21	45.54	0.71	0.00	53.57	99.82
33	266357-4 Line#2-22	45.88	0.60	0.01	53.79	100.28
34	266357-4 Line#2-23	45.98	0.38	0.01	54.15	100.52
35	266357-4 Line#2-24	46.53	0.23	0.01	54.00	100.77
36	266357-4 Line#2-25	46.57	0.28	0.02	54.10	100.97
37	266357-4 Line#2-26	45.72	0.75	0.01	53.97	100.45
38	266357-4 Line#2-27	46.31	0.26	0.01	54.10	100.68
39	266357-4 Line#2-28	45.46	1.06	0.01	54.20	100.73

40	266357-5 Line#3-1	45.82	0.73	0.01	54.27	100.83
41	266357-5 Line#3-2	45.00	1.14	0.01	54.00	100.15
42	266357-5 Line#3-3	45.74	0.60	0.01	54.23	100.58
43	266357-5 Line#3-4	46.12	0.34	0.01	54.00	100.47
44	266357-5 Line#3-5	46.19	0.04	0.01	54.10	100.34
45	266357-5 Line#3-6	45.60	1.33	0.01	53.90	100.84
46	266357-5 Line#3-7	45.44	1.40	0.01	54.22	101.07
47	266357-5 Line#3-8	45.48	1.37	0.01	54.21	101.07
48	266357-5 Line#3-9	45.24	1.32	0.00	53.82	100.38
49	266357-5 Line#3-10	45.36	1.37	0.01	53.79	100.53
50	266357-5 Line#3-11	45.08	1.38	0.01	53.94	100.41
51	266357-5 Line#3-12	46.12	0.84	0.02	53.75	100.73
52	266357-5 Line#3-13	46.15	0.46	0.01	54.00	100.62
53	266357-5 Line#3-14	45.65	1.39	0.01	54.26	101.31
54	266357-5 Line#3-15	45.40	1.39	0.01	54.09	100.89
55	266357-5 Line#3-16	45.83	1.36	0.02	53.99	101.20
56	266357-5 Line#3-17	45.41	1.39	0.01	54.01	100.82
57	266357-5 Line#3-18	45.87	0.86	0.02	54.29	101.04
58	266357-5 Line#3-19	46.67	0.53	0.01	53.74	100.95
59	266357-5 Line#3-20	46.25	0.76	0.01	53.77	100.79
60	266357-5 Line#3-21	45.69	1.37	0.00	53.97	101.03
61	266357-5 Line#3-22	45.62	1.38	0.01	54.38	101.39
62	266357-5 Line#3-23	45.20	1.36	0.00	54.10	100.66
63	266357-5 Line#3-24	47.09	0.14	0.01	54.05	101.29
64	266357-5 Line#3-25	46.60	0.53	0.02	54.31	101.46
65	266357-5 Line#3-26	46.37	0.76	0.00	53.93	101.06
66	266357-5 Line#3-27	45.43	1.21	0.01	53.92	100.57
67	266357-5 Line#3-28	45.91	1.09	0.00	54.02	101.02
68	266357-5 Line#3-29	46.18	0.88	0.01	54.35	101.42
69	266357-6 Line#4-1	46.41	0.27	0.02	53.84	100.54
70	266357-6 Line#4-2	45.60	1.17	0.02	53.75	100.54
71	266357-6 Line#4-3	46.29	0.32	0.01	53.99	100.61
72	266357-6 Line#4-4	46.49	0.21	0.01	53.99	100.70
73	266357-6 Line#4-5	45.85	0.89	0.00	54.20	100.94
74	266357-6 Line#4-6	45.44	1.14	0.01	54.10	100.69
75	266357-6 Line#4-7	45.46	1.16	0.01	53.90	100.53
76	266357-6 Line#4-8	45.75	1.15	0.02	53.85	100.77
77	266357-6 Line#4-9	45.35	1.22	0.00	53.83	100.40
78	266357-6 Line#4-10	46.08	1.13	0.01	54.09	101.31
79	266357-6 Line#4-11	46.33	0.67	0.01	53.84	100.85
80	266357-6 Line#4-12	46.05	0.91	0.00	53.61	100.57
81	266357-6 Line#4-13	46.00	0.94	0.01	53.98	100.93
82	266357-6 Line#4-14	45.60	1.00	0.00	53.93	100.53
83	266357-6 Line#4-15	45.94	1.04	0.01	53.83	100.82
84	266357-6 Line#4-16	45.71	1.12	0.01	53.68	100.52

85	266357-6 Line#4-17	46.25	1.12	0.01	54.09	101.47
86	266357-6 Line#4-18	45.88	1.25	0.00	53.82	100.95
87	266357-6 Line#4-19	46.38	0.54	0.01	54.12	101.05
88	266357-6 Line#4-20	46.84	0.36	0.01	53.95	101.16
89	266357-6 Line#4-21	46.46	0.71	0.00	54.41	101.58
90	266357-6 Line#4-22	46.50	0.68	0.01	54.18	101.37
91	266357-6 Line#4-23	46.17	0.58	0.02	53.85	100.62

MUESTRA 266358						
n	Label	Fe	Co	Cu	S	Total
1	266358-1 Line#1-1	45.93	1.16	0.03	54.04	101.16
2	266358-1 Line#1-2	46.02	0.94	0.04	53.86	100.86
3	266358-1 Line#1-3	46.07	0.79	0.03	54.23	101.12
4	266358-1 Line#1-4	45.39	1.42	0.03	54.04	100.87
5	266358-1 Line#1-5	45.89	1.05	0.03	53.84	100.81
6	266358-1 Line#1-6	46.48	0.52	0.04	54.18	101.22
7	266358-1 Line#1-7	46.46	0.32	0.03	53.98	100.79
8	266358-1 Line#1-8	46.54	0.26	0.04	53.95	100.79
9	266358-1 Line#1-9	46.29	0.22	0.05	53.95	100.51
10	266358-1 Line#1-10	46.40	0.60	0.03	54.05	101.08
11	266358-1 Line#1-11	46.90	0.05	0.03	54.06	101.04
12	266358-1 Line#1-12	46.70	0.04	0.04	54.34	101.12
13	266358-1 Line#1-13	46.80	0.13	0.03	54.24	101.19
14	266358-1 Line#1-14	46.77	0.59	0.05	54.09	101.50
15	266358-1 Line#1-15	46.16	0.25	0.04	54.20	100.65
16	266358-1 Line#1-16	46.03	0.69	0.04	53.96	100.71
17	266358-1 Line#1-17	46.56	0.22	0.02	54.03	100.83
18	266358-1 Line#1-18	46.20	0.87	0.03	53.98	101.08
19	266358-1 Line#1-19	46.17	0.87	0.04	53.85	100.93

20	266358-1 Line#1-20	46.11	0.88	0.03	53.96	100.98
21	266358-1 Line#1-21	45.93	0.95	0.05	54.24	101.16
22	266358-1 Line#1-22	46.00	0.97	0.04	53.96	100.97
23	266358-1 Line#1-23	46.39	1.05	0.04	54.21	101.70
24	266358-1 Line#1-24	46.00	1.08	0.05	54.00	101.13
25	266358-1 Line#1-25	46.21	0.92	0.03	54.12	101.28
26	266358-1 Line#1-26	46.54	0.79	0.03	53.98	101.34
27	266358-1 Line#1-27	46.00	0.79	0.03	54.21	101.03
28	266358-1 Line#1-28	45.90	0.79	0.03	54.21	100.93
29	266358-2 Line#2-1	45.67	0.82	0.02	53.76	100.28
30	266358-2 Line#2-2	45.91	0.70	0.04	54.08	100.73
31	266358-2 Line#2-3	45.84	0.60	0.03	54.34	100.81
32	266358-2 Line#2-4	45.87	0.66	0.03	54.30	100.86
33	266358-2 Line#2-5	46.02	0.54	0.04	53.77	100.37
34	266358-2 Line#2-6	45.65	0.46	0.02	53.76	99.89
35	266358-2 Line#2-7	45.99	0.55	0.03	53.81	100.37
36	266358-2 Line#2-8	45.95	0.59	0.02	53.96	100.52
37	266358-2 Line#2-9	45.82	0.64	0.03	54.25	100.75
38	266358-2 Line#2-10	45.42	0.86	0.02	54.11	100.42
39	266358-2 Line#2-11	45.93	0.76	0.03	54.26	100.98
40	266358-2 Line#2-12	46.05	0.35	0.02	54.10	100.52
41	266358-2 Line#2-13	45.77	0.42	0.03	54.40	100.61
42	266358-2 Line#2-14	46.05	0.35	0.02	54.28	100.70
43	266358-2 Line#2-15	46.17	0.24	0.03	54.03	100.47
44	266358-2 Line#2-16	45.98	0.27	0.03	54.05	100.32

45	266358-2 Line#2-17	46.12	0.29	0.03	54.03	100.46
46	266358-2 Line#2-18	46.00	0.26	0.03	54.02	100.31
47	266358-2 Line#2-19	45.80	0.28	0.03	53.60	99.71
48	266358-2 Line#2-20	45.95	0.28	0.02	53.99	100.24
49	266358-2 Line#2-21	46.43	0.26	0.02	54.30	101.02
50	266358-2 Line#2-22	45.75	0.44	0.03	53.96	100.18
51	266358-2 Line#2-23	45.75	0.27	0.05	53.55	99.62
52	266358-2 Line#2-24	45.90	0.39	0.02	53.94	100.26
53	266358-2 Line#2-25	46.65	0.15	0.02	54.19	101.01
54	266358-2 Line#2-26	45.94	0.71	0.02	53.96	100.63
55	266358-2 Line#2-27	45.83	0.89	0.03	54.38	101.12
56	266358-2 Line#2-28	46.11	0.92	0.03	54.07	101.14
57	266358-2 Line#2-29	46.19	0.84	0.03	53.84	100.90
58	266358-2 Line#2-30	46.01	0.63	0.03	53.80	100.47
59	266358-2 Line#2-31	45.85	0.43	0.03	54.17	100.49
60	266358-2 Line#2-32	45.72	0.39	0.02	53.63	99.76
61	266358-2 Line#2-33	45.93	0.33	0.02	54.02	100.30
62	266358-2 Line#2-34	45.86	0.44	0.02	53.85	100.17
63	266358-2 Line#2-35	45.92	0.79	0.02	53.83	100.57
64	266358-2 Line#2-36	45.85	1.00	0.01	54.20	101.06
65	266358-3 Line#3-1	45.86	0.59	0.03	54.45	100.92
66	266358-3 Line#3-2	45.99	0.29	0.03	53.87	100.18
67	266358-3 Line#3-3	45.79	0.24	0.03	54.22	100.28

68	266358-3 Line#3-4	46.16	0.20	0.03	53.93	100.32
69	266358-3 Line#3-5	45.76	0.21	0.02	54.29	100.28
70	266358-3 Line#3-6	46.37	0.18	0.03	54.16	100.74
71	266358-3 Line#3-7	46.08	0.24	0.02	53.85	100.19
72	266358-3 Line#3-8	46.08	0.27	0.04	54.22	100.61
73	266358-3 Line#3-9	45.72	0.30	0.03	54.01	100.05
74	266358-3 Line#3-10	45.87	0.32	0.03	53.82	100.04
75	266358-3 Line#3-11	46.21	0.29	0.03	54.08	100.62
76	266358-3 Line#3-12	45.81	0.23	0.03	54.10	100.17
77	266358-3 Line#3-13	45.46	0.95	0.02	54.05	100.48
78	266358-3 Line#3-14	46.12	0.38	0.03	54.59	101.12
79	266358-3 Line#3-15	46.18	0.52	0.02	54.50	101.23
80	266358-3 Line#3-16	45.77	0.79	0.03	53.91	100.50
81	266358-3 Line#3-17	45.89	0.78	0.03	54.04	100.74
82	266358-3 Line#3-18	45.62	1.02	0.02	54.25	100.91
83	266358-3 Line#3-19	46.21	0.02	0.03	54.26	100.51
84	266358-3 Line#3-20	45.75	0.70	0.03	54.21	100.69
85	266358-3 Line#3-21	45.75	0.68	0.03	54.30	100.76
86	266358-3 Line#3-22	45.07	0.63	0.03	53.92	99.65
87	266358-3 Line#3-23	45.64	0.63	0.02	54.32	100.61
88	266358-3 Line#3-24	45.55	0.72	0.03	54.23	100.53
89	266358-3 Line#3-25	45.18	0.83	0.03	54.30	100.34
90	266358-3 Line#3-26	46.34	0.03	0.03	54.57	100.96

91	266358-3 Line#3-27	45.57	0.75	0.02	54.24	100.58
92	266358-3 Line#3-28	46.06	0.50	0.01	54.10	100.68
93	266358-3 Line#3-29	45.30	0.56	0.03	55.53	101.42
94	266358-3 Line#3-30	46.00	0.43	0.02	54.60	101.05
95	266358-3 Line#3-31	46.03	0.19	0.03	54.36	100.61
96	266358-3 Line#3-32	46.16	0.23	0.03	54.40	100.82
97	266358-3 Line#3-33	45.29	0.77	0.02	54.11	100.20
98	266358-3 Line#3-34	45.41	0.56	0.02	54.10	100.09
99	266358-3 Line#3-35	45.02	0.90	0.02	54.11	100.05
100	266358-3 Line#3-36	45.33	0.52	0.03	54.17	100.05
101	266358-3 Line#3-37	45.16	1.43	0.01	54.30	100.90
102	266358-3 Line#3-38	45.90	0.47	0.03	54.14	100.53
103	266358-3 Line#3-39	45.61	0.78	0.03	54.20	100.62
104	266358-3 Line#3-40	45.06	1.24	0.03	54.43	100.76
105	266358-3 Line#3-41	45.24	0.71	0.03	54.16	100.14
106	266358-3 Line#3-42	45.74	0.73	0.03	54.09	100.58

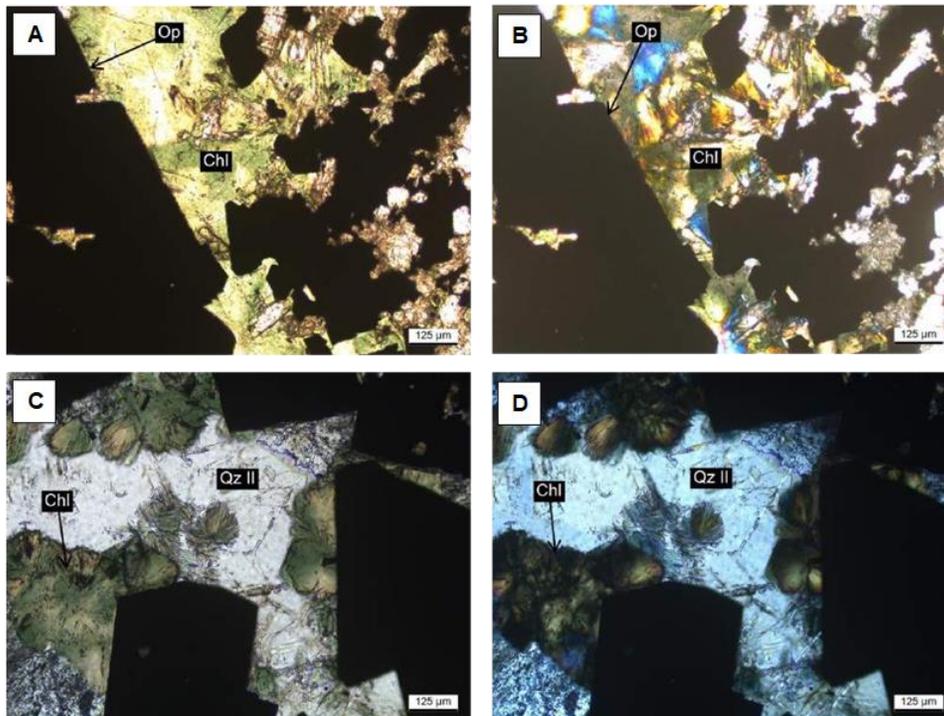
Anexo C: Descripción de Cortes:

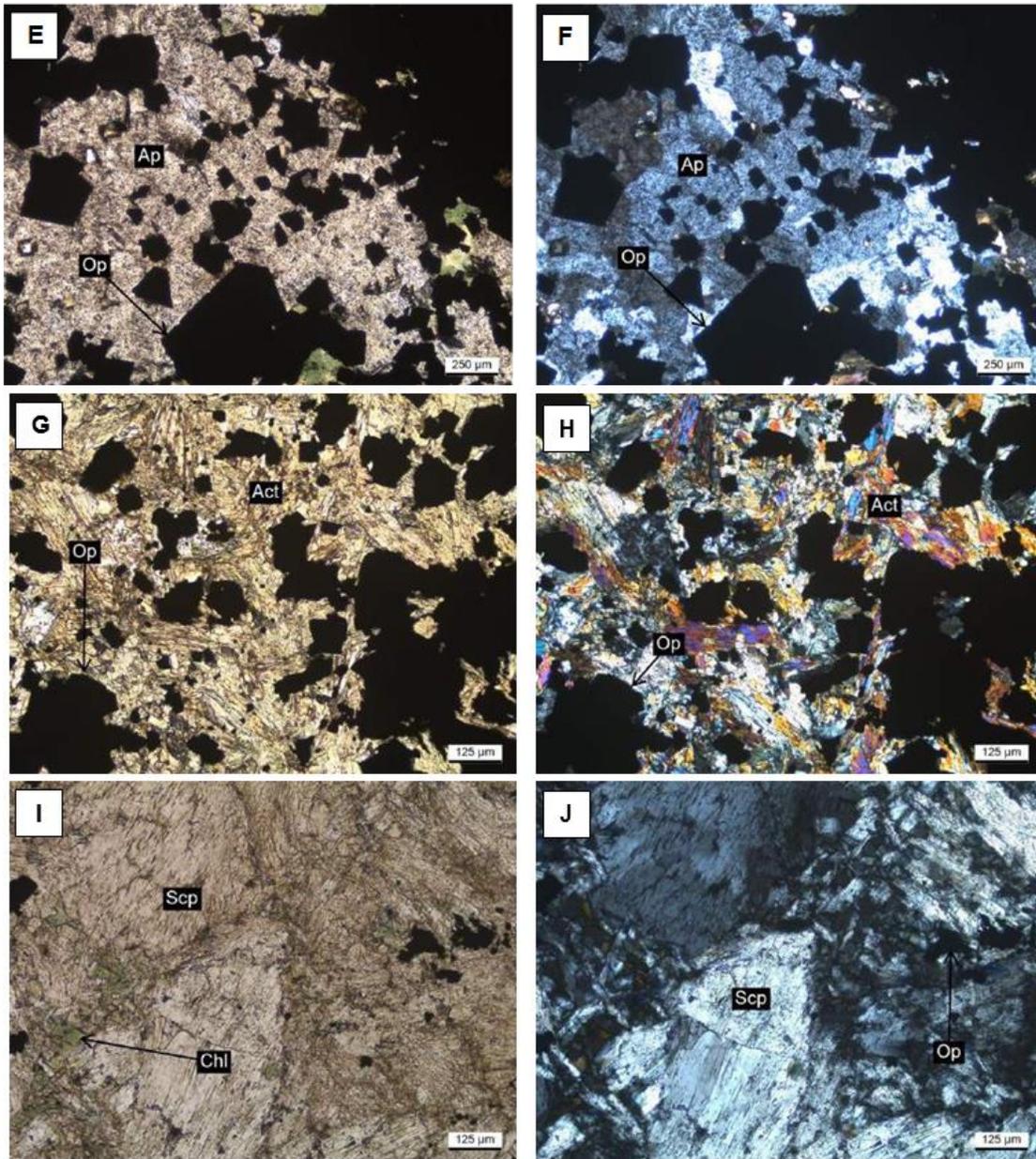
Muestra: 266352				
Descripción Macroscópica/Microscópica				
<p>Roca de color gris oscuro negruzco con un moderado a fuerte magnetismo y una textura masiva compuesta de un agregado de magnetita, actinolita, apatito y cúmulos de pirita.</p> <p>Al microscopio se observa una textura original totalmente obliterada por un agregado pervasivo constituido predominantemente de actinolita, escapolita y minerales metálicos, además de parches de clorita, cuarzo secundario, carbonatos y apatito.</p> <p>La mineralización metálica se encuentra constituida de cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,4 mm, caracterizada por la presencia de pirita, magnetita, calcopirita, hematita y esfalerita. Se reconocen como un componente importante del agregado masivo de reemplazo de la muestra.</p> <p>Dado que la mineralogía primaria se encuentra totalmente obliterada por la asociación anteriormente descrita, no es posible clasificar petrográficamente la muestra.</p>				
Minerales primarios				
Minerales	% Volumen		Características	
No se reconoce la presencia de mineralogía primaria.				
Minerales de alteración				
Minerales	% Volumen		Características	
Clorita	4		Cristales radiales que comúnmente se encuentran formando agregado cumulares, reconocidos como parches dentro de la sección.	
Actinolita	14		Cristales subhedrales prismáticos de tamaño medio 0,5 mm, presentes como un componente importante del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria, preferentemente asociado a magnetita.	
Cuarzo secundario	2		Cristales anhedrales observados como un relleno de espacios entre cristales de actinolita, clorita y magnetita.	
Apatito	9		Ocurren como cristales subhedrales prismáticos de tamaño medio 0,5 mm, los que se encuentran formando agregados cumulares dentro de la sección, preferentemente asociados a magnetita.	
Escapolita	17		Cristales subhedrales prismáticos y agregados anhedrales alargados reconocidos como un constituyente importante del reemplazo de la mineralogía primaria en la sección. En algunos casos se asocia a pequeños cristales de calcopirita.	
Carbonatos	1		Se presentan como cristales anhedrales en forma de parches, en un volumen subordinado en la muestra.	
Opacos	53		Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,4 mm, caracterizados por la presencia de pirita, magnetita, calcopirita, hematita y esfalerita. Se reconocen como un componente importante del agregado masivo de reemplazo de la muestra.	
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia

Pirita		72	72	Se presentan como cristales anhedrales a subhedrales diseminados en la sección, exhibiendo texturas de relleno de espacios abiertos en magnetita y en ocasiones en compañía de calcopirita como relleno de espacios abiertos (calcopirita en pirita). En los cristales de mayor tamaño es posible reconocer una débil anisotropía, generada posiblemente por la presencia de elementos afines con el Fe, como Co y/o Ni.
Magnetita		24	24	Ocurre como cristales anhedrales formando preferentemente un agregado masivo que reemplaza la mineralogía primaria en la muestra, en conjunto con cristales de actinolita y escapolita. Se asocia a pirita en texturas de relleno de espacios abiertos (pirita en magnetita) y a esfalerita en textura de contacto simple. Presenta también un incipiente reemplazo en bordes y debilidades por hematita (martitización).
Esfalerita		2	2	Cristales anhedrales a subhedrales que se encuentran asociados generalmente a cristales de magnetita en texturas de contacto simple.
Calcopirita		1	1	Pequeños cristas anhedrales que se presentan como diseminaciones en la sección (asociados en algunos casos a escapolita) y también como relleno de espacios abiertos en vetillas.

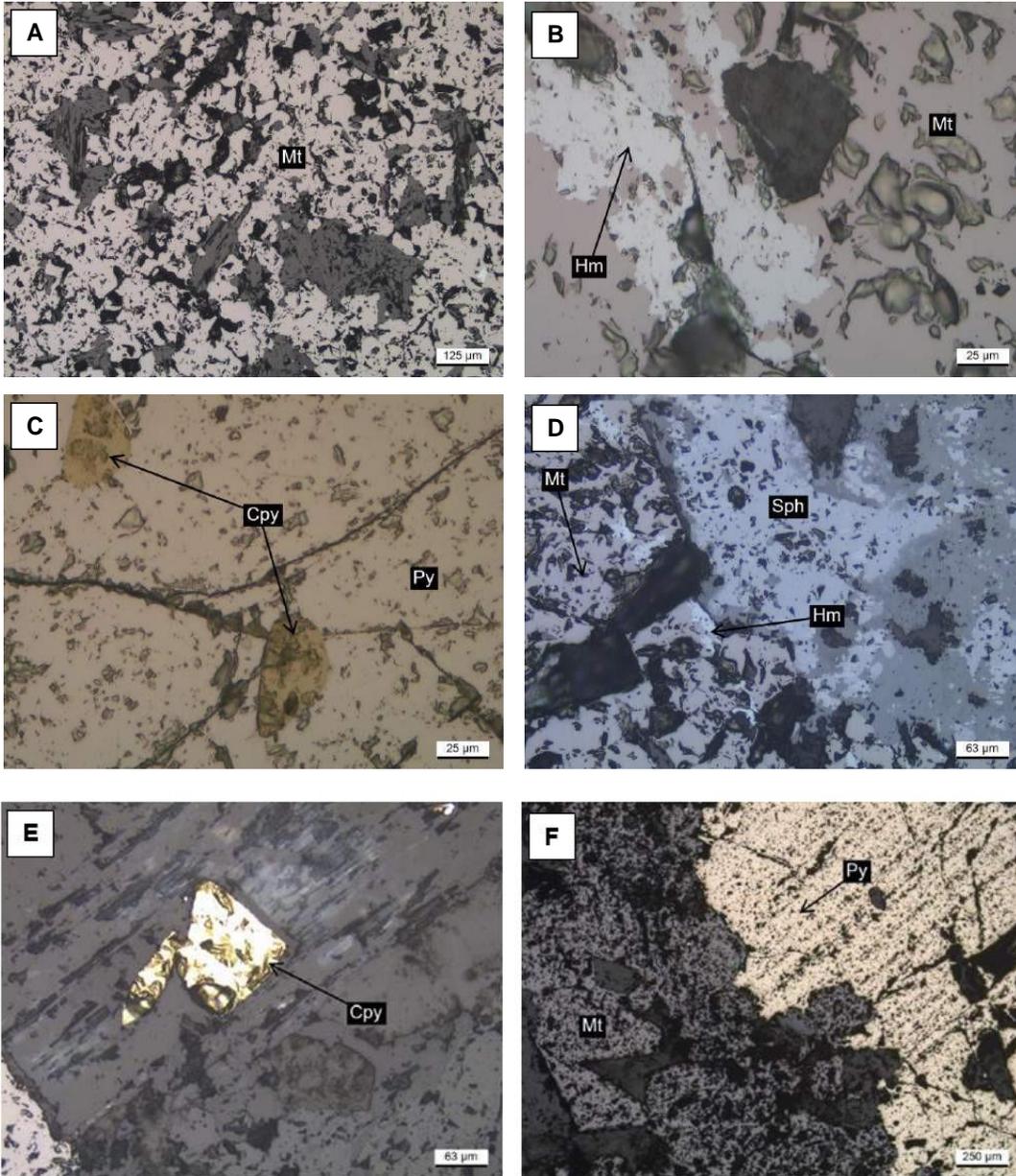
FOTOMICROGRAFIAS

Corte Pulido





Muestra 266352: (A), (B) Cristales radiales de clorita junto a magnetita, nicols paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (C), (D) Cuarzo secundario asociado a parches de clorita y minerales metálicos, nicols paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (E), (F) Agregado cristalino de apatito, nicols paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (G), (H) Cristales prismáticos de actinolita junto a minerales opacos, nicols paralelos y cruzados respectivamente, 100X.
Luz reflejada



Muestra 266352: (A) Magnetita masiva, luz reflejada, 100X. (B) Magnetita exhibiendo un reemplazo en bordes y debilidades por hematita, luz reflejada, 500X. (C) Calcopirita relleno de espacios abiertos en pirita, luz reflejada, 500X. (D) Esfalerita en contacto simple con magnetita martitizada, luz reflejada, 200X. (E) Calcopirita diseminada asociada a cristales de escapolita, luz reflejada, 200X. (F) Pirita relleno de espacios abiertos en magnetita, luz reflejada, 50X.

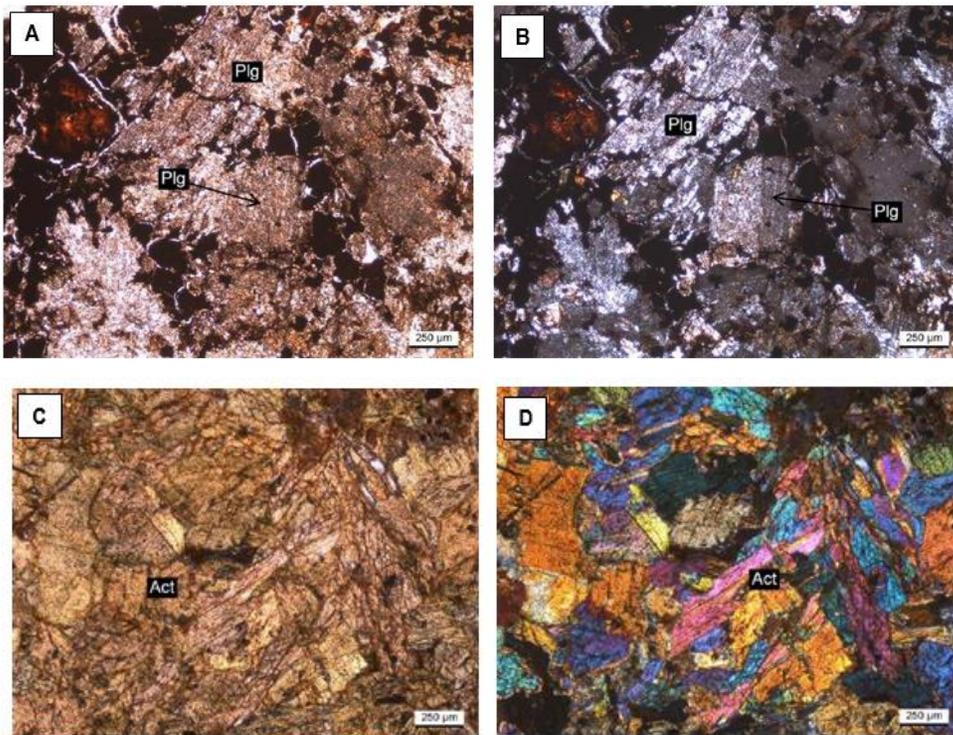
Muestra: 266356
Descripción Macroscópica/Microscópica
Roca de color gris negruzco, un fuerte magnetismo y una textura masiva, generada por un fuerte reemplazo por un agregado de magnetita, feldespatos potásicos, epidota y pirita subordinada.

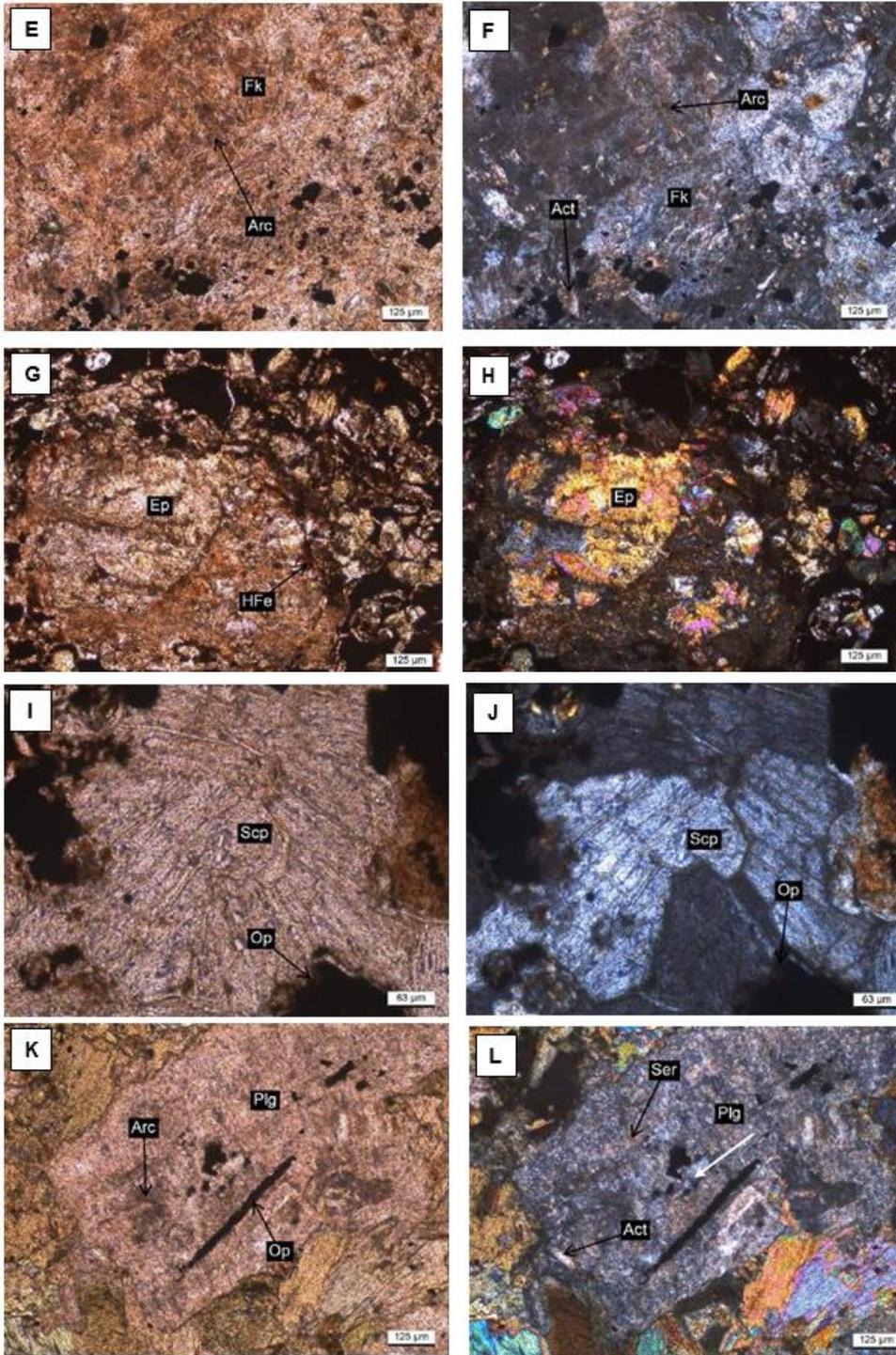
Al microscopio se reconoce una textura original casi totalmente obliterada por un agregado de minerales metálicos junto a actinolita, feldespatos potásicos, hidróxidos de hierro y epidota. No obstante, en algunos sectores es posible apreciar cristales relictos de plagioclasas de tamaño uniforme, lo que podría indicar una textura hipidiomórfica granular preexistente. Las plagioclasas exhiben una moderada a fuerte argilización y moderada sericitización, además de parches de epidota, actinolita e impregnaciones de minerales opacos. La muestra se encuentra cortada por algunas vetillas finas de magnetita martitizada, con un espesor que, en algunos sectores, alcanza los 0,5 mm. La alteración se compone de una moderada a fuerte argilización y moderada sericitización selectivas, además de actinolita, escapolita, epidota y esfeno como un reemplazo importante de la mineralogía primaria. La mineralización metálica se encuentra constituida de cristales anhedrales a subhedrales de tamaño variable entre <0,1 y 1,3 mm, caracterizados por la presencia de magnetita, pirita, calcopirita y hematita. Ocurre como un componente del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria y también como un constituyente de las vetillas finas. Dado que gran parte de las características texturales y mineralógicas primarias se encuentran obliteradas por el agregado anteriormente descrito, no es posible realizar una clasificación petrográfica de la muestra. No obstante, el reconocimiento de cristales de plagioclasas subhedrales de tamaño similar, podría indicar un origen ígneo intrusivo de probable composición diorítica

Minerales primarios				
Minerales	% Volumen		Características	
Plagioclasas	13		Se presentan como cristales subhedrales de tamaño medio 1,2 mm, afectados por una moderada a fuerte argilización y moderada sericitización, además de parches de epidota, actinolita e impregnaciones de minerales opacos.	
Minerales de alteración				
Minerales	% Volumen		Características	
Sericita	3		Ocurre como un agregado microcristalino a fibroso reconocido como una alteración moderada de plagioclasas.	
Arcillas	6		Material criptocristalino indeterminado que se presenta como una alteración moderada a fuerte de plagioclasas y también de feldespatos potásicos secundarios.	
Actinolita	54		Cristales subhedrales prismáticos presentes como: Parches y agregados cumulares masivos dentro de la muestra, acompañados en ocasiones de esfeno. Cristales implantados en plagioclasas.	
Epidota	1		Cristales anhedrales de tamaño medio 0,2 mm, los que se encuentran como: Parches dentro de la sección. Cristales implantados escasamente en plagioclasas.	
Escapolita	1		Cristales anhedrales a subhedrales prismáticos y tabulares, los que se presentan en forma de agregados cumulares, rellenando espacios entre minerales metálicos.	
Feldespato potásicos	11		Cristales anhedrales a subhedrales afectados por una moderada a fuerte argilización y que se encuentran formando agregados cumulares, asociados a finos cristales de actinolita.	
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia

Magnetita	25	69	94	Se presentan como cristales anhedrales a subhedrales diseminados, formando agregados cumulares con actinolita y también como constituyente de algunas vetillas finas. Comúnmente se encuentran reemplazados, a partir de los bordes y debilidades, por hematita (martitización). En algunos casos se asocia a pirita y calcopirita en texturas de relleno de espacios abiertos (en magnetita).
Pirita		2	2	Ocurre como cristales anhedrales a subhedrales diseminados en la sección, relleno ocasionalmente espacios abiertos en magnetita martitizada.
Calcopirita		1	1	Pequeños cristales anhedrales diseminados en la muestra, comúnmente asociados a magnetita en texturas de relleno de espacios abiertos.
Hematita	1	2	3	Se presenta como un reemplazo de cristales de magnetita a partir de los bordes y debilidades cristalinas (martitización).

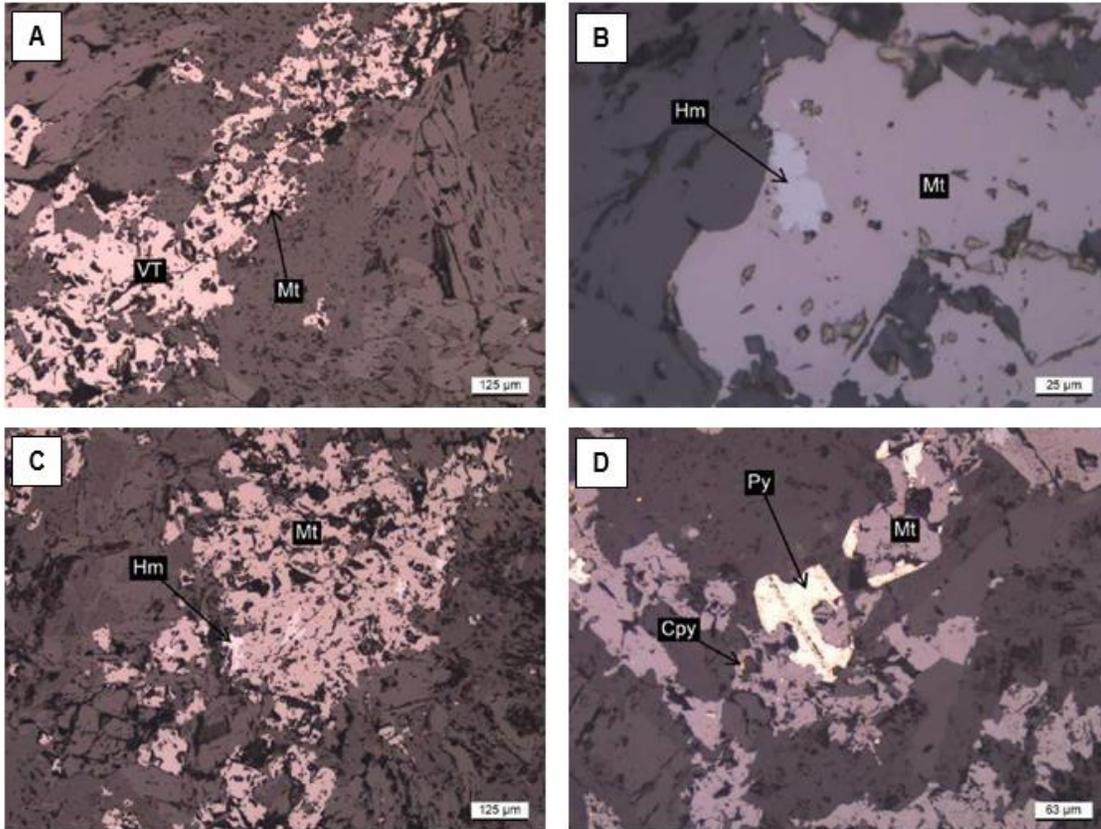
Luz transmitida





Muestra 266356: (A), (B) Esbozos de una textura hipidiomórfica granular compuesta de relictos de plagioclasas, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (C), (D) Agregado cumular masivo de actinolitas, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (E), (F) Cúmulo de feldspatos potásicos moderado a fuertemente argilizados, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (G), (H) Parches de epidota, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (I), (J) Agregado cumular de escapolitas relleno de espacios entre minerales metálicos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 200X. (K), (L) Detalle de cristal de plagioclase afectado por una moderada a fuerte argilización,

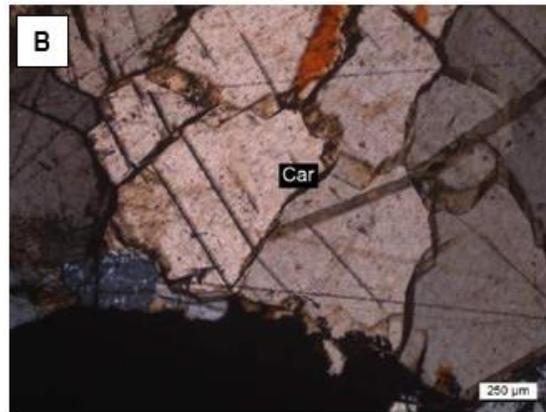
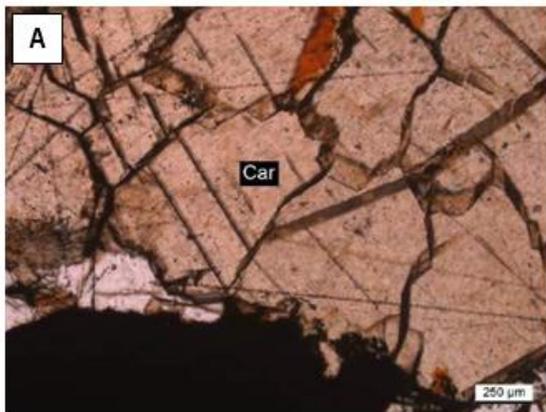
moderada sericitización, parches de actinolita e impregnaciones de minerales opacos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X.

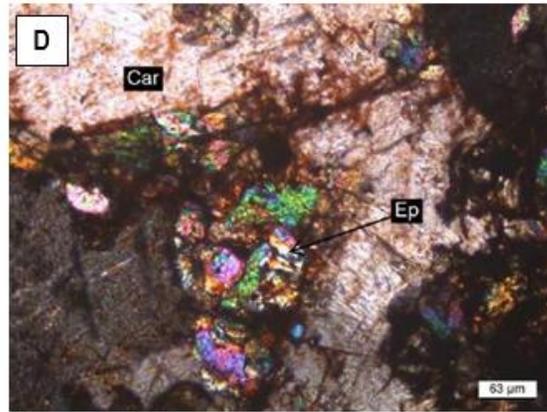
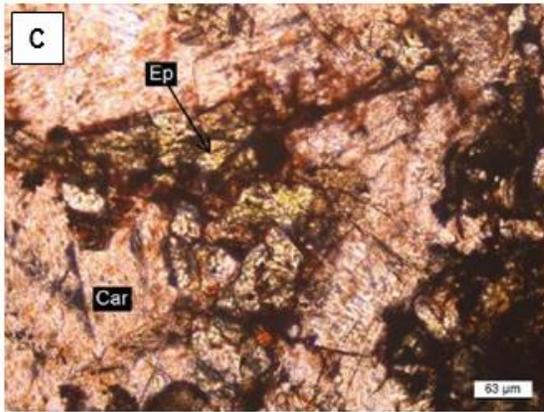


Muestra 266356: (A) Vetilla compuesta de magnetita martitizada, luz reflejada, 100X. (B) Magnetita reemplazada en bordes y debilidades por hematita, luz reflejada, 500X. (C) Magnetita martitizada asociada a agregados cumulares con actinolita, luz reflejada, 100X. (D) Pirita y calcopirita relleno espacios abiertos en magnetita, luz reflejada, 200X.

Muestra: 266357		
Microfotografía		
Descripción Macroscópica/Microscópica		
Roca de color gris pardo con un leve magnetismo y una textura original no reconocible debido a una mineralización masiva de pirita y un reemplazo por carbonatos. Al microscopio se observa una textura totalmente obliterada por un agregado masivo de minerales metálicos y carbonatos, además de epidota subordinada. La mineralización metálica está caracterizada por la presencia de cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 2 mm, representados por la presencia de pirita, magnetita y hematita ± calcopirita y calcosina, los que obliteran de forma masiva las características primarias de la muestra. Dado que la totalidad de la mineralogía primaria se encuentra reemplazada por el agregado anteriormente descrito, no es posible clasificar la roca.		
Minerales primarios		
Minerales	% Volumen	Características
No se observa mineralogía primaria.		
Minerales de alteración		
Minerales	% Volumen	Características
Carbonatos	6	Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,4 mm, relleno espacios entre minerales metálicos.

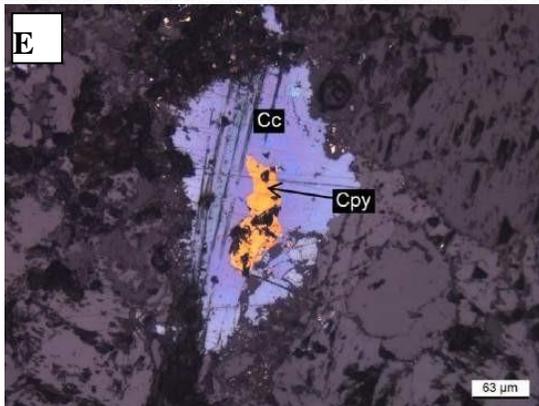
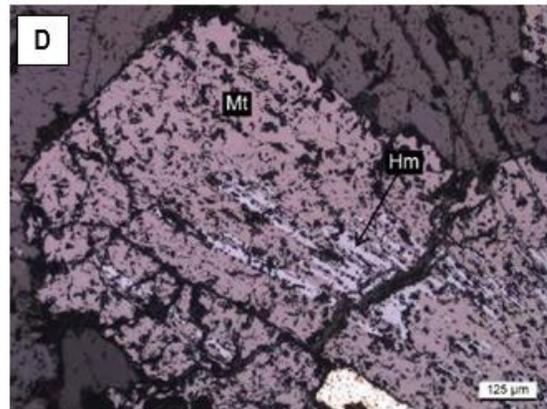
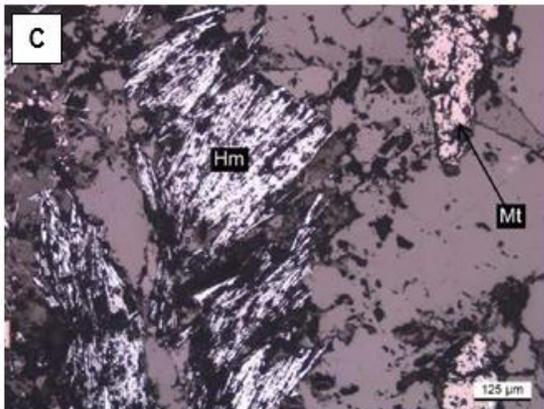
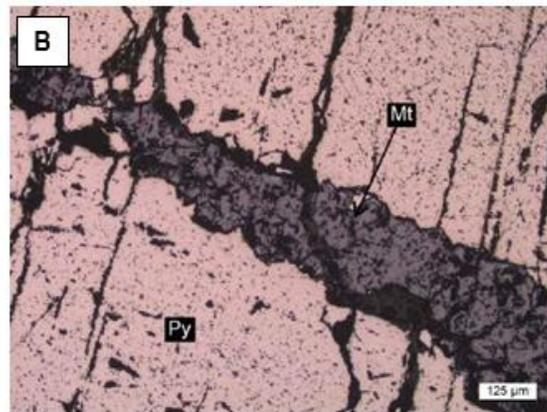
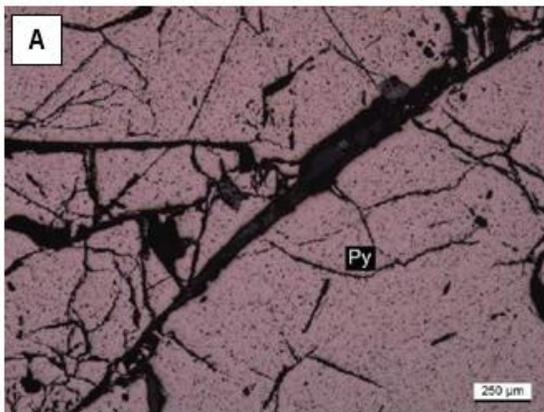
Epidota	<1			Se presentan como cristales anhedrales de tamaño medio 0,1 mm, observados como parches en un volumen subordinado en la sección.
Opacos	94			Cristales subhedrales de tamaño medio 2 mm, caracterizados por la presencia de pirita, magnetita y hematita ± calcopirita y calcosina. Obliteran de forma masiva las características primarias de la muestra.
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia
Pirita		91	91	Se presentan como cristales subhedrales con una marcada anisotropía, distribuidos de forma masiva en la sección. Se asocian a magnetita como relleno de espacios abiertos (magnetita en pirita).
Magnetita		6	6	Ocurre como cristales anhedrales que rellenan espacios en pirita y comúnmente se encuentran como un reemplazo de hematita a partir de los bordes (mushketovitización).
Calcosina		<1	<1	Se asocia a calcopirita en texturas de reemplazo a partir de los bordes, diseminados en la muestra.
Calcopirita		<1	<1	Pequeños cristales anhedrales diseminados dentro de la sección y reemplazados a partir de los bordes por calcosina.
Hematita		3	3	Ocurre como cristales subhedrales de hábito acicular, formando, comúnmente, agregados cumulares y reemplazados a partir de los bordes por magnetita (mushketovitización).





Muestra 266357: (A), (B) Agregado cumular de cristales de carbonatos, relleno de espacios entre minerales metálicos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (C), (D) Parches de epidota asociados a carbonatos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 200X.

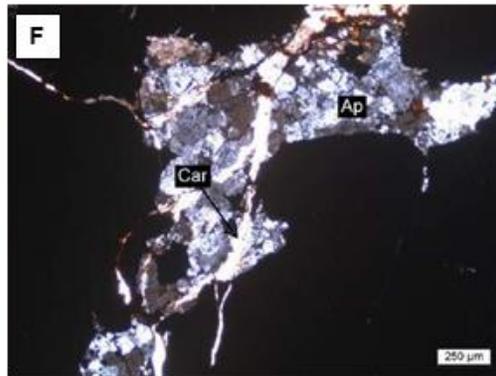
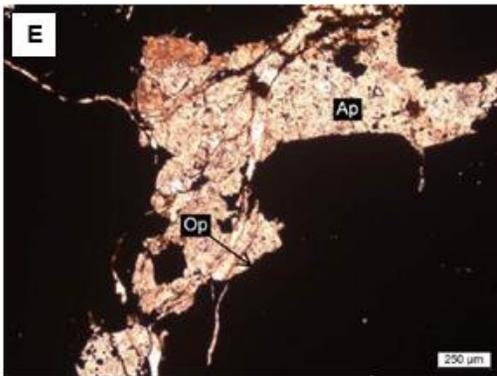
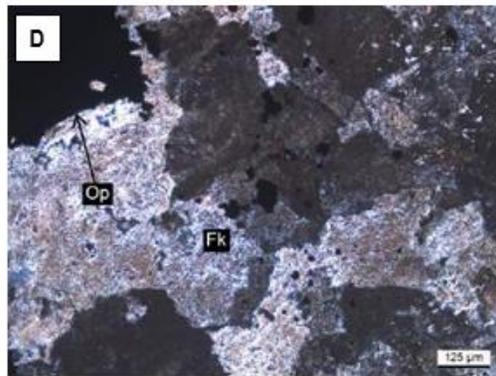
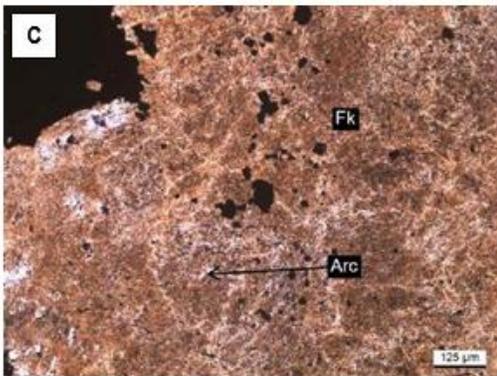
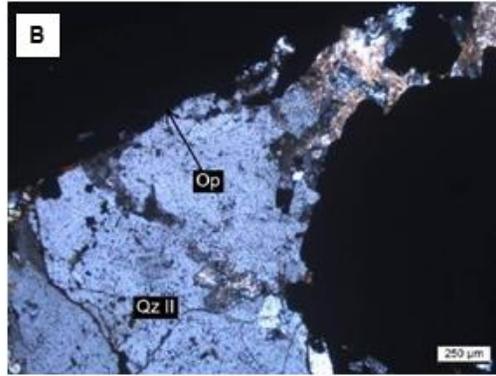
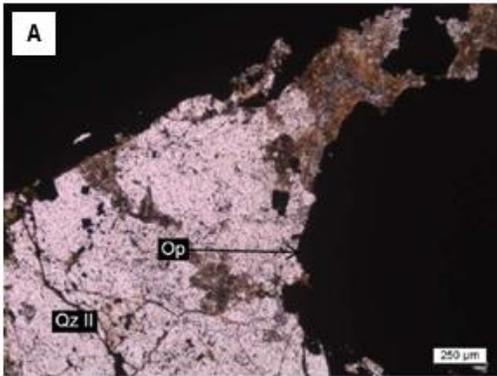
Luz transmitida

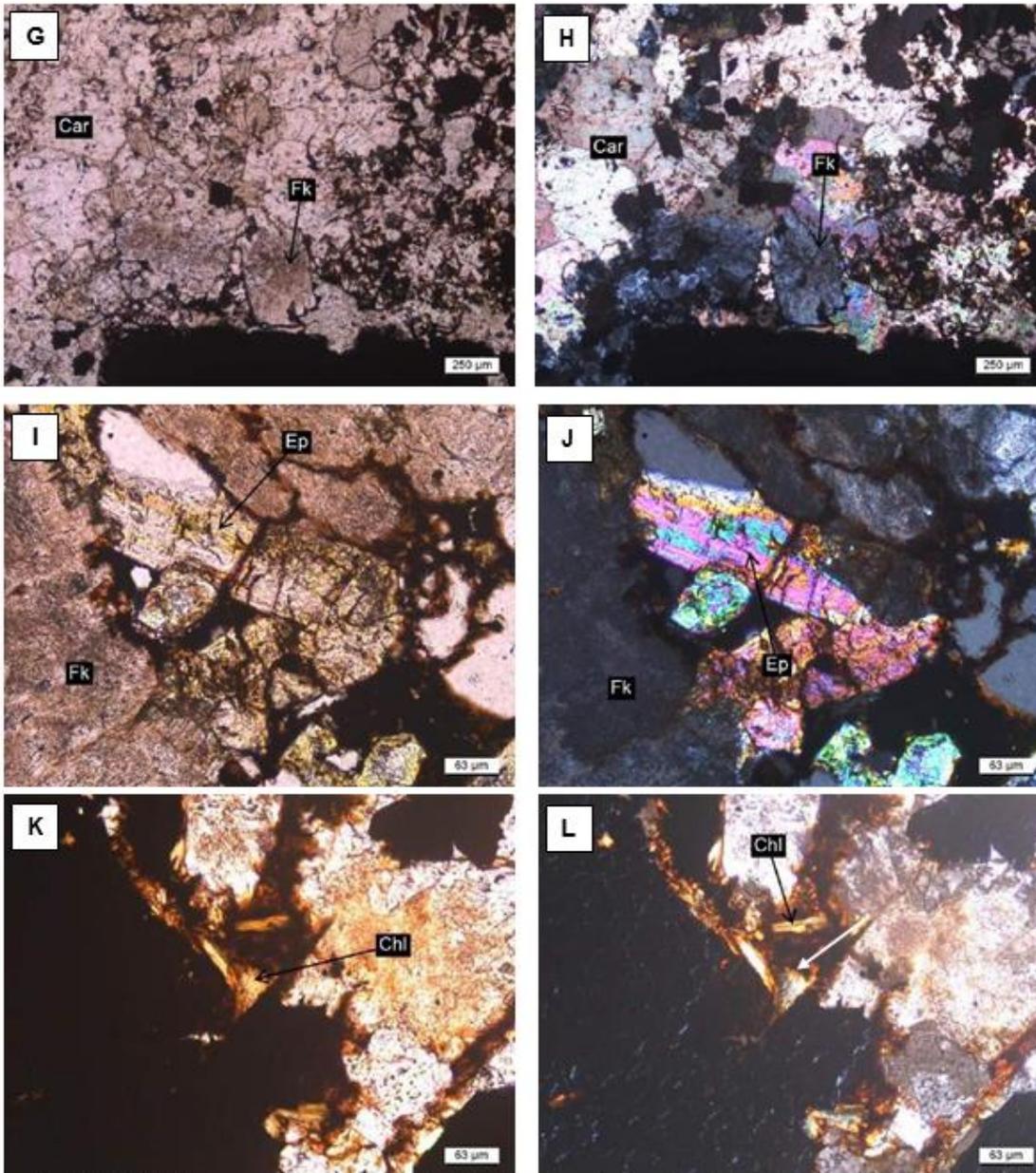


Muestra 266357: (A) Cristales de pirita masivos, luz reflejada, 50X. (B) Magnetita relleno de espacios abiertos en pirita, luz reflejada, 100X. (C) Hematita acicular, luz reflejada, 100X. (D) Reemplazo de hematita por magnetita a partir de los bordes, luz reflejada, 100X. (E) Calcopirita reemplazada a partir de los bordes por calcosina, luz reflejada, 200X.

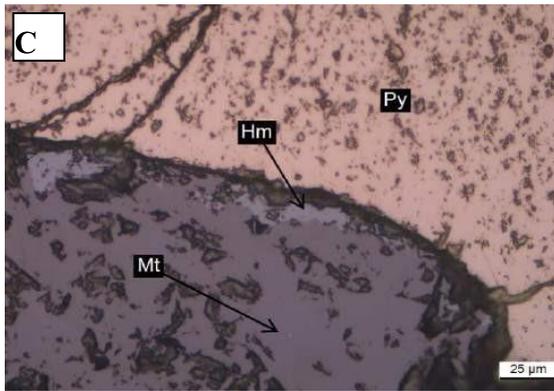
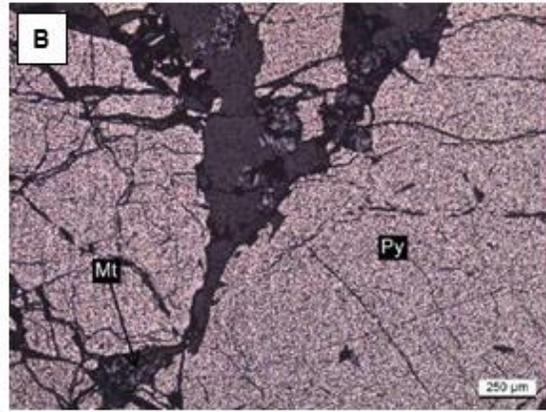
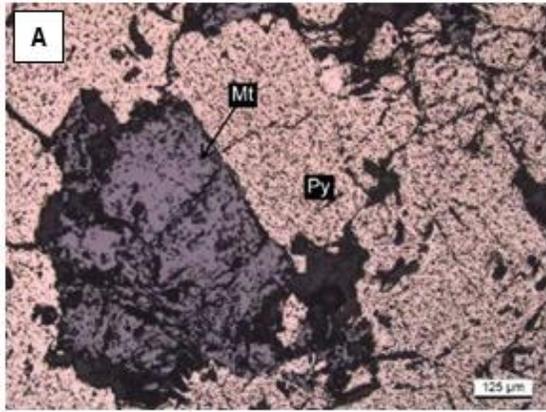
Muestra: 266358				
Descripción Macroscópica/Microscópica				
<p>Roca de color gris oscuro con tonos rosáceos, un moderado magnetismo y una textura totalmente obliterada por un agregado de cuarzo, epidota, feldespato potásico, pirita y magnetita.</p> <p>Al microscopio es posible corroborar una textura original totalmente obliterada por un agregado masivo constituido de cuarzo secundario, apatito, carbonatos, epidota, feldespatos potásicos y minerales metálicos.</p> <p>La muestra se encuentra cortada por algunas fracturas finas de espesor medio 0,2 mm, rellenas en su totalidad de carbonatos. Por su parte la mineralización metálica se compone de cristales subhedrales de tamaño que en algunos casos alcanza los 4 mm, caracterizados por la presencia de magnetita y pirita \pm hematita, los que representan parte importante del agregado masivo. Dado que la totalidad de la mineralogía primaria se encuentra obliterada por el agregado anteriormente descrito, no es posible realizar una clasificación petrográfica de la muestra.</p>				
Minerales primarios				
Minerales	% Volumen		Características	
No se reconoce la presencia de mineralogía primaria en la sección.				
Minerales de alteración				
Minerales	% Volumen		Características	
Cuarzo secundario	12		Se presenta como un agregado anhedral y en ocasiones policristalino que ocurren como un componente del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria.	
Epidota	2		Ocurren como cristales anhedrales a subhedrales prismáticos reconocidos como parches dentro de la muestra.	
Feldespato potásico	14		Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,2 mm, los que exhiben una moderada a fuerte argilización y que se presenta como un constituyente importante del agregado de reemplazo.	
Clorita	1		Ocurren como cristales anhedrales y comúnmente parches radiales presentes en un volumen subordinado.	
Carbonatos	3		Cristales anhedrales de tamaño variable que se presentan como: Parches y agregados cumulares distribuidos heterogéneamente dentro del agregado de reemplazo. Relleno de fracturas irregulares.	
Apatito	2		Cristales anhedrales a subhedrales reconocidos como cúmulos dentro de la sección.	
Arcillas	2		Material criptocristalino indeterminado que altera a los cristales de feldespatos potásicos.	
Opacos	63		Cristales subhedrales de tamaño que en algunos casos alcanza los 4 mm, caracterizados por la presencia de magnetita y pirita \pm hematita, los que representan parte importante del agregado masivo.	
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia
Pirita		85	85	Se presentan como cristales subhedrales. Exhiben una marcada anisotropía. Se asocia a magnetita en texturas de relleno de espacios abiertos (magnetita en pirita).
Magnetita		14	14	Ocurre como cristales anhedrales a subhedrales diseminados. Frecuentemente rellenan espacios abiertos en pirita. Subordinadamente es reemplazada por hematita a partir de bordes (martitización).

Hematita		1	1	Se presenta como un reemplazo de magnetita a partir de los bordes (martitización).
----------	--	---	---	--





Muestra 266358: (A), (B) Cuarzo secundario como reemplazo de la mineralogía primaria junto con minerales metálicos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (C), (D) Agregado de feldespatos potásicos afectados por una moderada a fuerte argilización, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (E), (F) Agregado de cristales de apatito junto a minerales metálicos. Se observan además algunas fracturas rellenas con carbonatos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (G), (H) Parches de carbonatos junto a feldespatos potásicos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (I), (J) Parches de epidota, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 200X. (K), (L) Cristales de clorita observados en algunos sectores de la sección, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 200X.

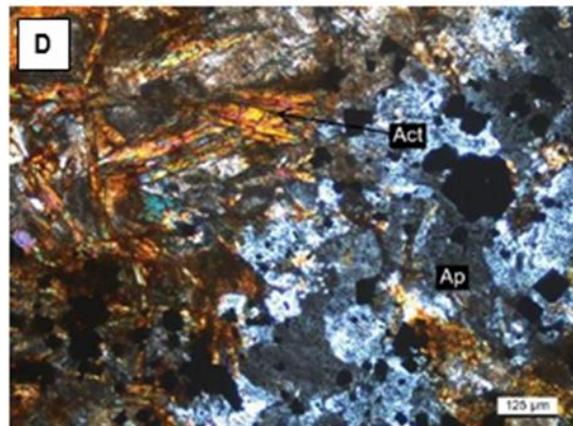
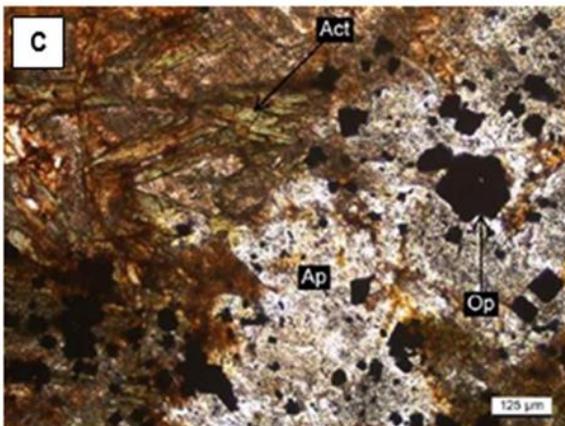
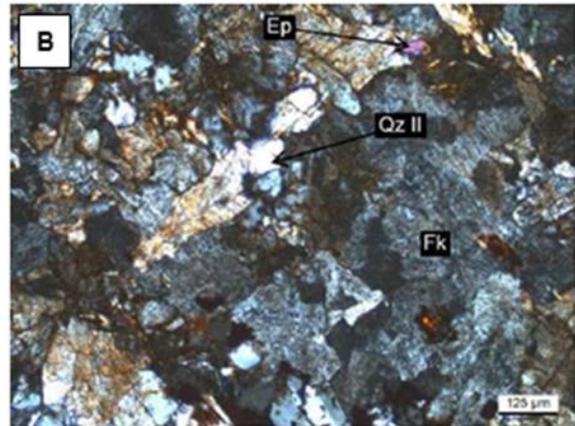
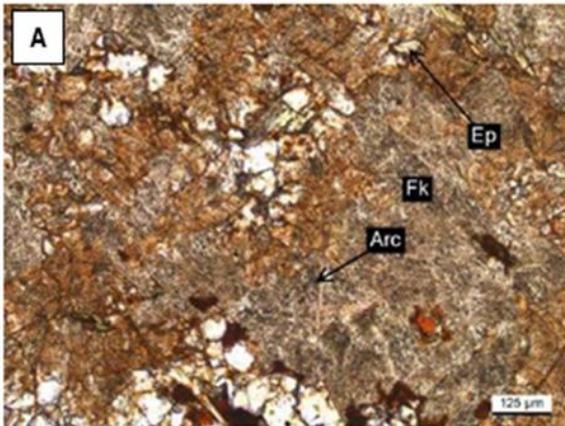


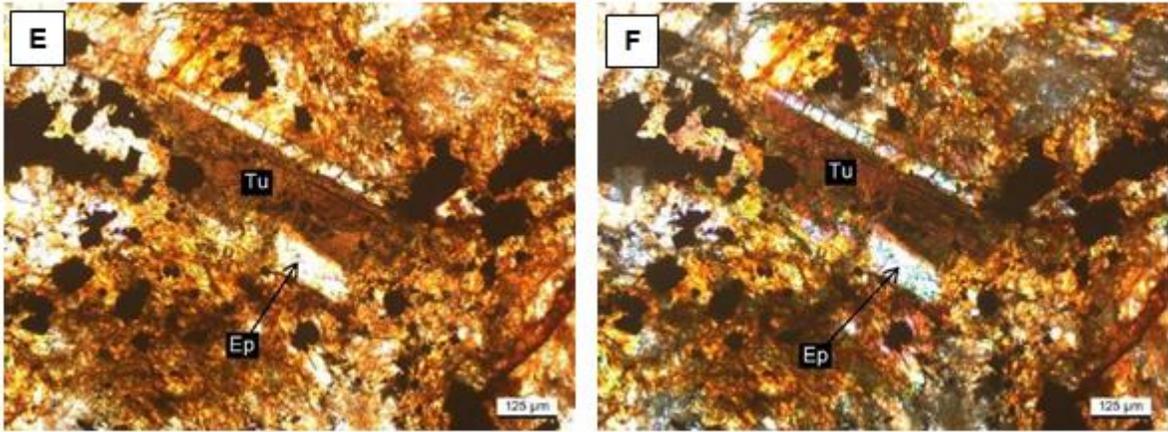
Muestra 266358: (A) Cristales de magnetita relleno de espacios abiertos en pirita, luz reflejada, 100X. (B) Cristales anisotropos de pirita, luz reflejada, 50X. (C) Magnetita reemplazada en bordes por hematita, en el contacto con pirita, luz reflejada, 500X.

Muestra: 266359		
Descripción Macroscópica/Microscópica		
Roca de color gris con un moderado a fuerte magnetismo y una textura original totalmente obliterada por un agregado de actinolita, pirita y magnetita. Cortando la muestra es posible observar vetillas de magnetita.		
Al microscopio se reconoce una textura totalmente obliterada por un agregado masivo compuesto de actinolita, apatito, epidota, carbonatos, cuarzo secundario, feldespatos potásicos y turmalina, además de magnetita y pirita de menor tamaño que las vetillas.		
La muestra se encuentra cortada por una vetilla de forma irregular y espesor medio 0,5 mm constituida casi en su totalidad de magnetita, además de un volumen subordinado de pirita.		
La mineralización metálica está constituida de cristales anhedral a subhedral de tamaño variable entre <0,1 y 1 mm, caracterizados por la presencia de magnetita y pirita ± hematita. Ocurren como un componente del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria en la sección y también como un constituyente exclusivo de la vetilla (magnetita ± pirita). Los hidróxidos de hierro a su vez se presentan como parches distribuidos heterogéneamente en la roca.		
Dado que la totalidad de la mineralogía primaria se encuentra obliterada por el agregado anteriormente descrito, no es posible realizar una clasificación petrográfica de la muestra.		
Minerales primarios		
Minerales	% Volumen	Características
No se observa mineralogía primaria.		
Minerales de alteración		
Minerales	% Volumen	Características
Actinolita	20	Cristales subhedral prismáticos presentes como un componente importante del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria.

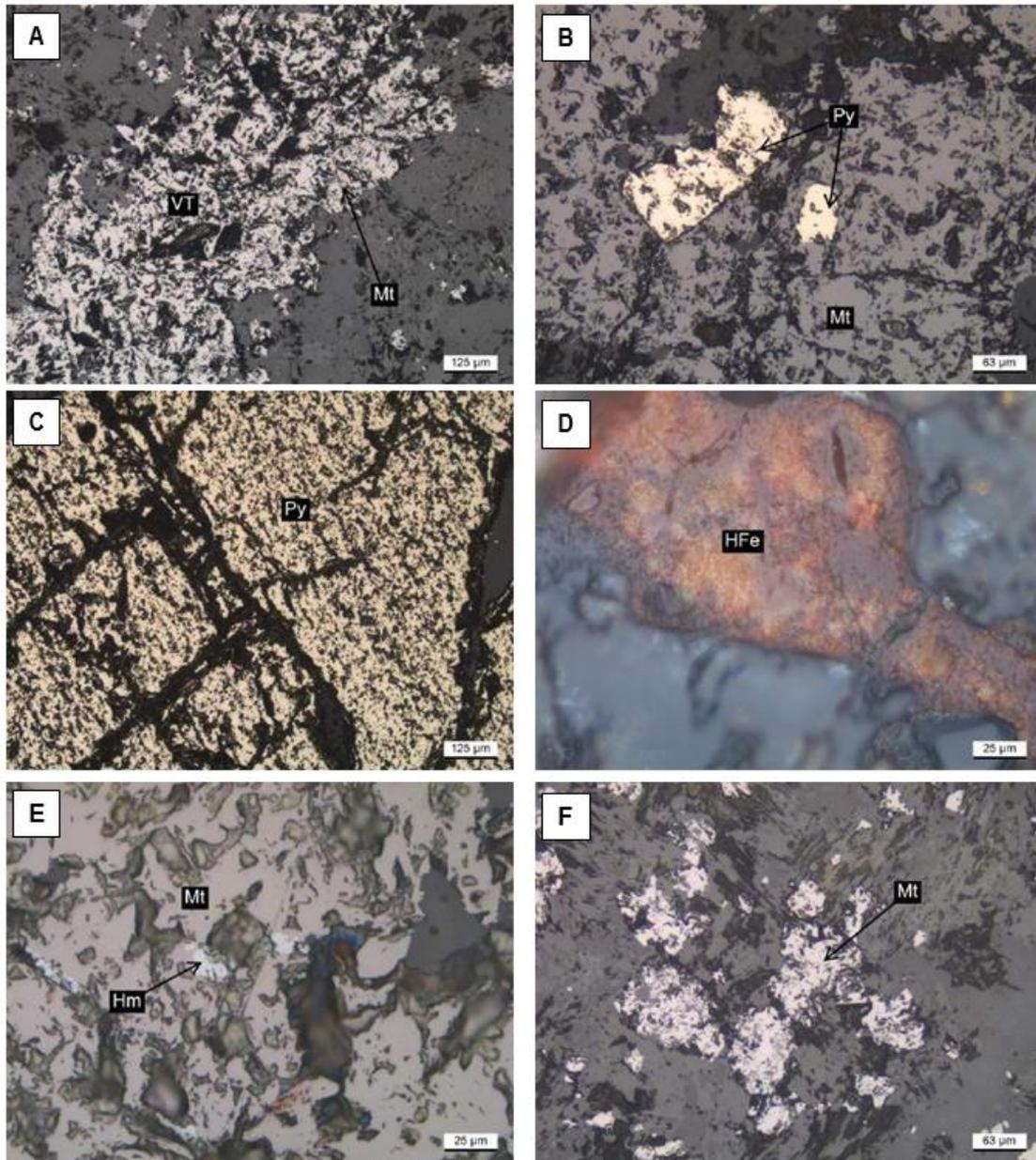
Feldespatos potásicos	33	Cristales anhedrales a localmente subhedrales presentes como un constituyente del agregado masivo, exhibiendo a su vez una moderada a fuerte argilización.		
Cuarzo secundario	3	Agregado policristalino reconocido en algunos sectores dentro de la sección en forma de cúmulos.		
Epidota	1	Cristales anhedrales a subhedrales que se reconocen como parches en la muestra, reconociéndose en algunos casos como un sobrecrecimiento a partir de los bordes de turmalina.		
Arcillas	5	Material criptocristalino indeterminado asociado a cristales de feldespatos potásicos como una alteración moderada a fuerte.		
Apatito	3	Cristales subhedrales de hábito prismático y tamaño medio 0,4 mm, los que se reconocen como parches y agregados cumulares en algunos sectores de la muestra, asociados a pequeños cristales de magnetita.		
Turmalina	1	Ocurre como cristales subhedrales prismáticos de tamaño medio 0,3 mm, presentes en un volumen subordinado dentro de la sección. En ocasiones se asocian a epidota como un sobrecrecimiento a partir de los bordes.		
Carbonatos	1	Cristales anhedrales a subhedrales que ocurren como parches dentro de la muestra, asociados comúnmente a magnetita.		
Opacos	31	Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño variable entre <0,1 y 1 mm, caracterizados por la presencia de magnetita y pirita ± hematita. Ocurren como: Componente del agregado de reemplazo de la mineralogía primaria en la sección. Constituyente exclusivo de la vetilla (magnetita ± pirita).		
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia
Pirita		71	71	Se presentan como cristales anhedrales a subhedrales formando parte del agregado de reemplazo y también como un constituyente menor dentro de la vetilla. Los cristales de mayor tamaño presentan una leve anisotropía y se encuentran en general formando agregados cumulares en la sección, mientras que los de menor tamaño rellenan espacios abiertos en magnetita y no exhiben anisotropía, al igual que los constituyentes de la vetilla.
Magnetita	6	22	28	Ocurre como cristales anhedrales a subhedrales formando parte del agregado masivo de reemplazo, en conjunto con actinolita y feldespatos potásicos. En algunos casos se asocia a pirita en textura de relleno de espacios abiertos y exhibe además un incipiente reemplazo por hematita a partir de los bordes y debilidades (martitización).

Hematita		1	<1	Se presenta exclusivamente como un reemplazo de cristales de magnetita a partir de los bordes y debilidades (martitización).
Hidróxidos de hierro		1	1	Ocurre como un agregado anhedral y comúnmente pulverulento que se presenta como parches dentro de la sección.





Muestra 266359: (A), (B) Agregado de feldspatos potásicos junto a cuarzo secundario y parches finos de epidota, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (C), (D) Parches de apatito junto a actinolita y minerales opacos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (E), (F) Cristal prismático de turmalina exhibiendo un sobrecrecimiento de epidota a partir de los bordes, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X.



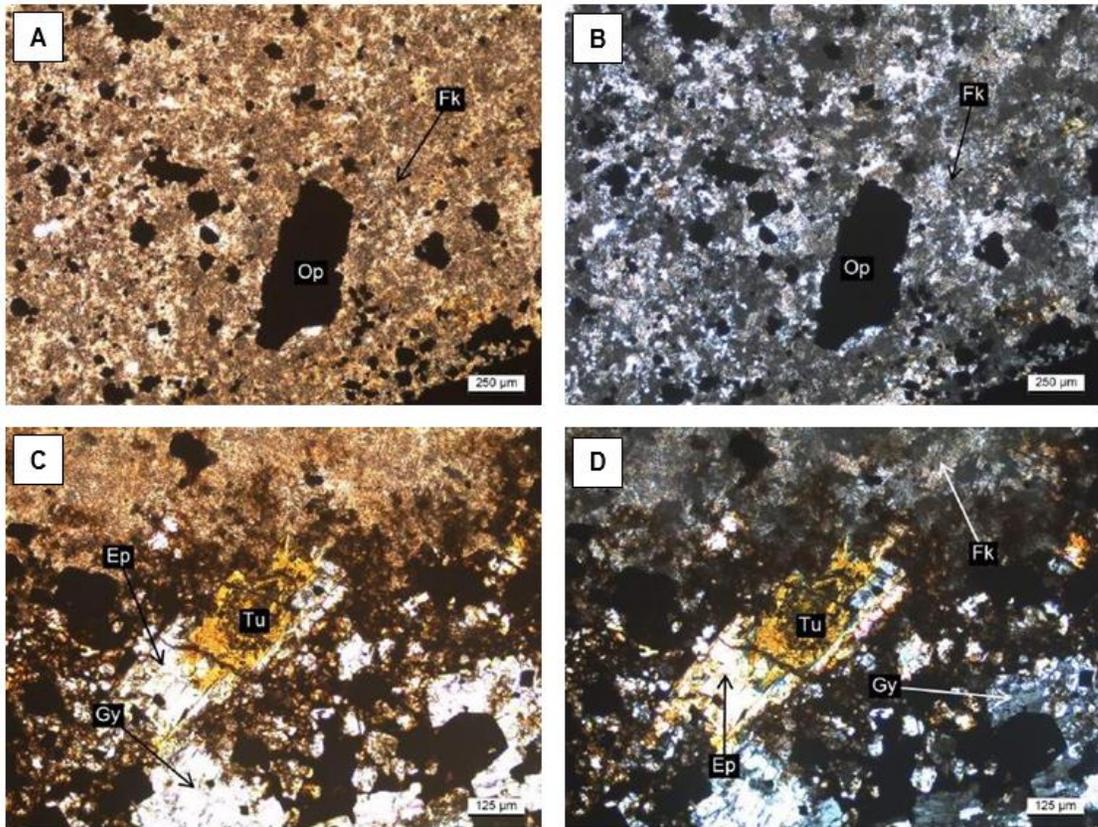
Muestra 266359: (A) Vetilla compuesta de magnetita, luz reflejada, 100X. (B) Pirita relleno de espacios abiertos en cristales de magnetita, luz reflejada, 200X. (C) Pirita masiva exhibiendo una débil anisotropía, luz reflejada, 100X. (D) Hidróxidos de hierro como parches en la sección, luz reflejada, 500X. (E) Hematita reemplazando en bordes y debilidades a magnetita, luz reflejada, 500X. (F) Cristales de magnetita asociados a actinolita, luz reflejada, 200X.

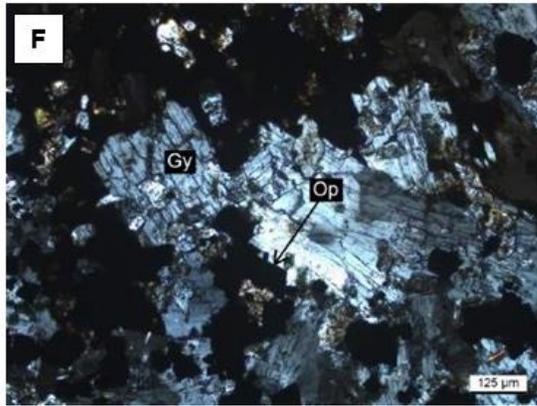
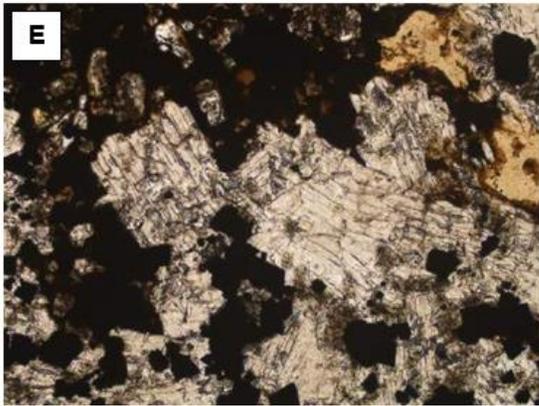
Muestra:266360
Descripción Macroscópica/Microscópica
Roca de color gris con un moderado a fuerte magnetismo y una textura original totalmente obliterada por un agregado de epidota, clorita, feldespato potásico y magnetita, la cual se presenta, preferentemente, en forma de guías. Al microscopio se observa una textura original totalmente obliterada por un agregado masivo de feldespato potásico asociado, preferentemente, a magnetita (masiva y en guías o pseudo vetillas), parches de epidota, carbonatos, turmalina, clorita y cúmulos de yeso.

<p>Por su parte, la mineralización metálica se encuentra constituida de cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,2 mm, caracterizados por la presencia de magnetita, pirita y hematita \pm calcopirita, en forma diseminada y como agregados cumulares dentro de la sección. Los hidróxidos de hierro ocurren como un agregado anhedral reconocido como parches en un volumen subordinado.</p> <p>Dado que la totalidad de la mineralogía primaria se encuentra reemplazada por el agregado anteriormente descrito, no es posible realizar una clasificación petrográfica de la muestra.</p>				
Minerales primarios				
Minerales	% Volumen		Características	
No se observa mineralogía primaria				
Minerales de alteración				
Minerales	% Volumen		Características	
Feldespato potásico	60		Ocurre como un agregado de cristales anhedrales a localmente subhedrales reconocido como el principal reemplazo de la mineralogía primaria en la muestra, asociado comúnmente a magnetita. Exhibe una moderada a fuerte argilización.	
Clorita	1		Agregados de cristales radiales que se presentan como parches dentro de la sección, comúnmente acompañados de epidota y yeso.	
Epidota	2		Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,2 mm, reconocidos de forma frecuente como un sobre crecimiento de cristales de turmalina a partir de los bordes.	
Turmalina	1		Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,1 mm, los que se encuentran como parches en algunos sectores de la muestra, asociados comúnmente a epidota.	
Arcillas	8		Material criptocristalino indeterminado que se reconoce como una alteración moderada a fuerte de feldespatos potásicos.	
Yeso	4		Cristales subhedrales que se presentan como parches y agregados cumulares dentro de la sección, en algunos casos acompañados de clorita y epidota.	
Carbonatos	2		Cristales anhedrales reconocidos como parches en la muestra, preferentemente asociados a magnetita.	
Opacos	22		<p>Ocurren como:</p> <p>Cristales anhedrales a subhedrales de tamaño medio 0,4 mm, caracterizados por la presencia de magnetita, pirita y hematita \pm calcopirita, en forma diseminada y como agregados cumulares dentro de la sección.</p> <p>Hidróxidos de hierro: como un agregado anhedral reconocido como parches dentro de la sección en un volumen subordinado.</p>	
Minerales Opacos				
Mineral	% Vetillas	% Diseminado	% Total de la muestra	Modo de ocurrencia
Magnetita		85	85	Se presentan como cristales anhedrales a subhedrales diseminados y también formando agregados cumulares con tendencia lineal (o guías). Se asocian a pirita y calcopirita como relleno de espacios abiertos (en magnetita), así como también a hematita como un reemplazo a partir de bordes y debilidades (martitización).
Pirita		11	11	Ocurre como cristales anhedrales a subhedrales diseminados. Se observa, en algunos casos, como relleno de espacios en cristales de magnetita. A

				diferencia de otras muestras estos cristales no presentan una anisotropía anómala.
Hematita		3	3	Se reconoce como un reemplazo en bordes y debilidades de cristales de magnetita (martitización).
Calcopirita		<1	<1	Pequeños cristales anhedral observados exclusivamente como un relleno de espacios abiertos en cristales de magnetita.
Hidróxidos de hierro		1	1	Agregado anhedral, comúnmente pulverulento, presente como finos parches anhedral.

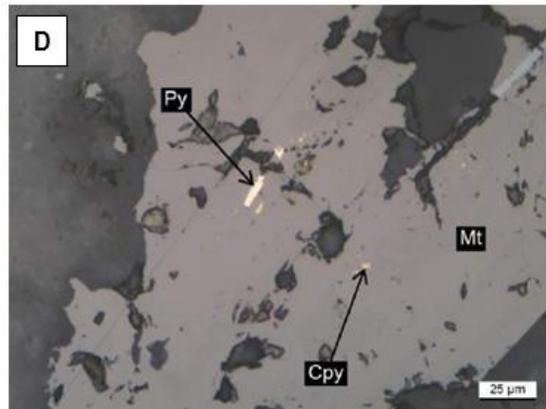
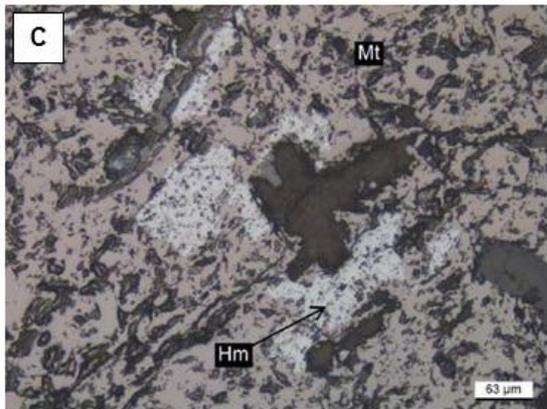
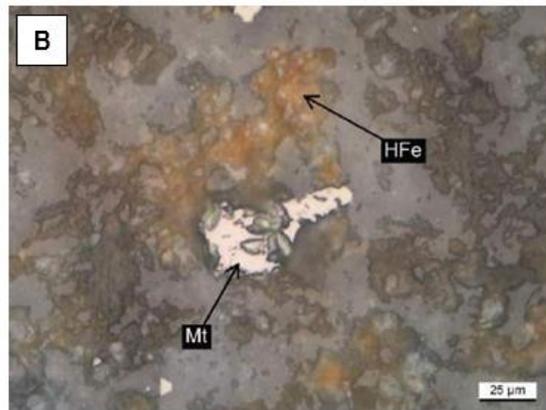
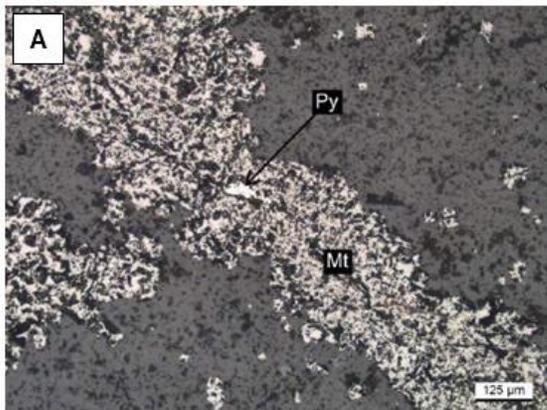
Luz transmitida





Muestra 266360: (A), (B) Feldespatos potásicos y minerales opacos como el principal reemplazo de las características primarias en la muestra, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (C), (D) Cristal de epidota creciendo a partir de los bordes de turmalina, junto a parches de yeso y feldespatos potásicos, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X. (E), (F) Agregado cumular de cristales de yeso, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 100X.

Luz reflejada



Muestra 266360: (A) Cristales de magnetita asociado a piritita como relleno de espacios abiertos, luz reflejada, 100X. (B) Magnetita junto a hidróxidos de hierro pulverulento, luz reflejada, 500X. (C) Magnetita exhibiendo un reemplazo en bordes y debilidades por hematita, luz reflejada, 200X. (D) Piritita y calcopiritita como relleno de espacios abiertos en magnetita, luz reflejada, 500X

Anexo D: resumen análisis estadísticos.

Variables aritméticas elementos traza

Variable	Media	Media del error estándar	Desv,Est	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Au (ppb)	0,06327	0,00687	0,08414	0,01	0,03	0,05	0,07	0,9
Ag	1,3567	0,0964	1,1809	0,25	0,25	1	2	5
As	72,36	6,15	75,28	2,5	15,75	50	102,25	414
Ba	219,6	21,6	171,5	13	94	186	284	748
Be	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Bi	0,4159	0,0767	0,6089	0,2	0,2	0,2	0,2	3,3
Co	207,4	24,1	294,6	15	62,3	97,5	221,3	1917
Cr	59,8	11	87,3	10	10	20	60	380
Cs	0,3	0,0189	0,1503	0,25	0,25	0,25	0,25	1
Cu	1294	466	3701	20	90	200	780	23000
Ga	25,73	0,956	7,589	12	20	25	30	43
Ge	1,2698	0,0749	0,5945	0,5	1	1	2	3
Hf	0,8746	0,0745	0,5911	0,1	0,5	0,8	1,2	2,7
In	0,1381	0,0153	0,1211	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8
Mo	7	2,39	19	1	1	1	4	120
Nb	0,849	0,245	1,948	0,5	0,5	0,5	0,5	15
Ni	91,5	22,2	272,4	10	33	50	63,8	2310
Pb	13,813	0,937	11,474	2	2,5	12	24	42
Rb	16,9	1,47	11,69	1	9	15	26	49
Sb	1,001	0,152	1,21	0,25	0,25	0,6	1,6	8,2
Sn	1,484	0,212	1,685	0,5	0,5	1	2	10
Sr	138,8	18,7	148,4	3	24	81	216	558
Ta	0,073	0,0175	0,1388	0,05	0,05	0,05	0,05	1,1
Th	3,381	0,519	4,118	0,05	1,2	1,8	4,1	21,1
Tl	0,06825	0,00745	0,05909	0,05	0,05	0,05	0,05	0,3
U	0,6143	0,036	0,2856	0,1	0,4	0,6	0,7	1,6
V	863,1	86,2	684,4	119	287	608	1232	2451
W	7,09	2,13	16,88	0,5	0,5	1	5	108
Zn	46,27	2,21	27,02	15	15	50	66	120
Zr	33,83	2,6	20,65	7	20	31	43	114