

**UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**



**CONCENTRACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y RELACIÓN GEOESTADÍSTICA DEL
COBALTO, TIERRAS RARAS Y OTROS ELEMENTOS ESTRATÉGICOS EN
P.M. LA CHILENA 1-6, DISTRITO SIERRA LADRILLOS, PAIPOTE,
ATACAMA, CHILE**

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Profesor co-guía: Dr. Wolfgang Griem

CHRISTOPHER CAMILO TORRES CISTERNAS

2022

**UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**



**CONCENTRACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y RELACIÓN GEOESTADÍSTICA DEL
COBALTO, TIERRAS RARAS Y OTROS ELEMENTOS ESTRATÉGICOS EN
P.M. LA CHILENA 1-6, DISTRITO SIERRA LADRILLOS, PAIPOTE,
ATACAMA, CHILE**

“Trabajo de titulación presentado
en conformidad a los requisitos para obtener
el título de GEÓLOGO”

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Profesor co-guía: Dr. Wolfgang Griem

CHRISTOPHER CAMILO TORRES CISTERNAS

2022

A mi madre María Candelaria Cisternas Galindo

A mi padre Miguel Ángel Torres Richards

*“Te advierto, quien quiera que
fueses, tú, que desees sondear los
arcanos de la Naturaleza, si no
hallas dentro de ti mismo aquello
que buscas, tampoco podrás
hallarlo fuera.*

*Si tú ignoras las excelencias de tu
propia casa, ¿Cómo pretendes
encontrar otras excelencias?*

*En ti se halla oculto el tesoro, de
los tesoros.*

*¡Oh! Ser, conócete a ti mismo y
conocerás al Universo y a los
Dioses”*

-Oráculo de Delfos, Grecia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profunda y sinceramente a los docentes de la Universidad de Atacama, en especial a los docentes del Departamento de Geología, por su entrega y disposición, muchas gracias de corazón. De manera especial a mis docentes guías, Dr. Karl Riveros Jensen y Dr. Wolfgang Griem, por cumplir un rol fundamental en el proceso de investigación, aportando sus conocimientos y experiencias.

De la misma manera, se agradece la oportunidad entregada por el convenio Fondo de Innovación a la Competitividad (FIC) y el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), al equipo de trabajo de la empresa Exploraciones Mina La Chilena, por facilitar la realización de esta tesis, y con gran consideración, al equipo de trabajo del proyecto «Núcleo de investigación del Cobalto y Tierras Raras», por el gran apoyo brindado.

A todos mis amigos/as, y conocidos con quienes he compartido durante todos estos años de formación universitaria, sin lugar a duda, sin cada palabra, apoyo, risa y lagrima derramada, nada de esto sería posible

Con todo mi corazón, agradezco a mi familia, mis padres, hermano y hermana, como también a mi pareja, todo esto lo debo a ustedes, y es por ustedes.

Agradecimientos sinceros y de corazón.

ÍNDICE

ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1. Contexto y problema de investigación	16
1.2. Hipótesis.....	17
1.3. Área de estudio, ubicación y accesos	17
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo general	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Metalogénesis del cobalto, tierras raras y elementos relacionados	20
2.1.1. Cobalto.....	20
2.3.1.1. Metalogénesis del cobalto.....	23
2.1.2. Elementos de tierras raras	31
2.3.2.1. Metalogénesis de REE's.	33
2.2. Distribución cobalto, REE's y elementos asociados en Chile.....	39
2.2.1. Cobalto y REE's asociado a relaves	45
2.3. Marco geológico regional.....	46
2.4. Marco geológico local	52
2.4.1. Unidades geológicas	52
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	53
3.1. Recopilación e investigación bibliográfica	53
3.1.1. Confección de bases de mapeo	53
3.2. Etapa de terreno.....	56
3.2.1. Mapeo geológico.....	56
3.2.2. Recolección de muestras.....	57

3.3. Etapa de laboratorio.....	57
3.3.1. Preparación de muestras	57
3.3.2. Fluorescencia de rayos X.....	58
3.3.3. Lupa trinocular.....	59
3.4. Etapa de análisis estadístico	60
3.4.1. Estadísticas univariabes	61
3.4.1.1. Histogramas	61
3.4.1.2. Gráficos de cajas y bigotes.....	62
3.4.2. Estadísticas multivariabes.....	63
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	65
4.1. Geología local.....	65
4.1.1. Geología del área de estudio.....	65
4.1.2. Unidades litológicas.....	67
4.1.3. Alteración.....	71
4.1.4. Mineralización	72
4.1.5. Geología estructural.....	73
4.2. Geoquímica y mineralogía	75
4.2.1 Geoquímica.....	75
4.2.2 Mineralogía.....	76
4.3 Análisis estadísticos	85
4.3.1 Análisis univariable	85
4.3.1.1 Óxidos mayores.....	86
4.3.1.2 Cobalto, REE's y elementos relacionados.	88
4.3.2 Análisis multivariable.....	92
4.3.2.1 Cobalto y óxidos mayores	93
4.3.2.2 Cobalto y elementos traza	94
4.3.2.3 REE's y óxidos mayores	95
4.3.2.4 REE's y elementos traza	98
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN.....	102
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	107
REFERENCIAS.....	109

ANEXOS	114
1. TABLAS DE RESULTADOS ANÁLISIS XRF.....	114
2. FOTOGRAFÍAS LUPA TRINOCULAR.	120
3. MAPA GEOLÓGICO MINA LA CHILENA.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de acceso al área de estudio, con escalas correspondientes, demarcada la ruta 5 en rojo en el cuadro de la izquierda, y el sector de estudio en el recuadro achurado verde de la derecha (Fuente: Edición propia).....	18
Figura 2: Gráfico de tipo de producción y reservas en el mundo, según el U.S. Geological Survey. África (Congo y Zambia) se posiciona como el mayor productor de cobalto, como subproducto de cobre, y con la mayor reserva del mundo, cercano a los 3,5 millones de toneladas (Fuente: Smith, 2001).....	21
Figura 3: Demanda futura de cobalto para distintas regiones del mundo desde 2007 al 2050, las líneas negras segmentadas indican escenarios de alto y bajo crecimiento económico (Fuente: Tisserant y Paulik, 2016).....	22
Figura 4: Distribución mundial de producción de cobalto (Fuente: Modificado de, Smith, 2001).....	24
Figura 5: Versión simplificada de la estratigrafía del Supergrupo Katanga, con sus disconformidades principales demarcadas con líneas onduladas, y enfatizando las principales fases de evolución tectónica (Fuente: Wendorff, 2011).....	25
Figura 6: Perfil laterítico del depósito Goro, en Nueva Caledonia, principal concentración de Níquel, y concentraciones subordinadas de cobalto. El enriquecimiento de cobalto se concentran en la base de la zona de limonitas en respuesta a cambios rápidos de Eh-pH (nivel freático) (Fuente: Wells et al., 2009).....	27
Figura 7: Perfil geológico de las minas Gluboky y Skalisty al norte de las intrusiones Kharaelakh–Talnakh, cuya forma ovalada guarda en su base los depósitos de sulfuros (Fuente: Lightfoot y Evans-lamswood, 2015).	29
Figura 8: División y principales ejemplos de depósitos hidrotermales y volcanogénicos (Fuente: Modificado de Smith, 2001).....	30
Figura 9: Principales usos industriales para los elementos de tierras raras (Fuente: Modificado de Villela et al., 2016)	32
Figura 10: Tabla periódica de los elementos, demarcando las tierras raras ligeras (LREE's) y las tierras raras pesadas (HREE's) (Fuente: Villela et al., 2016)	33
Figura 11: Gráfico comparativo de concentración en la corteza terrestre, de ciertos elementos con los elementos de tierras raras, en escala logarítmica (Fuente: Villela et al., 2016).	34
Figura 12: Principales minerales de mena de REE's (Fuente: Modificado de Villela et al., 2016).	35

Figura 13: Ubicación de principales yacimientos de REE's, en naranja yacimientos de explotación de REE's como mena primaria, y en azul explotación como mineral secundario (Fuente: Villela et al., 2016).	36
Figura 14: Cinturones metalogénicos con potencial de cobalto, ordenados de mayor a menor importancia. A. Yacimientos de tipo IOCG, IOA, con potencial de cobalto como mena primaria, ubicada en la Cordillera de la Costa, relacionado directamente a la Franja Ferrífera y al SFA, generado en el ambiente de arco y tras arco del Cretácico Inferior. B. Yacimientos de pórfidos cupríferos, vetas de oro y plata, y brechas de chimeneas del Paleoceno, en el flanco occidental de la cordillera de Domeyko, con potencial a evaluar de cobalto como subproducto por su relación con Cu, Fe, Ni y As. C. Yacimientos de clase mundial, de pórfidos cupríferos del Oligoceno superior-Eoceno inferior, hospedados a lo largo del Sistema de Fallas Domeyko (SFD), con potencial de cobalto como subproducto a evaluar. D. Yacimientos epitermales y pórfidos auríferos y cupríferos del Mioceno, con potencial de cobalto como subproducto a evaluar (Fuente: Modificado de MaksaeV, 2001).....	40
Figura 15: A. La Cobaltera en Distrito San Juan, encerrados en rojo, de izquierda a derecha, minas Labrar, Quebradita, El Romero y Fraguíta. B. Contexto metalogénico distrito Tambillo, comuna de Andacollo, sur de La Serena (Fuente: Emparan y Pineda, 2006).	43
Figura 16: Contenido promedio de REE's (ppm) y cobre (%) en relaves de minería del cobre (Fuente: Villela et al., 2016).	46
Figura 17: División del Ciclo Tectónico Andino (Fuente: Modificado de Charrier et al., 2007).	47
Figura 18: Columna estratigráfica del distrito Sierra Ladrillos, con edades crono estratigráficas y fauna fósil (Fuente: del Real et al., 2018).....	48
Figura 19: Sierra Ladrillos, extracto de la Carta geológica de Copiapó del área de estudio (Fuente: Editado de Arévalo, 2005)	51
Figura 20: Mapa base del sector de estudio, P.M. La Chilena 1-6, Distrito Sierra Ladrillos (Fuente: Edición propia).	55
Figura 21: Equipo portátil de Fluorescencia de rayos X (XRF) modelo S1 TITAN Bruker, Laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y Tierras Raras, Universidad de Atacama (Fuente: Edición Propia).....	59
Figura 22: Estéreo Microscopio Motic Zoom SMZ-171, Laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y Tierras Raras, Universidad de Atacama (Fuente: Edición Propia).	60
Figura 23: Grado de simetría de la curva de frecuencia relativa, entregado por el valor de asimetría (A), grado de distribución de datos con respecto a la media; y el valor de	

Curtosis (CU), grado de concentración de datos en la región central de distribución (Fuente: Edición propia).	62
Figura 24: Gráfico de cajas y bigotes horizontal, utilizado en general para fácil reconocimiento de datos estadísticos descriptivos de la variable en cuestión (Fuente: Edición propia).....	63
Figura 25: Diagramas de dispersión. El coeficiente de dispersión, o la pendiente de la curva generada por la relación lineal de las variables, entrega el grado de relación existente entre ambas variables (Fuente: Edición propia).	64
... Figura 26: Mapa de puntos de control en el área de estudio, Mina La Chilena, Distrito Sierra Ladrillos (Fuente: Edición propia).	66
Figura 27: Contacto por falla entre Vsa y Smt (falla inversa de alto ángulo, punto D4P29), se observan el anticlinorium de tierra amarilla al este de la falla, asociado a unidad Smt, y mineralización de oxidados de Cu, Ag y Au (Fuente: Edición propia). ...	68
Figura 28: Extension occidental de unidad Smt, afloramiento de pliegue anticlinal con escurrimiento en dirección NW, asociada a gran mineralización de oxidados de cobre, Ag y Au, a unos 50 m de distancia hacia el este de la foto se genera su contacto con Vsa. Fotografiado en punto D1P2 (Fuente: Edición propia).....	69
Figura 29: Relaciones de contacto de unidad Vsj. En punto de control D7P54 (Fuente: Edición propia).....	70
Figura 30: Muestras D8M4T1, lutitas terrígenas, y D7M10T5, calcarenitas bioclásticas tipo packstone, ambas con contenido en óx. de Fe, representativas de la unidad Smtf (Fuente: Edición propia).	71
Figura 31: Muestra D2M8T1, representativa de zona con alteración hipógena, y muestra D3M2T3, representativa de alteración supérgena.....	72
Figura 32: A y B) Muestras representativas de mineralización primaria de magnetita, calcopirita, pirita, muestras D9M11T1 y D10M2T1. C) Perfil de oxidación típico del área de estudio mineralización de oxidados de cobre, hierro, punto D1P3 (Fuente: Edición propia.).....	73
Figura 33: Contacto inverso de alto ángulo entre Smt (arriba) y Vsa (abajo), con zona de cizalle observable de alto nivel diastrófico. Fotografiado en punto D7P43 (Fuente: Edición propia.).....	74
Figura 34: Contacto angular entre Vsj y Smtf, contacto por falla inversa de alto ángulo, característica común de fallas normales invertidas, En punto de control D8P65 (Fuente: Edición propia.).....	75
Figura 35: Muestra D1M3, trozos 1 al 3, y 5, zonas de análisis demarcadas.....	78
Figura 36: Fotos lupa trinocular de los trozos 1 al 3 y trozo 5.	79

Figura 37: Muestra D2M1, trozos 1 con zonas de análisis demarcada y fotografías de lupa trinocular.	80
Figura 38: Muestra D2M8, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.	80
Figura 39: Muestras D6M1, trozo 1 a 3, y lupa trinocular respectiva.	81
Figura 40: Muestra D6M6, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.	82
Figura 41: Muestra D7M15, trozo 1 foto de muestra de mano y lupa trinocular.	82
Figura 42: Muestra D7M16, trozo 1 y 2 foto de muestra de mano y lupa trinocular T1.	83
Figura 43: Muestra D9M2, M4 y M12, Fotos macroscópicas.	84
Figura 44: Muestra D9M8, M9 y M11, Fotos macroscópicas.	85
Figura 45: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para lantano vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).	97
Figura 46: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para cerio vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).	97
Figura 47: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para lantano vs. elementos trazas (Fuente: Edición propia).	100
Figura 48: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para cerio vs. elementos trazas (Fuente: Edición propia).	101
Figura 49: Muestra D1M1, trozos 1 y 2, con zonas de análisis demarcadas, abajo fotografías de lupa trinocular.	120
Figura 50: Muestra D2M3, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.	121
Figura 51: Muestra D2M4, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.	122
Figura 52: Muestra D2M6, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.	122
Figura 53: Muestra D2M9, trozo 1 y 2, foto de muestra y lupa trinocular T1.	123
Figura 54: Muestra D3M2, trozo 1 al 3, foto de muestra y lupa trinocular T3.	124
Figura 55: Muestra D3M4, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.	124
Figura 56: Muestra D3M6, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.	125
Figura 57: Muestra D6M2, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.	125
Figura 58: Muestra D7M1, trozo 1 y 2 foto de muestra de mano y lupa trinocular.	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Muestras recolectadas y puntos de control correspondiente, más ubicación en proyección UTM (Fuente: Edición propia).....	67
Tabla 2: Datos de análisis con concentraciones en Co, y las LREE's, lantano y cerio, y la HREE, itrio.....	77
Tabla 3: Resumen estadísticos para elementos de óxidos mayores.....	86
Tabla 4: Resumen estadísticos para elementos traza en ppm.	90
Tabla 5: Valores del grado de correlación, Co vs. óx. mayores, metodología de Pearson.	94
Tabla 6: Valores del grado de correlación, Co vs. E. traza, metodología de Pearson. ...	94
Tabla 7: Valores del grado de correlación, Y vs. óx. mayores, metodología de Pearson.	96
Tabla 8: Valores del grado de correlación, Y vs. e. traza, metodología de Pearson.....	99
Tabla 9: 37 primeros análisis, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.	114
Tabla 10: 37 primeros análisis, con datos de concentraciones hasta el elemento U....	115
Tabla 11: Análisis números 38 al 74, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.	116
Tabla 12: Análisis números 38 al 74, con datos de concentraciones hasta el elemento U.	117
Tabla 13: Análisis números 75 al 110, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.	118
Tabla 14: Análisis números 75 al 110, con datos de concentraciones hasta el elemento U.....	119

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Histograma para elementos mayores (Fuente: Edición propia).....	87
Gráfico 2: Gráfico de boxplot para elementos mayores (Fuente: Edición propia).	88
Gráfico 3: Histograma para elementos traza (Fuente: Edición propia).	91
Gráfico 4: Gráfico de caja para elementos mayores (Fuente: Edición propia).....	92
Gráfico 5: Gráficos binarios para Cobalto vs. óxidos mayores (Fuente: Edición propia).	93
Gráfico 6: Gráficos binarios para Cobalto vs. elementos traza (Fuente: Edición propia).	95
Gráfico 7: Gráficos binarios para itrio vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).	96
Gráfico 8: Gráficos binarios para itrio vs. elementos traza (Fuente: Edición propia). ...	98

RESUMEN

La evolución tecnológica de estos días ha elevado la demanda, y a su vez, la producción de elementos de tierras raras y cobalto, los cuales son explotados generalmente como sub productos alrededor del mundo. De esta forma resulta indispensable rellenar el vacío investigativo que existe en Chile de estos elementos estratégicos. El área de estudio, mina “La Chilena”, Distrito Sierra Ladrillos, forma parte de la faja plegada y corrida de Paipote, constituida por las facies superiores de las secuencias sedimentarias marinas que corresponden al Grupo Chañarcillo, junto a secuencias volcánicas transicionales del Cretácico inferior y cuerpos hipabisales tipo filón manto de composición intermedia a básica.

Mediante el estudio semi-cuantitativo realizado, por medio de mapeo geológico en terreno, análisis de fluorescencia de rayos x, microscopía estereoscópica, y análisis estadístico univariable y multivariable, se logra confirmar contenidos anómalos de cobalto y otros elementos estratégicos, asociados a mantos de oxidados de cobre, óxidos de hierro, oxidados oscuros o groroilita de cobalto (cobalt wad), como también al cuerpo de brecha con mineralización hipógenas, especialmente a zonas con magnetita, pirita y menor calcopirita. En cuanto a las tierras raras pesadas (HREE's), destaca el Y, el cual muestra concentraciones bajas y uniformes en la zona, marcando una afinidad con Ba, Tl, Th, Co y Ni. Las tierras raras livianas (LREE's), incluyen al La y Ce, los cuales alcanzan valores mínimos.

PALABRAS CLAVE: COBALTO – TIERRAS RARAS – FLUORESCENCIA DE RAYOS X - GEOESTADÍSTICA

ABSTRACT

The technological evolution of these days has increased the demand, and at the same time, the production of cobalt and rare earth elements, which are generally extracted as sub-products around the world, in this way it is indispensable to fill the research gap that exists in Chile of these strategic elements. The study area, "La Chilena" mine, "Sierra Ladrillos" District, is part of the Paipote folded and rift belt, constituted by the upper facies of the marine sedimentary sequences that are part of the Chañarcillo Group, together with transitional volcanic sequences from the Lower Cretaceous and hypabyssal mantled bodies of intermediate to basic composition.

Through the semi-quantitative study carried out, by geological mapping, x-ray fluorescence analysis, stereoscopic microscopy, and univariate and multivariate statistical analysis, anomalous contents of cobalt and some strategical elements were confirmed, associated to oxidized mantos, of iron oxides, oxidized copper minerals, and dark oxidized minerals or cobalt wad, as well as to the breccia body associated to hipogenetic mineralization, specifically magnetites, pyrites and minor chalcopyrite. The concentrations of heavy rare earths elements (HREE's) analyzed in this study, stands out with the element Y, wich shows low and uniform concentrations in the zone, marking an affinity with Ba, Tl, Th, Co and Ni. The light rare earths elements (LREE's), La and Ce, reach minimum values.

**KEYWORDS: COBALT – RARE EARTH ELEMENTS – X RAY FLUORESCENCE -
GEOSTATISTICS**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y problema de investigación

La evolución tecnológica de estos días ha elevado la demanda, y a su vez, la explotación de elementos de tierras raras (REE's) y cobalto (Co) exponencialmente en los últimos años, los cuales son explotados generalmente como sub productos alrededor del mundo, y son considerados en la actualidad como elementos críticos por las grandes potencias mundiales. El consumo anual de Co supera las 122.000 toneladas en la actualidad, comparado con las 75.000 toneladas del 2011, esperándose una escasez de este metal para el 2022, En cuanto a REE's, en los últimos 6 años, la producción de óxidos de tierras raras (REOs) se ha mantenido entre las 110.000 y 130.000 toneladas, siendo China el principal productor de la actualidad, teniendo el 85% de la producción para el 2015, con una gran influencia en el mercado del mismo (Villela et al., 2016). En general, la comercialización y manufacturación de estos elementos está directamente relacionada al desarrollo de aparatos electrónicos, tecnologías de energía limpia y renovable, creación de súper-aleaciones para la industria aeroespacial, entre otros, tecnologías con una proyección de desarrollo exponencial a futuro.

Con estos datos es evidente la necesidad de explorar estos elementos estratégicos en Chile, debido a la concentración de estudios en elementos metalíferos tradicionales en el contexto geológico andino. Los principales yacimientos con antecedentes de cobalto y en menor medida de tierras raras en el país, estarían relacionados a las franjas metalogénicas IOCG, seguido por los depósitos IOA, ubicados en el arco y tras arco del Cretácico Inferior, también conocida como la Franja Ferrífera de Chile. Esta franja se encuentra hospedada en la Cordillera de la Costa de las regiones de Atacama y Coquimbo, y controlada principalmente por el Sistema de Falla de Atacama. Con leyes menores a las deseables, estos elementos también se albergan en los depósitos de tipo pórfido cuprífero del Paleógeno y Neógeno, cuya evaluación como subproducto estaría condicionada a su ocurrencia mineral y su predicción geometalúrgica (Townley et al., 2017).

El área de estudio, Distrito Sierra Ladrillos, ubicada a 8 km al Noreste de Paipote, corresponde a la faja plegada y corrida de Paipote que forma parte del Anticlinorium de Tierra Amarilla (Arévalo, 2005) constituida por secuencias sedimentarias marinas que corresponden al Grupo Chañarcillo (Formación Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón, de base a techo), y secuencias volcánicas transicionales del Cretácico Inferior (Fm. Bandurrias). Posee mineralización estrato ligada relacionada a la actividad de tras arco del Cretácico inferior, teniendo antecedentes de yacimientos cobaltíferos, siendo un gran punto de interés para el marco de investigación de cobalto y tierras raras, cuyo estudio llevaría un paso más adelante a la generación de un modelo geológico guía para prospección y exploración a futuro.

1.2. Hipótesis

La ocurrencia de zonas mineralizadas con subproductos de cobalto y tierras raras, hospedadas en las secuencias sedimentarias transicionales del tras arco del Cretácico Inferior tardío, se asocia a la actividad magmática-hidrotermal, del ambiente extensional de esta época, que antecede al evento metalogénico compresivo conocido como la fase peruana. Se hipotetiza que, el enriquecimiento en cobalto producto de la actividad magmática-hidrotermal, encuentra directa relación a la distribución de Fe, Mg, Mn, Ni, entre otros, cuya asociación elemental será comprobada en esta investigación por medio de análisis en terreno, y geoquímico descriptivo, realizado en los ensamblajes mineralógicos característicos de este sector.

1.3. Área de estudio, ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en el Distrito Sierra Ladrillo, entre las coordenadas 70°14' y 70°11' latitud Oeste 27°25' y 27°22' latitud Sur, a 8 km al Noreste de Paipote, Región de Atacama, Chile. En particular se estudiara la Propiedad Minera La Chilena 1-6, en un polígono de 1000 x 800 mts aproximadamente.

Su vía de acceso principal es, desde Copiapó por la Ruta 5 norte hacia la comuna de Paipote y luego se toma un desvío hacia el camino internacional (Carretera del Inca), bordeando la empresa Inacesa, para ingresar al sector de estudio a través de la ruta C-373, o C-377, esta última constituye la Quebrada los Cóndores (Fig. 1).

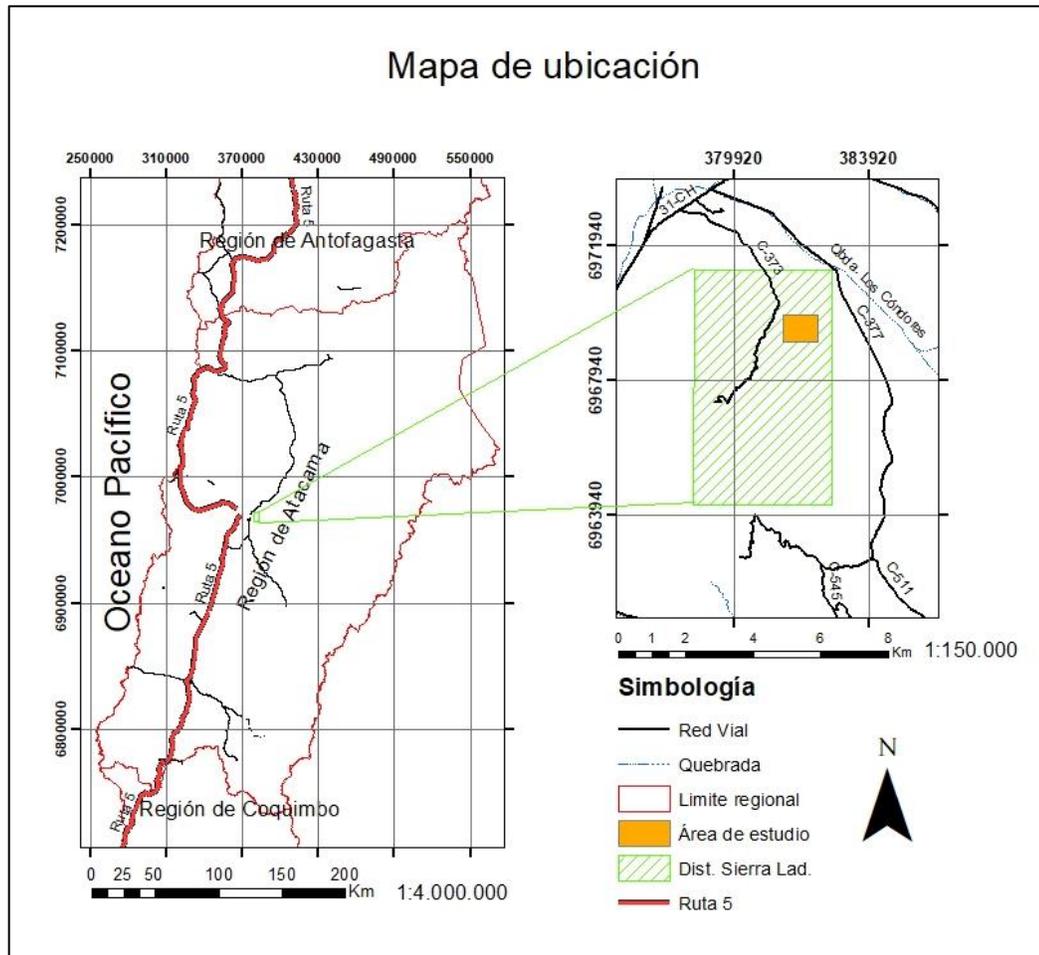


Figura 1: Mapa de acceso al área de estudio, con escalas correspondientes, demarcada la ruta 5 en rojo en el cuadro de la izquierda, y el sector de estudio en el recuadro achurado verde de la derecha (Fuente: Edición propia).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la ocurrencia del cobalto, tierras raras, y otros elementos estratégicos, por medio del análisis semi-cuantitativo, prospectivo, de la mina La Chilena, en el Distrito Sierra Ladrillos, con fin de contribuir a la definición de un modelo metalogénico útil como guía de exploración distrital.

1.4.2. Objetivos específicos

- Definir las unidades litológicas y la alteración relacionada al depósito.
- Cuantificar los contenidos relativos de cobalto, tierras raras y elementos asociados.
- Analizar estadísticamente la distribución y asociación de los elementos en cuestión.
- Caracterizar los ensamblajes mineralógicos asociados al cobalto, tierras raras y elementos relacionados.

6CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Metalogénesis del cobalto, tierras raras y elementos relacionados

2.1.1. Cobalto

Del alemán, Kobold, que significa, “ente malicioso”, término utilizado en el siglo XVI para denominar menas metálicas grises problemáticas y tóxicas metalúrgicamente, en las montañas Hartz al centro de Europa. Al igual que el níquel, debido a su paragénesis relacionada al arsénico, generaría problemas metalúrgicos, relacionados a fumarolas de alta toxicidad, en los procesos de extracción de antaño. No fue hasta el siglo XVII, en el año 1751 que se pudo aislar este elemento metálico desconocido, gracias a los estudios del gran científico sueco, Georg Brandt (Gusenius, 1967). Las principales propiedades del elemento incluyen, ferromagnetismo (inclusive a altas temperaturas), baja conductividad térmica y eléctrica, alto punto de fusión (~1495°C), dureza y alta resistencia al desgaste en aleación con otros metales (Hitzman et al., 2017).

En la actualidad, este “metal crítico” es explotado principalmente como subproducto del Cu y Ni, y en escasos lugares como mena principal, como el Distrito Bou Azzer, en Marruecos. Su aplicación en el mercado, esta principalmente relacionada a la creación de súper-aleaciones, de cobalto, níquel y hierro, que son utilizadas en la industria aeroespacial; de igual o mayor importancia, se utiliza en tecnologías de energía limpia y renovable, donde se espera un gran desarrollo a futuro (e.g. cátodos de baterías recargables, ion-litio, imanes, generadores, rotores, etc.). Otras aplicaciones se relacionan al desarrollo de aparatos electrónicos, en gran auge en la actualidad (e.g. electrónica, baterías, almacenamiento de datos, etc.); y en menor medida a la industria farmacéutica, o en medicina, en el caso de máquinas de radioterapia, denominadas bombas de cobalto, las cuales utilizan radiación del isótopo ^{60}Co ; entre un gran número de utilidades (e.g. aglutinante para componentes de carburo, prótesis, cables, sondajes petrolíferos, colorantes, etc.) (Seddon, 2001).

Con una reserva base mundial de 9,6 millones de toneladas, según el U.S. Geological Survey, el cobalto se encuentra con una concentración promedio en la corteza de 25 ppm, con concentraciones de 110 ppm en rocas ultramáficas, y 47 ppm en basaltos. Las leyes de corte varían entre 0,1% y 0,4% en la actualidad, donde es necesario un factor de enriquecimiento de 40, para que un área sea de interés prospectivo (Smith, 2001) (Fig.2).

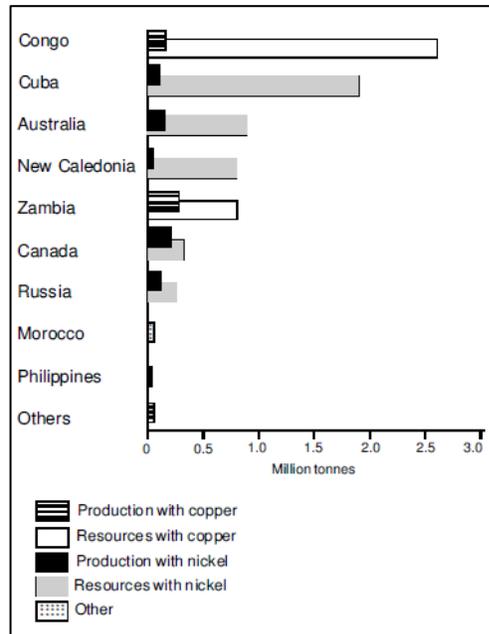


Figura 2: Gráfico de tipo de producción y reservas en el mundo, según el U.S. Geological Survey. África (Congo y Zambia) se posiciona como el mayor productor de cobalto, como subproducto de cobre, y con la mayor reserva del mundo, cercano a los 3,5 millones de toneladas (Fuente: Smith, 2001).

Hoy en día, la República Democrática del Congo (RDC) posee cerca del 60% de la producción del cobalto en el mundo, influyendo por su estado político frágil, de manera extrínseca al valor del metal, con cerca de 90.000 toneladas métricas al año, seguido por Rusia con 5.900 toneladas aprox. (Statista, 2018), explotado principalmente como subproducto de la minería del cobre, y en menor medida, como subproducto del níquel; a su vez, China se posiciona como el mayor productor de cobalto refinado.

Este elemento aumenta su demanda exponencialmente a lo largo de los años, a la par con la demanda de objetos tecnológicos. El consumo anual supera las 122.000

toneladas en la actualidad, comparado con las 75.000 toneladas del 2011, esperándose una escasez de este metal para el 2022, según Commodities Research Unit (CRU) Group London (Sherman, 2018). Tisserant y Paulik, en el 2016, generan un modelo estadístico, con fin de analizar la demanda futura de cobalto para distintas regiones del mundo desde 2007 al 2050, asumiendo un crecimiento constante del Producto Interno Bruto (PIB) y de comercialización del elemento, específico para cada sector, además de un crecimiento constante de tecnología (Fig. 3). De esta manera ha pasado de ser un “mineral estratégico”, a un “mineral crítico”, en distintas organizaciones económicas mundiales.

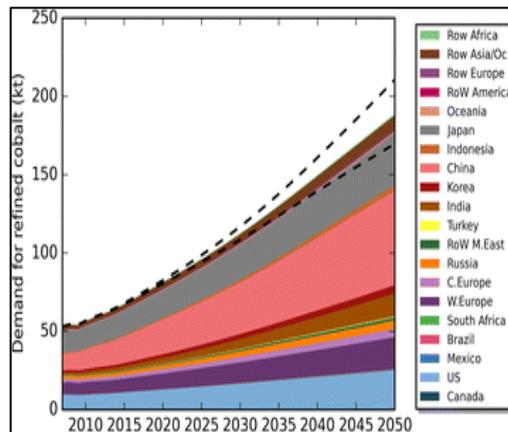


Figura 3: Demanda futura de cobalto para distintas regiones del mundo desde 2007 al 2050, las líneas negras segmentadas indican escenarios de alto y bajo crecimiento económico (Fuente: Tisserant y Paulik, 2016).

El término “mineral estratégico” se emplea para aquellos minerales cuyo plan general de abastecimiento, con algún fin en particular, se diseña de forma táctica, o calculada. Al contrario, un “mineral crítico”, es considerado tal, cuando la escasez de este tiene un impacto sobre la economía, con mayor repercusión que la de cualquier otra materia prima, estando condicionado, por la evolución de las tecnologías de producción y manufacturación de nuevos productos (Regueiro y Barros, 2014). De esta forma, la inestabilidad política, normas mineras irracionales, o restricciones de mercado, influyen en gran medida la criticidad de un elemento (Tisserant y paulik, 2016). En el 2017, La Comisión Europea de la Industria Empresarial (EU COM Enterprise Industry), incluye entre sus materias críticas el cobalto, junto con una lista de 26 materias primas, entre las que se incluyen los elementos de tierras raras.

2.3.1.1. Metalogénesis del cobalto.

Los iones de cobalto, Co^{2+} y Co^{3+} , poseen radio iónico similar a los iones Mg^{2+} , Mn^{4+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} y Ni^{2+} , sustituyéndolos en la formación de ciertos minerales. Wedepohl, en su libro de mano de la geoquímica de 1974, reconoce 34 minerales de cobalto, esencialmente sulfuros, selénidos, arseniuros, sulfu arseniuros, carbonatos, sulfatos y arseniatos (Smith, 2001). Los minerales con mayor concentración de cobalto serían los sulfuros de cobalto, como la linnaeita (Co_3S_4) y carrolita ($\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$), sulfu arseniuro como cobaltita (CoAsS), arseniatos hidratados como la eritrina ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), y los óxidos hidratados como heterogenita (HCoO_2), y el óxido de manganeso hidratado asbolana ($(\text{Ni},\text{Co})_{2-x}\text{Mn}_{4+}(\text{O},\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) o goroilita de cobalto (i.e. cobalt wad) como menciona Smith en el 2001. Además, existen antecedentes que verifican la correlación entre el cobalto y el azufre, sustituyendo, en bajas cantidades, al Fe en la estructura de la pirita, calcopirita, pirrotina y arsenopirita, e inclusive en limonitas, cuya explotación estaría condicionada a las características del yacimiento (Chepillo, 2019). Es importante mencionar que la fuente del elemento radica en su concentración en ciertos minerales formadores de roca, por ejemplo, del olivino, espinela y clorita, en yacimientos de laterita e hidrotermales (Smith, 2001), en ciertos casos donde no se reconoce una conexión con rocas máficas y ultramáficas, se relaciona a sistemas hidrotermales a escala corteza que pudieron extraer y transportar el cobalto desde grandes profundidades (Hitzman et al., 2017).

El porcentaje de recuperación del cobalto, como subproducto de la minería del cobre y el níquel, varía entre el 25 y 80%, dependiendo principalmente del tipo de yacimiento, mientras, los yacimientos donde podría ser recuperado como producto principal, se relacionan a menas con un alto contenido en arsénico, lo cual se debería manejar con gran cuidado (Mudd et al., 2013).

El cobalto se encuentra en depósitos de un amplio rango de estilos, logrando dividirse en 4 principales tipos de yacimientos: depósitos estratoligados de Cu-Co hospedado en rocas sedimentarias; Depósitos lateríticos de Ni-Co; depósitos magmáticos de Ni-Cu-Co-PGE (Platinum-Group Elements, Ru, Rh, Pd, Os, Ir y Pt); y depósitos polimetálicos hidrotermales y volcanogénicos (Fig. 4) (Smith, 2001).

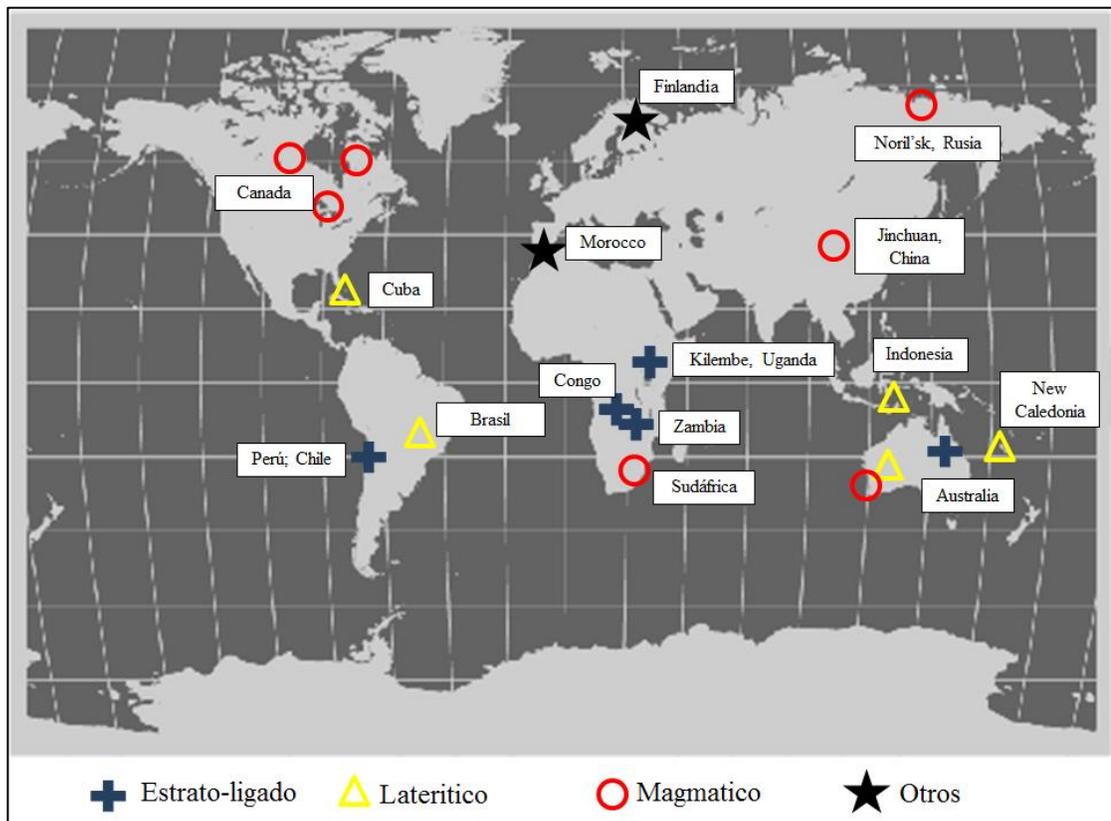


Figura 4: Distribución mundial de producción de cobalto (Fuente: Modificado de, Smith, 2001).

Depósitos estratoligados de Cu-Co hospedado en rocas sedimentarias

Generalmente son precámbricos, y están representados principalmente por el cinturón de cobre o “copperbelt” del centro de África, en la República Democrática del Congo y Zambia. En este depósito, se trabaja con concentraciones de 0,17 a 0,25%, de Co, donde este cinturón de cobre se extiende por sobre los 150 km de corrida, y su mineralización, con menas de carrolita (CuCo_2S_4) y linnaeita (Co_3S_4), se encuentra hospedada en rocas sedimentarias de la base del Supergrupo Katanga, en la Formación Roan Inferior, la cual este constituida por sedimentos resultantes de la extensión de

Rodinia, en el Neoproterozoico temprano (Fig. 5) (Wendorff, 2011). Presentan principalmente mineralización diseminada, en nódulos, lentes y capas, de sulfuros de Cu y Co, entre otros tipos de minerales y ocurrencias a lo largo del Cinturón de Cobre de África Central (Fontaine et al., 2019; Muchez et al., 2008; Decrée et al., 2010; McGowan et al., 2005).

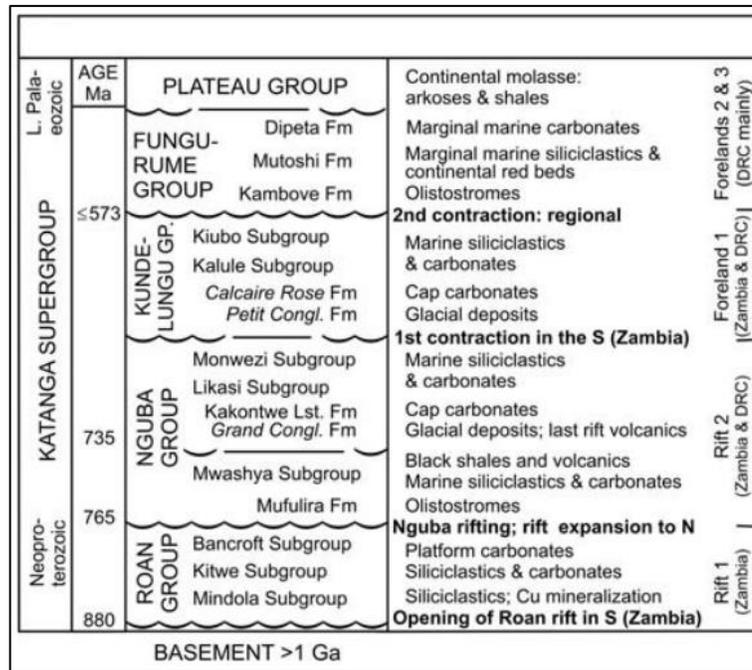


Figura 5: Versión simplificada de la estratigrafía del Supergrupo Katanga, con sus disconformidades principales demarcadas con líneas onduladas, y enfatizando las principales fases de evolución tectónica (Fuente: Wendorff, 2011).

La actividad inicial (~880 Ma.), syngénica a diagenética temprana, de fluidos superficiales y profundos, sobre sedimentos erosionados de rocas ultramáficas del basamento, resulta en un transporte temprano de metales en solución, sulfuros detríticos y silicatos ricos en metales, además de una precipitación inicial de sulfuros, relacionada a la fijación bacteriana del sulfato de agua de mar, en condiciones reductoras, de temperaturas bajo 100°C y pH neutro (Sweeney et al., 1991). Una segunda mineralización se produciría por el enterramiento de estos sedimentos (~765 Ma.), lo cual generaría fluidos ricos en Cu y Co, y consiguiente precipitación de sulfuros en las paredes de las rocas del Grupo Roan, entregando la mineralización principal, del tipo

estratiforme, en la etapa diagenética de la roca huésped (Wendorff, 2011). La generación de la orogenia Pan-Africana (~590 Ma.), produce una actividad tectono-metamórfica, generando el plegamiento, y fracturación, de las rocas del supergrupo Katangan, además de un conjunto de vetillas de alta temperatura, que cortan la mineralización inicial, pero que no genera alguna remoción o reequilibrio entre los sulfuros preexistentes (Sweeney et al., 1991). Por último, el enriquecimiento supérgeno, Mio-Plioceno en edad, sobre las rocas preexistentes, genera una migración de estos fluidos, y mineralización enriquecedora a través de lineamientos estructurales (Dewaele et al., 2006).

Se encuentra otros yacimientos del tipo Estratoligado Cu-Co, en sedimentos Paleozoicos del Perú; en Kupferschiefer al norte de Europa de edad Triásica; Kilembe, Uganda; o Queensland, Australia, los cuales presentan ciertas diferencias, como mineralización syngénica, o elementos de valor agregado, como oro, entre otros (Smith, 2001).

Depósitos lateríticos de Ni-Co

Generalmente del Paleógeno tardío al presente, depósitos ricos en níquel, generados por meteorización subtropical a tropical, sobre rocas ultramáficas, principalmente en asociaciones ofiolíticas, donde ciertos minerales y rocas máficas, ultramáficas, poseen Co en su estructura cristalina, (e.g. dunita, harzburgita, serpentinita, olivino). Poseen contenidos subordinados de Co de 0,1 a 0,15% generalmente, concentrados sobre la zona saprolítica, la cual almacena el mayor enriquecimiento en níquel. El cobalto en este tipo de yacimiento, se encuentra contenido en minerales como asbolana, arcillas (nontronita, montmorillonita), eritrina, limonita, goethita o heterogenita (Hitzman et al., 2017)

En la isla Nueva Caledonia, constituida por cerca de un tercio de su área por rocas ultramáficas de origen ofiolítico, se encuentra el depósito Goro (Fig. 6) (Weels et al., 2009), que correspondería al depósito laterítico de Ni-Co mayormente estudiado del mundo. Estas rocas, generadas inicialmente en el Oligoceno, han sido alteradas por meteorización subtropical desde el Plioceno, generando un perfil laterítico de hasta 50

m, con rangos desde 0,05 a 0,16% de Co, y registros de mineralización en asbolana (i.e. cobalt wad), de hasta un 10% de cobalto.

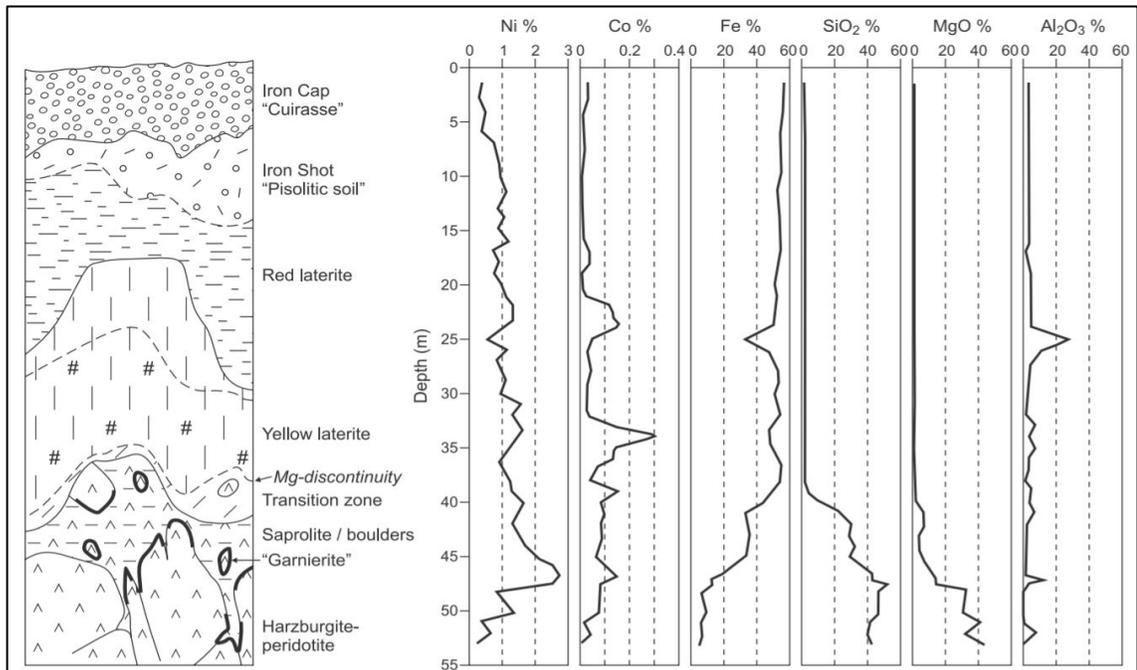


Figura 6: Perfil laterítico del depósito Goro, en Nueva Caledonia, principal concentración de Níquel, y concentraciones subordinadas de cobalto. El enriquecimiento de cobalto se concentran en la base de la zona de limonitas en respuesta a cambios rápidos de Eh-pH (nivel freático) (Fuente: Wells et al., 2009).

En Cuba se explota cerca del doble de Co, comparado con Nueva Caledonia, logrando perfiles de hasta 10 m sobre 6 distintos complejos, máficos y ultramáficos al oriente de la isla. A su vez, Australia se encuentra en proceso de estudio de lateritas, como en Murrin Murrin, Bulong y Cawse al occidente de su territorio (Smith, 2001).

Depósitos magmáticos de Ni-Cu-Co-PGE (Platinum-Group Elements)

Depósitos magmáticos con concentraciones de Cu-Ni y menor Co, relacionados a intrusivos máficos a ultramáficos o flujos volcánicos. Generado por la asimilación de cuerpos sulfurados de la corteza en magmas máficos derivados del manto, dándose la mineralización en la base de los cuerpos magmáticos, con ocurrencia lenticular, por

gravitación del cuerpo sulfurado de mayor densidad bajo el cuerpo silicatado de menor densidad. Otros modos de ocurrencia incluyen la forma masiva o sulfuros diseminados, con mineralización principal de pentlandita ((Co,Ni,Fe)₉S₈), pirrotina y calcopirita y en menor medida lineaita (Co₃S₄) como fuente de cobalto. Cuando ocurre cierta deformación tectónica sobre la roca de caja, suele darse la mineralización con ocurrencia en masas de lentes elongados, o en vetillas, en la matriz sulfurada del cuerpo de brecha resultante.

Lightfoot y Evans-lamswood, en el 2015, proponen un modelo genérico, y una clasificación en tres distintos grupos para este tipo de yacimientos, analizando distintos depósitos, los cuales se diferencian principalmente en las geometrías de los cuerpos intrusivos, y en la disposición de los cuerpos mineralizados. El modelo, propone que el cuerpo magmático parental empobrecido en sulfuros, asciende a través de un sistema conductivo sub-vertical, desde su fuente a gran profundidad, debido a condiciones estructurales, transtensionales, o transpresionales, generando una saturación sulfurada gradual y un cuerpo magmático sulfurado inmiscible. Luego se genera un enriquecimiento en metales, generalmente por acción de agentes externos al cuerpo inicial, para lograr una acumulación y localización del cuerpo sulfurado denso, gracias a la acción diferencial de densidades y ascenso a través de las estructuras del marco tectónico original. La composición de este cuerpo sulfurado, podría verse modificada por acción hidrotermal, metamórfica o deformación tectónica. Generalmente la producción de un depósito tipo Ni-Cu-Co-PGE, se da en un marco de gran provincia magmática (LIP) o en condiciones anorogénicas.

Como es el caso del depósito Noril'sk-Talnakh en Siberia, Rusia (Fig. 7), localizado en el escudo NW del Cratón Siberiano, en donde el enriquecimiento en metales del cuerpo sulfurado, estuvo controlado por el sistema de Fallas Noril'sk-Kharaelakh, que facilitó el transporte de metales desde el cuerpo basáltico del Trap Siberiano, el cual posee un volumen de 5000 a 10,000 km³, y logrando la migración del ~99% de metales preciosos y alrededor del ~80% del Ni, Cu y Co hacia los magmas inmiscibles, parental y sulfurado, y de esta misma forma, genero el ascenso del cuerpo mineralizador (Lightfoot y Evans-lamswood, 2015).

Los principales exponentes de este tipo de yacimientos, se pueden encontrar en Sudbury, Ontario, Canada; Noril'sk, Rusia; Voisey's Bay, Labrador, Canada; Bushveld, Sudáfrica; o Jinchan, China (Smith, 2001).

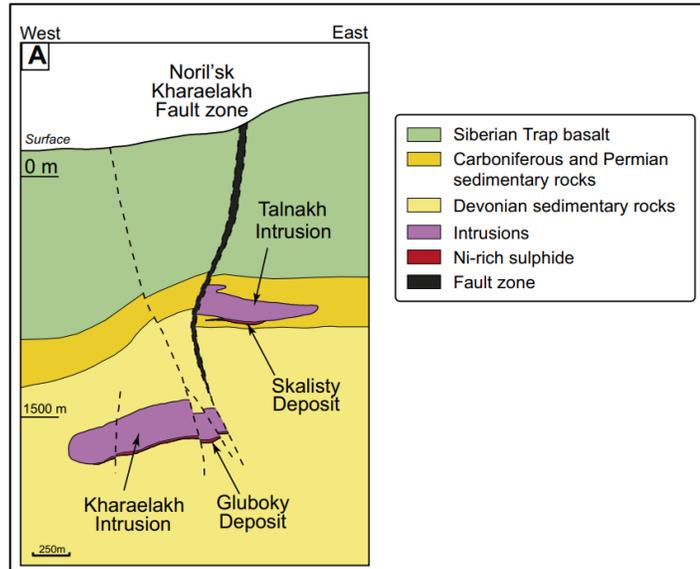


Figura 7: Perfil geológico de las minas Gluboky y Skalisty al norte de las intrusiones Kharaelakh–Talnakh, cuya forma ovalada guarda en su base los depósitos de sulfuros (Fuente: Lightfoot y Evans-lamswood, 2015).

Depósitos polimetálicos hidrotermales y volcanogénicos

Bajo el nombre de un solo grupo, se amplía a un gran rango de estilos (Fig. 8), desde depósitos polimetálicos hospedados en óxido de hierro (e.g. IOCG, IOA), a tipo Five Elements (Ni-Co-Ag-As-Bi) (estos dos modelos con grandes exponentes en Chile serán tratados en la siguiente sección) estratoligado epigenético; hospedado en ofiolitas; o costras ferromangánicas enriquecidas en cobalto (Manheim, 1986), concentrados en montes submarinos, dorsales, y plataformas abisales, cuya explotación se ve limitada por la protección de la biodiversidad submarina, regulado por la Autoridad Internacional del Suelo marino (ISA) (Schlacher et al., 2014).

Los yacimientos más importantes de este tipo incluyen el depósito Bou Azzer, en Marruecos, el cual consiste en menas de Co-As hospedado en ofiolitas, donde el cobalto es explotado como mena principal desde 1934. Se puede encontrar arseniuro de Co, Ni,

Fe (principalmente escuterudita (Co,Ni,Fe)As₂₋₃), sulfuarseniuros, sulfuros de cobre, molibdenita como accesorio, y oro en ganga de cuarzo y carbonato, con un origen hidrotermal complejo, con fluidos endógenos cargados en As, Mo, Bi y Au, y fluidos de origen marítimo con cloruros, los cuales transportaron el Co y Ni, de las peridotitas serpentinizadas del complejo ofiolítico. Su ocurrencia va desde vetas, vetillas, stocks a lentes aplanados, debido a control estructural con episodios deformacionales, generando brechamiento y recristalización. Otro exponente mundial corresponde a el Cinturón de Cobalto de Idaho, E.E.U.U., un deposito epigenético de Cu-Au-Co (Smith, 2001).

Five Elements Deposits (FED), o depósitos tipo 5 elementos, poseen un amplio rango de exponentes, existiendo una gran dificultad para una única definición que describa todos los depósitos tipo FED, donde los criterios de clasificación son principalmente mineralógicos y para genéticos. Se caracterizan por incluir al menos arseniuros de Ni-Co asociado a plata nativa, comúnmente presentan ausencia de oro, y algunos yacimientos presentan enriquecimiento en uranio, en general se asocian a sets tectónicos extensivos en la corteza continental. Ha sido propuesto un modelo idealizado de precipitación mineral, la primera etapa consiste en sulfuros (galena, calcopirita, piritita), luego pechblenda, seguida por arseniuros de Ni-Co y plata nativa, continúa una etapa de sulfuros y sulfosales de plata y culmina una etapa estéril de calcita-baritina, pero este modelo ideal rara vez presenta todas las etapas, con algunas incompletas e inclusive en distinto orden (López & Echeveste, 2012; Kissin, 1993).

Tipo	Referentes
Sulfuro masivo hospedado en ofiolita	Keretti, Finlandia; Deerni, China
Co-As asociado a ofiolita	Bou Azzer, Marruecos
Sulfuros epigeneticos de Au-Co-U	Kuusamo, Finlandia; Zona magmatica Great Bear, Canada
Epigeneticos de Cu-Au-Co	Cinturon de cobalto de Idaho; Greenmount, Australia
Polimetalicos Hospedados en oxidos de hierro (IOCG, IOA)	Franja ferrifera del norte de Chile
Vetillas tipo 5 elementos (Ni-Co-Ag-As-Bi)	Thunder Bay, Canada; Kongsberg-Modum, Noruega.

Figura 8: División y principales ejemplos de depósitos hidrotermales y volcanogénicos (Fuente: Modificado de Smith, 2001).

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. (Townley et al., 2017a).

2.1.2. Elementos de tierras raras

En cuanto a REE's, se registra una producción mundial promedio de 2.000 toneladas anuales como óxidos de tierras raras (REOs), desde 1900. Desde 1966 supera las 10.000 toneladas para continuar creciendo a una tasa anual promedio de 4,2% al 2012 (110.000 toneladas). La producción de REOs se ha mantenido entre las 110.000 y 130.000 toneladas, siendo China el principal productor de la actualidad, teniendo el 85% de la producción para el 2015, y una gran influencia en el mercado del mismo (Villela et al., 2016).

Estos elementos, considerados como materias primas críticos por la Comisión Europea de la Industria Empresarial (2017) y diversas potencias mundiales, son utilizados en las tecnologías energéticas modernas como las energías limpias, incluyendo tecnologías de turbinas eólicas, coches eléctricos, películas fotovoltaicas, óptica, iluminación, pantallas LED, imanes permanentes, baterías portátiles, entre muchas otras utilidades (Fig. 9), tecnologías con gran auge en la actualidad, pronosticándose problemas de suministro a corto y largo plazo de los metales de tierras raras (disproseo, neodimio, terbio, europio e itrio principalmente) (Regueiro y Barros, 2014).

Elemento	Aplicaciones
Escandio (Sc)	Aleaciones metálicas para industria aeroespacial, para equipos deportivos y equipos de defensa.
Itrio (Y)	Cerámicas, aleaciones metálicas, láseres, eficiencia de combustibles, comunicación por microondas para industria de satélites, televisores de color, monitores de ordenador, sensores de temperatura.
Lantano (La)	Baterías, catalizadores en refinación de petróleo, baterías de vehículos eléctricos, cámaras digitales de alta tecnología, cámaras de video, baterías de portátiles, películas de rayos X, láseres.
Cerio (Ce)	Catalizadores, aleaciones de metales, pulido (de vidrio, espejos, placas frontales de televisión, cristales ópticos, microprocesadores de silicio, lentes), filtro UV, baterías.
Praseodimio (Pr)	Mejora resistencia a la corrosión de imanes, pigmento, reflectores, lentes para señales de aeropuertos, filtros fotográficos.
Neodimio (Nd)	Imanes de alta potencia para ordenadores portátiles, motores de vehículos híbridos, generadores de turbinas de viento; láseres; catalizadores para fracturamiento hidráulico, pulido de vidrios.
Prometio (Pm)	Fuente de radiación beta, catalizadores para fracturamiento hidráulico.
Samario (Sm)	Imanes de alta temperatura, barras de control de reactores.
Europio (Eu)	LCDs, luces fluorescentes, aditivos para el vidrio.
Terbio (Tb)	Baterías, fósforos para tubos de TV y lámparas fluorescentes.
Disprobio (Dy)	Imanes de alta potencia, láseres, baterías.
Holmio (Ho)	Imanes más poderosos conocidos.
Erbio (Er)	Láseres, colorante de vidrio.
Yterbio (Yb)	Tecnología de fibra óptica, paneles solares, aleaciones metálicas (acero inoxidable), láseres, fuente de radiación para unidades de rayos X portátiles
Lutecio (Lu)	Fósforo de rayos X.
Tulio (Tm)	Imanes de alta potencia.
Gadolinio (Gd)	Agente de contrastes para formación de imágenes por resonancia magnética, aditivo para vidrios.

Figura 9: Principales usos industriales para los elementos de tierras raras (Fuente: Modificado de Villela et al., 2016)

Los elementos con mayor grado de criticidad y demanda se encuentran las LREE's como el praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm) y europio (Eu); en el caso de las HREE's, itrio (Y), terbio (Tb) disprobio (Dy), erbio (Er). A su vez, se pronostica un exceso de las LREE's, cerio (Ce) y lantano (La) en el futuro cercano (Villela et al., 2016).

2.3.2.1. Metalogénesis de REE's.

Los elementos de tierras raras están conformados por 17 elementos químicos de la tabla periódica (Fig. 10), los cuales se dividen en 2 grupos, Los lantánidos (escandio (Sc), lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm), samario (Sm) y europio (Eu)) de bajo número atómico, conocidos como tierras raras ligeras (LREE's), y su contraparte de mayor número atómico (itrio (Y), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), yterbio (Yb) y lutecio (Lu)), conocidas como las tierras raras pesadas (HREE's). El itrio (Y) es agrupado en las HREE's, por su alto radio iónico semejante al del holmio (Ho), y el escandio (Sc) a su vez, a las LREE's. Junto a estos, se puede considerar la existencia de un grupo intermedio llamado "tierras raras intermedias", comprendido por el samario, europio, gadolinio y terbio (Chakhmouradian & Wall, 2012).

1 hidrógeno 1 H 1.0079																	18 helio 2 He 4.0026																		
3 litio 3 Li 6.941	4 berilio 4 Be 9.0122											5 boro 5 B 10.811	6 carbono 6 C 12.011	7 nitrógeno 7 N 14.007	8 oxígeno 8 O 15.999	9 flúor 9 F 18.998	10 neón 10 Ne 20.180																		
11 sodio 11 Na 22.990	12 magnesio 12 Mg 24.305											13 aluminio 13 Al 26.982	14 silicio 14 Si 28.086	15 fósforo 15 P 30.974	16 azufre 16 S 32.065	17 cloro 17 Cl 35.453	18 argón 18 Ar 39.948																		
19 potasio 19 K 39.098	20 calcio 20 Ca 40.078	21 escandio 21 Sc 44.956	22 titanio 22 Ti 47.867	23 vanadio 23 V 50.942	24 cromo 24 Cr 51.996	25 manganeso 25 Mn 54.938	26 hierro 26 Fe 55.845	27 cobalto 27 Co 58.933	28 níquel 28 Ni 58.693	29 cobre 29 Cu 63.546	30 zinc 30 Zn 65.38	31 galio 31 Ga 69.723	32 germanio 32 Ge 72.64	33 arsénico 33 As 74.922	34 selenio 34 Se 78.96	35 bromo 35 Br 79.904	36 criptón 36 Kr 83.798																		
37 rubidio 37 Rb 85.468	38 estroncio 38 Sr 87.62	39 itrio 39 Y 88.906	40 zirconio 40 Zr 91.224	41 niobio 41 Nb 92.906	42 molibdeno 42 Mo 95.96	43 tecnecio 43 Tc [98]	44 rutenio 44 Ru 101.07	45 rodio 45 Rh 102.91	46 paladio 46 Pd 106.42	47 platino 47 Ag 107.87	48 cadmio 48 Cd 112.41	49 indio 49 In 114.82	50 estaño 50 Sn 118.71	51 antimonio 51 Sb 121.76	52 telurio 52 Te 127.60	53 yodo 53 I 126.90	54 xenón 54 Xe 131.29																		
55 cesio 55 Cs 132.91	56 bario 56 Ba 137.33											72 hafnio 72 Hf 178.49	73 tantalio 73 Ta 180.95	74 wolframio 74 W 183.84	75 reosio 75 Re 186.21	76 osmio 76 Os 190.23	77 iridio 77 Ir 192.22	78 platino 78 Pt 195.08	79 oro 79 Au 196.97	80 mercurio 80 Hg 200.59	81 talio 81 Tl 204.38	82 plomo 82 Pb 207.2	83 bismuto 83 Bi 208.98	84 polonio 84 Po [209]	85 astato 85 At [210]	86 radón 86 Rn [222]									
87 francio 87 Fr [223]	88 radio 88 Ra [226]											104 rutherfordio 104 Rf [261]	105 dubnio 105 Db [262]	106 seaborgio 106 Sg [266]	107 bohrio 107 Bh [264]	108 hasio 108 Hs [277]	109 meitnerio 109 Mt [268]	110 darmstadtio 110 Ds [271]	111 roentgenio 111 Rg [272]	112 copernicio 112 Cn [285]	113 ununbio 113 Uut [284]	114 flerovio 114 Fl [289]	115 ununpentio 115 Uup [288]	116 ivermorio 116 Lv [293]	117 ununseptio 117 Uus [294]	118 ununocio 118 Uuo [294]									
																		57 lantano 57 La 138.91	58 cerio 58 Ce 140.12	59 praseodimio 59 Pr 140.91	60 neodimio 60 Nd 144.24	61 prometio 61 Pm [145]	62 samario 62 Sm 150.36	63 europio 63 Eu 151.96	64 gadolinio 64 Gd 157.25	65 terbio 65 Tb 158.93	66 disprosio 66 Dy 162.50	67 holmio 67 Ho 164.93	68 erbio 68 Er 167.26	69 tulio 69 Tm 168.93	70 ytterbio 70 Yb 173.05	71 lutecio 71 Lu 174.97			
																		89 actinio 89 Ac [227]	90 torio 90 Th 232.04	91 protactinio 91 Pa 231.04	92 uranio 92 U 238.03	93 neptunio 93 Np [237]	94 plutonio 94 Pu [244]	95 americio 95 Am [248]	96 curio 96 Cm [247]	97 berkelio 97 Bk [247]	98 californio 98 Cf [251]	99 einsteinio 99 Es [252]	100 fermio 100 Fm [257]	101 mendelevio 101 Md [258]	102 nobelio 102 No [259]	103 lawrencio 103 Lr [262]			

Figura 10: Tabla periódica de los elementos, demarcando las tierras raras ligeras (LREE's) y las tierras raras pesadas (HREE's) (Fuente: Villela et al., 2016)

Estos elementos, llamados de esta forma por su elevado grado de complejidad de obtención en la antigüedad, tienen una abundancia variable (Fig. 11), por ejemplo, los REE's de número atómico par llegan a tener una abundancia hasta siete veces mayor que las de número atómico impar. El cerio (Ce), lantano (La) y neodimio (Nd) son más abundantes que el plomo (Pb) en la corteza, además, todas las tierras raras, a excepción del prometio (Pm), son más abundantes que cualquiera de los metales preciosos (Au, Ag, Rh, Pd y Pt) o el mercurio (Hg). El prometio se produce artificialmente como subproducto de las reacciones de fisión de uranio, siendo el elemento de tierra rara más escaso en la corteza, puesto que no tiene isótopos estables, su isótopo más estable, ^{145}Pm , tiene una vida media de 17,7 años (Villela et al., 2016).

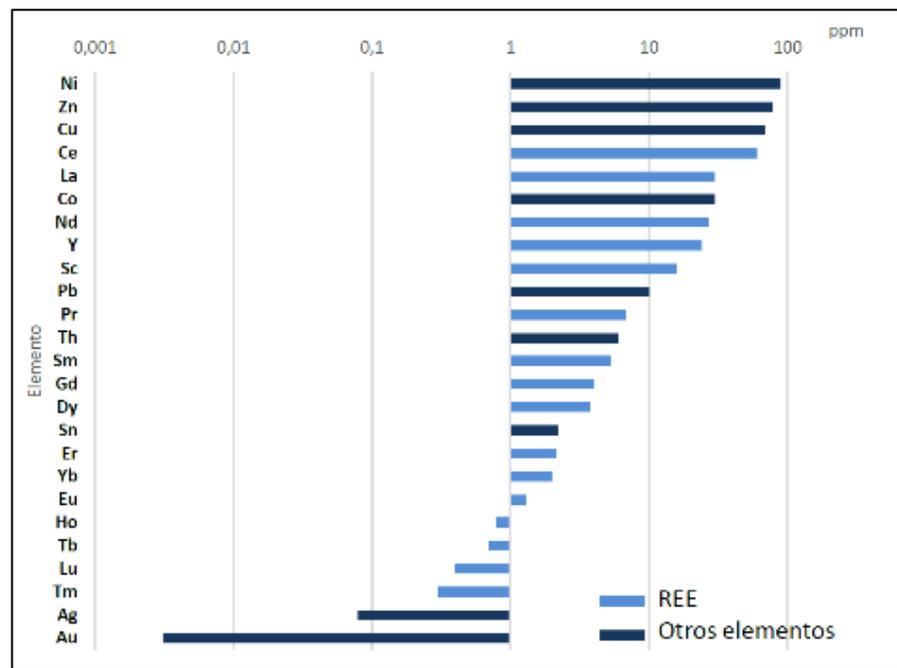


Figura 11: Gráfico comparativo de concentración en la corteza terrestre, de ciertos elementos con los elementos de tierras raras, en escala logarítmica (Fuente: Villela et al., 2016).

La cristalización temprana de los minerales formadores de roca, como feldespato, piroxeno y anfíbola, favorece el acoplamiento de elementos compatibles para la formación de sus redes cristalinas, como Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, entre otros. Los REE's tienden a permanecer en altas concentraciones en la fase fluida del magma, derivando a la eventual cristalización de minerales de tierras raras las últimas etapas de

cristalización. En general, los REE's, ocurren juntos en la naturaleza ya que tienen propiedades físico químicas similares, como radios iónicos similares o la propiedad de ser iones trivalentes (estado de oxidación +3), a excepción del Ce⁺⁴ y el Eu⁺². Esta similitud permite la sustitución de los REE's entre sí en varias redes cristalinas, por esto se presentan múltiples elementos de este grupo en un mismo mineral. La ocurrencia mineral se asocia a carbonatos, fosfatos, silicatos y óxidos (Fig. 12), destacan la bastnasita, principal mena de LREE's, monacita contiene LREE's y HREE'S, y la xenotima, principal fuente de HREE's en el mundo. Minerales accesorios, tales como, apatito, circón, monacita y allanita, tienen muy altos coeficientes de distribución de tierras raras (Puche et al., 2000).

Grupo	Mineral	Fórmula química
Carbonatos	Bastnasita	(Ce, La)(CO ₃)F
	Parisita	Ca(Ce,La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂
	Cebaita	Ba ₃ (Ce,Nd) ₂ (CO ₃) ₅ F ₂
	Huanghoita	Ba(Ce, La, Nb)(CO ₃) ₂ F
Fosfatos	Monacita	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄
	Xenotima	YPO ₄
	Apatito	Ca ₅ (Po ₄) ₃ (F,Cl,OH)
Silicatos	Cerita	(Ce,Ca) ₉ (Mg,Fe)(SiO ₄) ₃ (HSiO ₄) ₄ (OH) ₃
	Gadolinita	(Ce, La, Nd,Y) ₂ FeBe ₂ [O SiO ₄] ₂
	Allanita	(Ca,Ln) ₂ (Al,Fe) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
Óxidos	Euxenita	(Ln,Ca,U,Th)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆
	Loparita	(Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe)O ₃

Figura 12: Principales minerales de mena de REE's (Fuente: Modificado de Villela et al., 2016).

Los depósitos asociados a los REE's, son pocos y variados, asociada su explotación principalmente a complejos de carbonatita e intrusiones alcalinas, algunos modelos no tienen más de un ejemplo conocido, otros son producto de la superposición de procesos, cayendo en más de una categoría, de esta forma la

clasificación de estos se hace difícil. Los principales depósitos explotados durante los últimos años se encuentran en China, además hay en Rusia, Australia, USA y Kasajistán (Fig. 13). Se asocia a la subproducción de elementos como niobio, titanio, fosfato, vermiculita, barita, fluorita, cobre, calcita y circonio. Otros enriquecimientos como manganeso, estroncio, tántalo, torio, vanadio y uranio también son asociados a las REE's.



Figura 13: Ubicación de principales yacimientos de REE's, en naranja yacimientos de explotación de REE's como mena primaria, y en azul explotación como mineral secundario (Fuente: Villela et al., 2016).

Depósitos en rocas ígneas alcalinas

Estos depósitos se caracterizan por la ocurrencia de HREE's, Y, Zr, Nb, Ba y Li, en rocas ígneas alcalinas, empobrecidas en SiO_2 respecto al Na_2O , K_2O y CaO , y enriquecidas en elementos incompatibles, asociado a sistemas de rift continental y a zonas de intraplaca oceánica en islas volcánicas, también por reemplazo de carbonatos asociados con intrusiones alcalinas, vetas y diques cortando complejos ígneos alcalinos y rocas circundantes y también en los suelos y otros productos de meteorización de las

rocas alcalinas (depósitos residuales). Un ejemplo de yacimiento de este tipo es Lovozero en Rusia, asociado a intrusiones alcalinas ultrabásicas.

Carbonatitas

Las carbonatitas son rocas ígneas poco comunes derivadas de magmas ricos en carbonatos enriquecidas en LREE's, cuya mena principal corresponde a la bastnasita. Asociado principalmente a sistemas de rift continentales, y los carbonatos, principalmente calcita, dolomita y ankerita, corresponden a más del 50% de la composición de las rocas, junto a un porcentaje en SiO₂ menor al 20%. Destacan los depósitos Mountain Pass, USA y Maoniuping y Xishan, China, dónde la mineralización tiene ocurrencia en vetas o el depósito Mount Weld en Australia que corresponde a una zona alterada que sobre yace a una carbonatita.

Óxidos de hierro-REE

Depósitos de óxidos de hierro con altos contenido de tierras raras, dividido en dos subtipos, óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG); y óxidos de hierro-apatito (IOA). Los minerales con REE presentes en estos son el apatito, monacita, allanita, xenotima y fluorocarbonatos. 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. Entre los exponentes de yacimientos IOCG en el mundo se encuentra, Olympic Dam, Australia; Bayan Obo, China; o Candelaria y Mantoverde en Chile. Ejemplos del segundo grupo, IOA, Yacimientos de magnetita-apatito asociados a rocas volcánicas o niveles altos de intrusión son Kiruna o Kirunavaara, en Suecia, El Romeral, Algarrobo y Los Colorados en Chile. A pesar de las altas concentraciones de REE's en estos yacimientos, su procesamiento metalúrgico aún es deficiente. Destaca por su parte como los yacimientos de mayor contenido de Fe en el mundo, principalmente constituido por hematita, los yacimientos *Banded Iron Formation* (BIF) que generalmente corresponden a edad precámbrica (~2500 Ma) asociado al evento geológico de oxigenación en el planeta.

Pegmatitas graníticas

Las pegmatitas son un grupo de rocas ígneas cuya textura consta de cristales porfídicos de gran tamaño. Generalmente de composición granítica, ubicado en las periferias de grandes cuerpos intrusivos graníticos, presentan enriquecimiento en Nb, Y y F. La mayoría de estos yacimientos son explotados por otros minerales industriales como el feldespatos. Entre sus exponentes se encuentra el depósito Strange Lake en Canadá, con leyes de hasta 9330 ppm de REOs. Con excepción de este último, las pegmatitas de esta familia son cuerpos generalmente pequeños con mayor interés económico para coleccionistas de minerales.

Depósitos residuales

Estos depósitos se forman por la meteorización profunda de rocas ígneas, formando un único perfil de suelo de decenas de REO's. El proceso de formación de suelos concentra minerales pesados, formando una capa enriquecida en metales sobre la roca no meteorizada que subyace al suelo. Cuando un depósito de elementos de tierras raras de baja ley, como carbonatitas o rocas ígneas peralcalinas, sufre este tipo de meteorización, se forma una capa enriquecida en REE con concentraciones económicas. Estas condiciones suelen darse en suelos lateríticos (ricos en hierro y aluminio) y en bauxitas (suelos arcillosos ricos en aluminio).

Arcillas iónicas

Grandes depósitos de arcillas con concentraciones bajas de REE's (0,04% - 0,25% REOs), formados en zonas tropicales con alto grado de alteración supérgena donde se da la meteorización de granitos, que dan origen a suelos ricos en arcillas. A la vez, la acción lixivante de las aguas meteóricas transportan los elementos de tierras raras de las rocas graníticas, hasta que se fijan débilmente, por adsorción iónica, a las arcillas formadas. A pesar de su baja concentración de elementos de tierras raras suelen ser económicamente factibles, al tratarse de un proceso metalúrgico más sencillo, por medio del uso de ácidos débiles, y costos de operación más bajos. Uno de los mayores exponentes de este tipo, son las minas de arcillas del sur de China (South China Clays).

Placeres o paleo placeres de minerales pesados

Depósitos de playa actuales o antiguos, con alto grado de erosión mecánica, donde los minerales pesados fueron separados y acumulados por acción física. Sus principales minerales de mena incluyen a la monacita, y xenotima, generalmente recuperados como subproducto de la extracción de minerales pesados como ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2) y circón (ZrSiO_4). Estos yacimientos son fuente de LREE y torio (Th). Se trata del tipo de yacimiento más importante hasta la década de los 60's. Algunos ejemplos son Beihai en China, Chavra en India y Buena en Brasil.

Depósitos en vetas

Yacimientos asociados a mineralización de ocurrencia vetiforme, con composiciones carbonáticas y fosfáticas, con impurezas de REE's, se asocia a mineral como monacita. En el mundo han sido explotadas en África y China. Los ejemplos más conocidos de estos depósitos son Maoniuping y Xishan en China.

2.2. Distribución cobalto, REE's y elementos asociados en Chile

Actualmente, la riqueza mineral de Chile cuenta como principal exponente al cobre, seguidos por minerales de hierro, manganeso, oro, plata y zinc en menor medida. A su vez, elementos como molibdeno, oro, plata, son explotados como subproducto de la minería del cobre, entre otros. El ambiente de arco continental, producto de la subducción de la Placa Oceánica de Nazca bajo la Placa Continental Sudamericana, genera procesos geológicos que favorecen la formación de yacimientos de un gran rango de variedades, entre los que se cuenta con los yacimientos supergigantes del tipo pórfido cuprífero, yacimientos de metales base del tipo skarn y vetas, yacimientos de metales preciosos en vetas y brechas epitermales y mesotermiales, oxidados de hierro cobre-oro (IOCG), yacimientos de hierro-apatito (IOA), yacimientos de vetas y mantos de cobre-oro-cobalto, entre otros (Fig. 14) (Maksaev, 2001).

En depósitos de Chile se presenta la mineralización de cobalto en zonas hipógenas y en zonas de enriquecimiento secundario, similar a la disposición del

enriquecimiento de cobre. La mineralogía hipógena se define por cobaltita (CoAsS) principalmente, y la zona enriquecida oxidada, se caracteriza por 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) (Townley et al., 2017a).

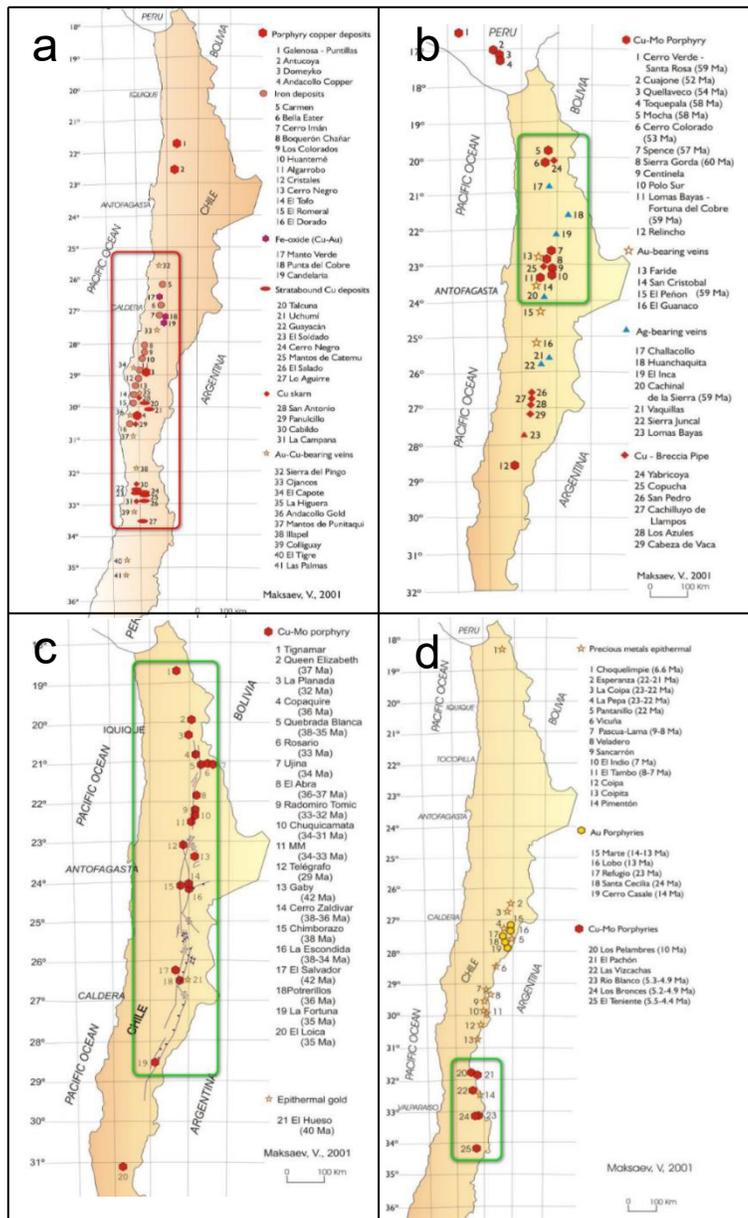


Figura 14: Cinturones metalogénicos con potencial de cobalto, ordenados de mayor a menor importancia. A. Yacimientos de tipo IOCG, IOA, con potencial de cobalto como mena primaria, ubicada en la Cordillera de la Costa, relacionado directamente a la Franja Ferrifera y al SFA, generado en el ambiente de arco y tras arco del Cretácico Inferior. B. Yacimientos de pórfidos cupríferos, vetas de oro y plata, y brechas de chimeneas del Paleoceno, en el flanco occidental de la cordillera de Domeyko, con potencial a evaluar de cobalto como subproducto por su relación con Cu, Fe, Ni y As. C. Yacimientos de clase mundial, de pórfidos cupríferos del Oligoceno superior-Eoceno inferior, hospedados a lo largo del Sistema de Fallas Domeyko (SFD), con potencial de cobalto como subproducto a evaluar. D. Yacimientos epitermales y pórfidos auríferos y cupríferos del Mioceno, con potencial de cobalto como subproducto a evaluar (Fuente: Modificado de Makshev, 2001).

La ocurrencia del cobalto y tierras raras, se ve relacionada principalmente a yacimientos IOCG e IOA, asociados a la franja metalogénica del Cretácico Inferior o

también llamada La Franja Ferrífera Chilena, con dimensiones de ~25 km de ancho por ~600 km de largo, dispuesta de forma paralela a la costa, entre las regiones de Atacama y La Serena (26°-32°S) hospedadas principalmente en el arco y trasarco Cretácico en rocas metamórficas paleozoicas, como también en rocas intrusivas y volcánicas, y en menor medida sedimentarias de edad Cretácico Inferior, contienen recursos de ~7000 millones de toneladas con una ley superior a 30% en Fe total, Entre sus exponentes tenemos a Candelaria y Manto Verde como IOCG, y yacimientos como Cerro Negro, Los Colorados y El Romeral, del tipo IOA. Con leyes menores a las deseables, los elementos en cuestión, guardan relación a yacimientos de pórfidos cupríferos de la franja metalogénica desarrollada a lo largo del periodo Paleógeno y Neógeno, que incluyen yacimientos súper gigantes a monstruosos de clase mundial del tipo pórfidos cupríferos, yacimientos de vetas epitermales de oro y plata, y ocurrencias menores de chimeneas de brecha de cobre, cuya evaluación como subproducto estaría condicionada a su ocurrencia mineral y su predicción geometalúrgica (Townley et al., 2017).

La explotación de cobalto como mena primaria en Chile, se da principalmente entre los años 1844 y 1944, durante la Segunda Guerra Mundial, por su uso en metales de aleación. Se distinguen los siguientes distritos, Distrito Tambillos, región de Coquimbo; distrito San Juan, al sur de Freirina; los valles del río Maipo y río El Volcán, región Metropolitana; y los distritos Los Loros y Sierra Ladrillos en Copiapó. El distrito Sierra Ladrillos, que corresponde al área de estudio, guarda antecedentes de investigación por evaluación del potencial de cobalto, en el trabajo realizado por Geoexploraciones Ltda. en 1983, en el marco del proyecto, Cobalto – Copiapó, diversificación de la pequeña y mediana minería, de las Secretarías Regionales de Planificación y Coordinación (SERPLAC), en este se puede encontrar análisis de concentración de cobalto, con resultados de leyes entre 0,13% y 0,22%. A su vez, existen antecedentes de estudios geológicos en el área, como el informe realizado por Exploraciones Geológicas ROMEXPLOR en el 2016, el cual cuenta con un mapa geológico desarrollado con el Software AutoCAD, de la Mina La Chilena (Filip, 2016); junto a la información de la campaña de muestreo geológico realizada entre los años 2013 y 2017 por la compañía Minera Nittetsu Chile Ltda., del proyecto Los Compadres

en el área de estudio, el cual se encuentra de libre acceso en la plataforma SIGEX, del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Destacando la producción pretérita en cobalto de Chile tenemos a La Cobaltera, Distrito San Juan (Fig. 15), cercano a Freirina, entre Vallenar y Huasco, explotado desde 1865, está constituido por rocas metamórficas del basamento Paleozoico, hacia el oeste, sobre yacido por rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico Superior, hacia el sur y este, todo intruido por rocas plutónicas del Jurásico Superior y Cretácico Inferior, cuyo control estructural es asociado al SFA (Moscoso et al., 1982). Su mineralización en cobalto con leyes entre 0,001% y 1,95%, ocurre principalmente como cobaltita (1,6% de Co), y eritrina (hasta 6,4% de Co) secundaria, con contenidos variables de cobre (7,9% - 0,037%), oro (1,1 g/t a 0,1 g/t), plata (8,8 g/t a 0,5 g/t), níquel (0,49% a 0,023%) y cadmio (4,7 g/t a 0,023 g/t), con ocurrencia mineral en vetas y mantos de cobre-oro-cobalto. A su vez, destaca otro exponente importante, el distrito Tambillo (Fig. 15), a 33 km de La Serena, región de Coquimbo, con mineralización tipo IOCG tipo manto, vetas y brechas con mineralización de cobre-oro-cobalto asociado al Sistema de Fallas El Romeral, hospedado en rocas intrusivas del Cretácico Inferior presentando facies de metamorfismo de contacto de alto grado, con mineralización estratiforme en rocas volcánicas, sedimentarias del Jurásico Superior, Cretácico Inferior, específicamente, en la base de la Formación Arqueros. En 1942 sus leyes de cobalto como cobaltita, variaban entre 4 y 5% (Emparan y Pineda, 2006).

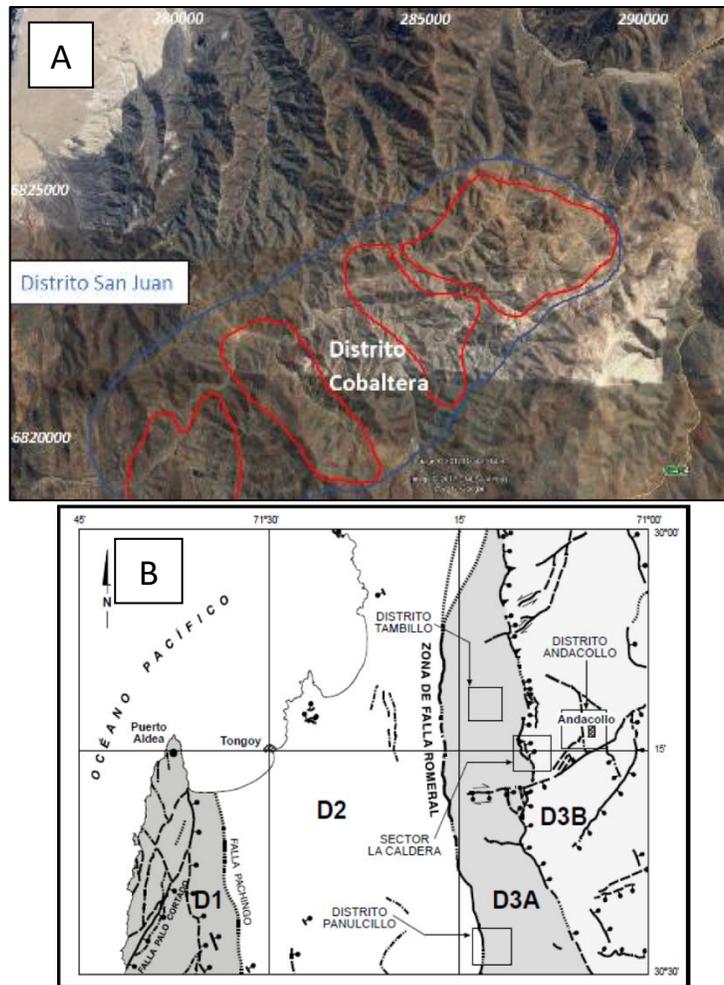


Figura 15: A. La Cobaltera en Distrito San Juan, encerrados en rojo, de izquierda a derecha, minas Labrar, Quebradita, El Romero y Fraguita. B. Contexto metalogénico distrito Tambillo, comuna de Andacollo, sur de La Serena (Fuente: Emparan y Pineda, 2006).

Existen registros de ocurrencia de sulfuros-arseniuros de cobalto con leyes promedio de 0,5 y 0,7 % y máximas entre 2,4 y 2,58%, en rocas volcánicas y sedimentarias del tras arco de Chile central, sector Las Merceditas, valle de El Volcán, Cajón del Maipo, Región Metropolitana. A su vez, También asociado con este arco volcánico, se encuentran yacimientos del tipo estrato ligados de cobre, como el yacimiento El Soldado, en la región de Valparaíso, teniendo una impronta geoquímica de cobre, con subproducto de plata; yacimientos del tipo skarn de cobre, entre los que se cuenta el Distrito Cabildo, región de Valparaíso, y Distrito San Antonio y Panulcillo en la región de Coquimbo, donde, a su vez, se da la ocurrencia de yacimientos de

manganeso, que incluyen los distritos Corral Quemado, Fragua, La Liga, Lambert, entre otros.

En el caso de las REE's, se reportan en Chile los siguientes tipos de depósitos, depósitos residuales de arcillas adsorbentes, sur de Chile; depósitos de óxidos de hierro-apatito (IOA); y depósitos de uranio. Entre estos destacan el Proyecto Minero El Cabrito en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, comuna de Penco, yacimiento de arcillas adsorbentes. Junto a este destacan, con yacimientos de REE y uranio, Sierra Áspera, Cerro Carmen y Veracruz en la Cordillera de la Costa de la región de Atacama (Villela et al, 2016).

En el caso de los yacimientos tipo IOA, en general son depósitos de gran volumen (>500 Mton) caracterizados por valores altos de tierras raras en apatita, su mineral de mena corresponde a la magnetita, y hematita como mineral secundario, generado por la oxidación de la magnetita, también llamada martitización, y solamente trazas de fases minerales sulfuradas, pirita, arsenopirita, calcopirita, entre otros. Junto a estos se da la ocurrencia de apatita, que generalmente fluctúa entre el 0,5% y 30% de la mineralización. La apatita puede presentarse como fluorapatito, donde el elemento F puede ser reemplazado por Cl, asociado a este ocasionalmente se da la ocurrencia de menor cantidad de anfíboles y piroxenos, en algunos depósitos se observa abundante calcita. Los depósitos de magnetita-apatito asociados a rocas ígneas, contienen actinolita, granate, escapolita, con o sin piroxeno, y en general acompañadas de alteración calcosilicatada, y albitización en ciertos casos, como alteración profunda pre-mineralización al igual que en yacimientos pórfidos cuprífero. La paragénesis elemental incluye, alto contenido en V (>1000 ppm), bajo Cr (<10 ppm), bajo contenido de Ti (100-1000 ppm), y posible adición de 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). A lo largo del tiempo geológico, estos yacimientos pueden presentar la adición de Cu y Au, como adición tardía de sulfuro de Cu y de Au junto a típica alteración calcosilicatada con magnetita como se da el caso de la Mina Candelaria o sericitización con alto contenido en hematita como es el caso de Manto verde.

2.2.1. Cobalto y REE's asociado a relaves

A lo largo de la historia minera de Chile, Los minerales de Cu y Fe, con alto potencial de guardar impureza de cobalto en su estructura cristalina, eran tratados por recuperación principal de Cu, derivando los contenidos de Co como ganga en los depósitos de relaves. De esta forma los gigantescos volúmenes de rocas explotadas y procesadas, la mayoría de los minerales de cobalto, junto a la pirita, pirita arsenical y arsenopirita, con altos contenidos en cobalto, fueron concentrados en los relaves (Townley et al., 2017).

Entre los relaves de mayor potencial en concentración de cobalto, próximo al norte de Freirina, asociados al Distrito San Juan, tenemos depósitos de relave de sobre 500.000 Tm, con concentraciones de hasta 0,11% de cobalto y 0,23% de cobre, otros relaves aledaños a este, muestran concentraciones en muestras de superficie de 0,22% – 0,35% de cobalto, y en pilas remanentes del Distrito Tambillo, potencial de recursos de cobalto con leyes menores al 1%.

En cuanto a los REE's, en el estudio de estado del mercado de REE'S en Chile, de Villela y otros en el 2016, se analiza la concentración de REE's y cobre en distintos relaves de la minería del cobre chileno (Fig. 16), destacando las concentraciones del Tranque Carola (COEMIN), con un promedio de 525 ppm de REE, junto a la Planta Vallenar y el Tranque El Salado que tienen valores altos de REE de 370 y 350 ppm respectivamente, junto a leyes de cobre interesantes del 4,1% y 1,2% respectivo, las que, del punto de vista económico, tienen una alta viabilidad de ser reprocesados, teniendo contenidos de cobre de interés económico.

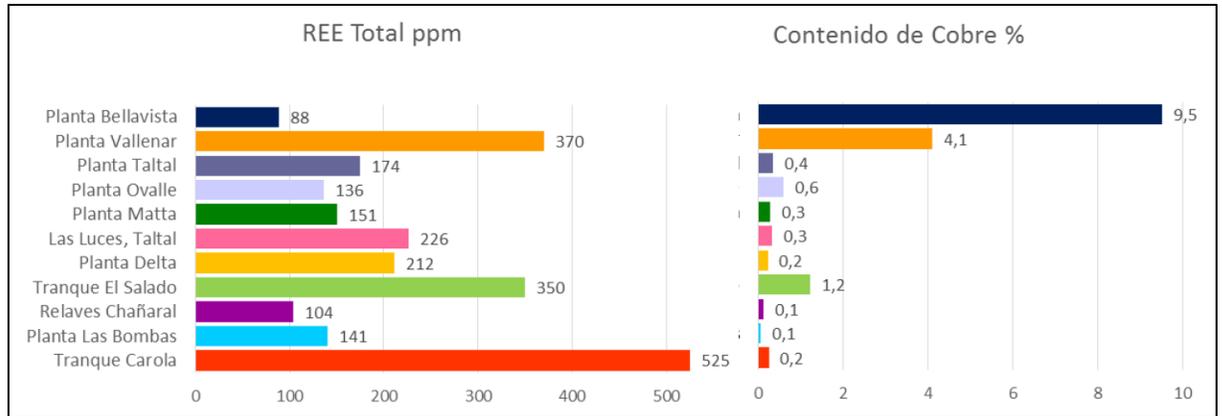


Figura 16: Contenido promedio de REE's (ppm) y cobre (%) en relaves de minería del cobre (Fuente: Villela et al., 2016).

2.3. Marco geológico regional

El Distrito Sierra Ladrillos, se encuentra hospedado en unidades geológicas mesozoicas. La historia geológica del área de estudio, se relaciona a las fases finales del ciclo Pre-Andino, (~285 Ma a Rhaetiano), y parte inicial del ciclo Andino (~200 Ma a Albiano) (Charrier et al., 2007). El ciclo Gondwánico, se ve finalizado de forma contemporánea a la orogenia San Rafael, donde las condiciones geotectónicas que generaron la amalgamación de Gondwana, pasarían desde condiciones colisionales, a una configuración transicional post-amalgamiento de Gondwana, que culminarían en el desmembramiento de Pangea (Oliveros et al., 2020).

Se da inicio al ciclo Pre-andino a finales del Pérmico y a lo largo del periodo Triásico (~285 a ~200 Ma), cuyas características principales incluyen un “flat-slab” o subducción de bajo ángulo, junto a una deriva continental de muy baja velocidad, lo cual llevaría a un aumento de la temperatura del manto superior y fusión cortical asociada, generando grandes volúmenes de magma en la costa del norte de Chile, los Andes Chilenos, y Argentina (Charrier et al., 2007). De esta forma comenzaría un “roll-back” negativo, o retroceso de la placa oceánica subductante. Estas condiciones generarían un adelgazamiento cortical por esfuerzos extensivos, con delaminación y erosión térmica, producto del flujo astenosférico bajo la corteza continental; grandes cuencas termo

mecánicas subsidentes sin eruptivas, tipo syn-rift continental, con orientación NNW–SSE; magmatismo anorogénico por fusión cortical extensiva; volcanismo con firma geoquímica bimodal félsico-basáltica, indicando grado de contaminación cortical y firmas mantélicas subordinadas (Oliveros et al., 2020).

Al comienzo del ciclo Andino (Fig. 17), se da inicio a una significativa deriva continental, para el límite Triásico-Jurásico ~200 Ma, con un margen activo, entre la placa Phoenix (o Panthalassa) y la placa Sudamericana, donde la placa oceánica entraría con una dirección oblicua hacia el SE, y una velocidad de dispersión oceánica en ~5 cm/año (Morata y Aguirre, 2003; Rossel et al., 2013). Estas condiciones generarían una consecuente subducción de alto ángulo o tipo Mariana que daría inicio al volcanismo andino de la Cordillera de la Costa, con condiciones transtensionales sinestrales a extensionales en la corteza continental, volcanismo de geoquímica bimodal, ahora dominado por adiciones mantélicas al magmatismo (Oliveros et al., 2007).

CICLO TECTONICO ANDINO			
PERIODOS	ETAPAS	SUBETAPAS	EDAD
Periodo Tardío	} Tercera Etapa		Paleógeno Tardío al Presente
		} Segunda Etapa	Segunda Subetapa
	Primera Subetapa		Cretácico Inferior tardío a Cretácico Tardío
Periodo inicial	} Primera Etapa	Segunda Subetapa	Kimmeridgiense-Titoniense a Albiense
		Primera Subetapa	Jurásico Inferior tardío a Kimmeridgiense

Figura 17: División del Ciclo Tectónico Andino (Fuente: Modificado de Charrier et al., 2007).

Estas condiciones darían paso al inicio del Arco Magmático Jurásico de la Costa, o el Arco de La Negra, que depositaría sobre ~5.000 m de lavas basalto-andesíticas, que constituirían a la Formación La Negra (límite Sinemuriano–Pliensbachiano), representado de forma contemporánea, entre los 26°S a 30°S, por la Fm. Sierra Fraga, volcanoclástica, con intercalación marino transicional (Bajociense-Oxfordiense), esta última se interdigitaría con la Fm. Lautaro (Toarciense tardío), representante volcanoclástico de la cuenca de tras arco, cuyo techo contaría con facies sedimentarias representativas de una regresión marina, con una transición marina a continental debido a la progresión oriental del arco, representando de esta forma la Primera Subetapa de la

Primera Etapa del ciclo Andino (Charrier et al., 2007). En la Segunda Subetapa de la Primera Etapa, se deposita la Formación Punta del Cobre en concordancia con Fm. La Negra, en el límite Jurásico-Cretácico, compuesta principalmente por rocas volcánicas en base y volcanoclásticas a techo, representadas por sus miembros Geraldo-Negro y Algarrobos respectivamente. Luego, la Formación Bandurrias, representante de la transición arco-trasarco, en concordancia a Fm. Punta del Cobre, está compuesta de ~2500 m de sucesiones volcánicas y volcanoclásticas predominantes, con intercalaciones sedimentarias detríticas y calcáreas de ambiente marino (Hauteriviense a Aptiense temprano), las que se encuentran interdigitadas hacia el Este, por el Grupo Chañarcillo de unos 1700 a 2000 m de potencia. El miembro más oriental de la Fm. Bandurrias, aflora al oeste del área de estudio, junto a parte de las formaciones representativas del Gp. Chañarcillo (Fig. 18) (Arévalo, 2005; Charrier et al., 2007).

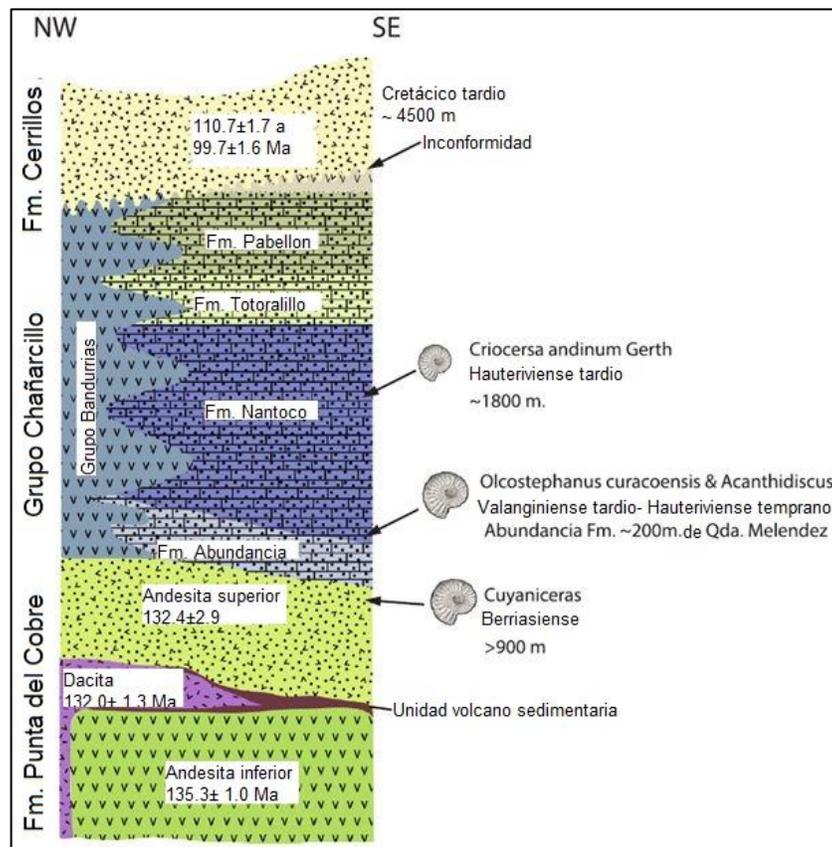


Figura 18: Columna estratigráfica del distrito Sierra Ladrillos, con edades crono estratigráficas y fauna fósil (Fuente: del Real et al., 2018).

El Grupo Chañarcillo, corresponde a la cuenca subsidente de syn-rift extensional del trasarco del Cretácico temprano, de dirección NNE-SSE, a lo largo de ~200 km entre Copiapó y Vallenar, que hoy en día constituye gran parte del Anticlinorium de Tierra Amarilla, estructura regional anticlinal tumbada (Fig. 19). El Grupo Chañarcillo, sobre yace a la Formación Punta del Cobre, está compuesto por ~2000 m de sedimentos marinos intercalados con secuencias volcanoclásticas, entre el Valanginiense-Aptiense, y se constituye por las formaciones: Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón, de base a techo (Charrier et al., 2007). Este grupo está demarcado por varias secuencias transgresión-regresión, que se ven reflejadas perfectamente en las formaciones que la conforman, incluyendo deposición de estratos de crecimiento o “synrift growth strata” (Martínez et al., 2013).

Cabe destacar la actividad tectónica intermitente ejercida por el Sistema de Falla Atacama, sistema que controla en gran medida la mineralización sin tectónica de la Franja Ferrífera del Norte de Chile, con una traza de más de 1000 km de largo, desde Iquique hasta el sur de La Serena (20°S-32°S). El SFA comienza su actividad entre el Jurásico tardío y el Cretácico temprano (~144-117 Ma). Este sistema estructural generaría el acomodamiento de la convergencia oblicua, a través de fallas de rumbo de cizalle sinistral, llevando una actividad sedimentaria, magmática, hidrotermal y efusiva, contemporánea al movimiento del SFA (Cembrano et al., 2009). Posee un régimen tectónico variable a lo largo de su eje, variando desde transtensional sinistral a transpresional sinistral, estas condiciones son compatibles en una cizalla sinistral simple a lo largo del arco magmático N-S, esto debido a la geometría arqueada a largo del rumbo del SFA (Ruthven et al., 2020).

A finales del Cretácico Inferior, con la apertura sur del océano Atlántico, se inicia la separación de África y América del Sur, en el margen occidental de Gondwana, donde se reconocen fases de rápida convergencia entre la Placa Farallón y la Placa Sudamericana, durante el Aptiense-Albiense. Estas condiciones generarían una inversión tectónica de las cuencas de tras arco asociado la Fase orogénica Peruana, donde las fallas normales de alto ángulo que controlan las cuencas extensionales revierten su movimiento, producto del cambio de esfuerzos tectónicos a transpresivos-compresivos,

generando el cese de la sedimentación marina (Martínez et al., 2013). En el área de estudio, se asocia a este límite del Cretácico Inferior marino, y el Cretácico Superior volcánico, con cuerpos ígneos hipabisales filonianos tipo stock elongados de composición intermedia-ácida (SERPLAC, 1983). En estas condiciones se deposita la Formación Cerrillos en el límite del Cretácico Inferior y el Cretácico Superior, que corresponde a los primeros depósitos volcánicos de la segunda etapa del ciclo andino, y se encuentra en contacto erosivo con Formación Bandurrias y el Grupo Chañarcillo. Esta consiste en conglomerados intercalados con rocas piroclásticas y algunas lavas andesíticas y sedimentos continentales, con un total de 4500 m de potencia (Marschik y Fontboté, 2001).

La mineralización IOCG en el distrito Candelaria-Punta del Cobre, hospedada en zonas de fallas, brechas y litologías específicas, se forma entre los 122-110 Ma, con características de deformación transpresional y compresional, y mineralización, sincrónica al emplazamiento del batolito Copiapó, donde los mayores eventos mineralizadores ocurrieron alrededor de 118-112 Ma, los cuales concuerdan con las dos mayores fases de este batolito, correspondiente a los plutones La Brea y San Gregorio, y coinciden con la inversión de la cuenca Chañarcillo (~110 Ma). Esto habría inducido la adición de fluidos salinos de la cuenca, y fluidos magmáticos hidrotermales asociados a la intrusión. Estudios sobre la relación entre el Co y el Ni en el distrito Candelaria/Punta del Cobre, aledaño a la zona de estudio, indican una afinidad máfica intermedia de los fluidos hidrotermales involucrados, esto asociado al largo periodo de actividad de un marco tectónico extensivo a transtensivo generalizado, que pudo haber facilitado el ascenso de fluidos astenosféricos derivados del manto (del Real et al., 2020).

Para el Cretácico medio, las tasas de dispersión oceánica tendrían un gran aumento en su velocidad, originando la reactivación del movimiento de la placa Farallón hacia el NE, culminando en una tasa de ~14 cm/año, para culminar en marco tectónico compresional a transpresional en el Cretácico tardío, en el continente las tasas de erosión habrían alcanzado ~300 m/Ma, lo cual sugiere un alzamiento generalizado (Charrier et al., 2007). Desde este punto comienza la progresiva migración del arco hacia el este que continua hasta el día de hoy, que progresaría en la formación de los más grandes

yacimientos del tipo pórfido cuprífero de clase mundial, yacimientos epitermales de metales preciosos y pórfidos de oro, entre otros, a lo largo de la era cenozoica (Maksaev, 2001).

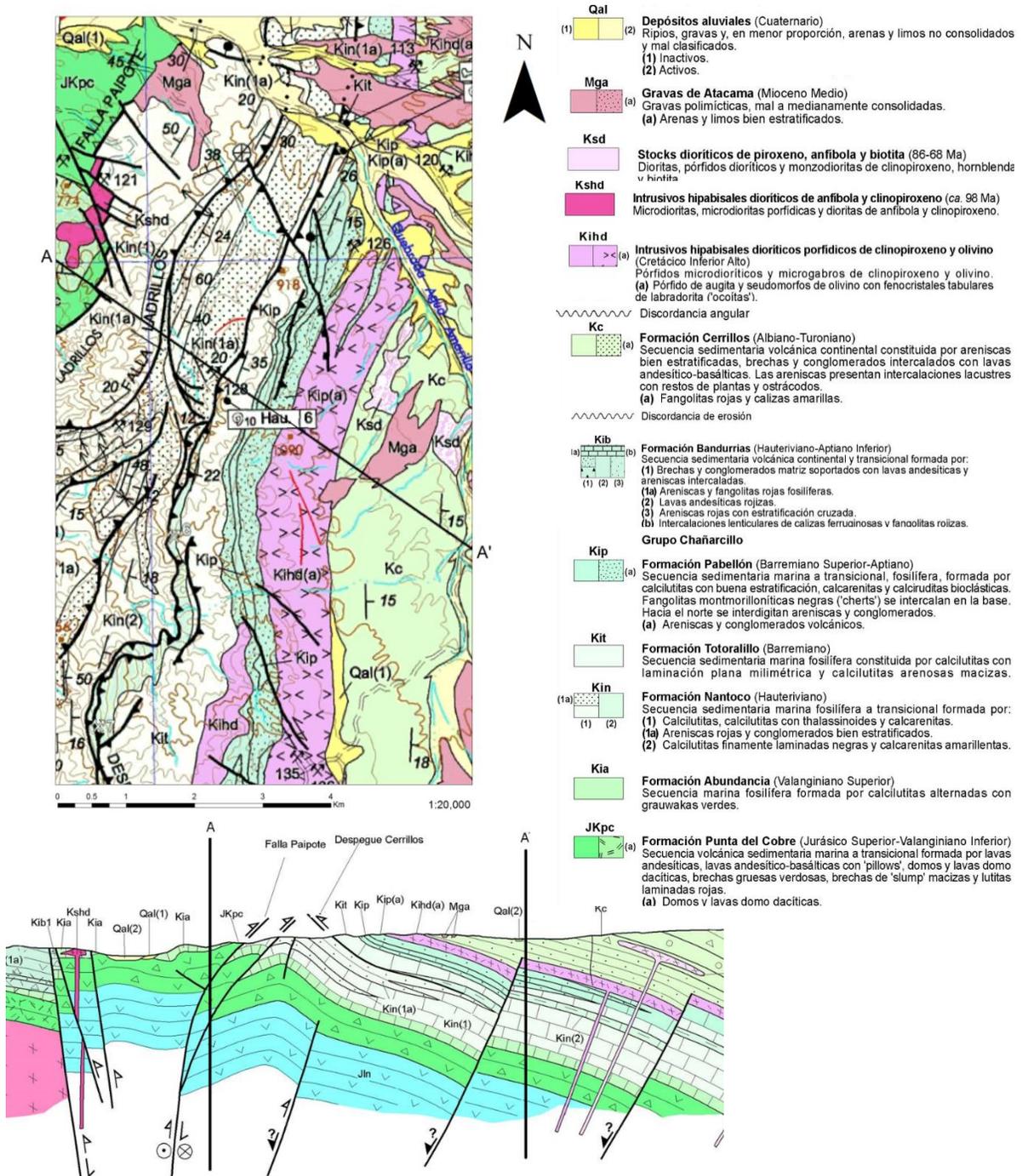


Figura 19: Sierra Ladrillos, extracto de la Carta geológica de Copiapó del área de estudio (Fuente: Editado de Arévalo, 2005)

2.4. Marco geológico local

A continuación se describe el marco geológico local, sobre la base del trabajo de Arévalo (2005), correspondiente a la Carta Geológica de Copiapó.

2.4.1. Unidades geológicas

En el área del proyecto se encuentran solo formaciones del Cretácico Inferior tardío, representadas por las Formaciones, Nantoco, Totoralillo y Pabellón, estas forman parte del Grupo Chañarcillo, y la Formación Bandurrias que se interdigita con las formaciones ya mencionadas.

Cretácico inferior

Formación Bandurrias (Kib): De edad Hauteriviense-Aptiense (~132-113 Ma), compuesta por secuencias volcánicas basalto-andesíticas a andesíticas, y traquiandesitas, interdigitadas por sedimentos volcanoclásticos terrígenos y tobas, y sedimentos someros calcilitas y calcarenitas desarrollada entre el arco y la cuenca de trasarco del Cretácico Inferior.

Grupo Chañarcillo

Formación Nantoco (Kin): De edad Hauteriviense (~132-129 Ma), sobre yace en concordancia a su antecesor (Formación Abundancia, no aflora en el área de estudio), con facies sedimentarias marinas fosilíferas a transicionales, con calcilitas y areniscas rojas, con evaporitas y calcilitas oscuras a techo, representando una plataforma calcárea que finaliza con una regresión en el Hauteriviense.

Formación Totoralillo (Kit): De edad Barremiense (~129-125 Ma) compuesta por calcilitas masivas con laminaciones planas y alto contenido fosilífero a techo, representando una nueva transgresión marina en el Barremiense.

Formación Pabellón (Kip): De edad Barremiense- Aptiense (~125-113 Ma), mantiene facies que responden a una regresión marina y emersión de la cuenca Chañarcillo, en el Aptiense, con secuencias sedimentarias marinas fosilíferas transicionales, calcarenitas bioclásticas, y areniscas y conglomerados volcánicos a techo.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Con el propósito de cumplir con los objetivos propuestos, se desarrollaron las siguientes metodologías, las cuales incluyen: revisión bibliográfica, campaña de mapeo geológico de superficie, toma de muestras, análisis macroscópico y estereoscópico de muestras, muestreo geoquímico e interpretación de datos, entre otros aspectos que se explican a continuación.

3.1. Recopilación e investigación bibliográfica

En esta primera etapa, se procedió a recopilar la información bibliográfica disponible sobre el marco geológico, regional y local del Distrito Sierra Ladrillos, junto a antecedentes investigativos relacionados a la distribución y metalogénesis mundial y local del cobalto, REE's, y sus elementos asociados. Esta recopilación bibliográfica servirá de apoyo para realizar las interpretaciones finales en este trabajo.

3.1.1. Confección de bases de mapeo

Las características para la confección de la base de mapeo (Fig. 20), incluyen, Datum WGS84, Proyección UTM, Zona 19S, y dimensiones cartográficas de escala a 1:2000, ploteada en formato A2. Se emplea el uso de distintos software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), estos son: Arcgis 10.5 (Cartografía, edición de imágenes y combinación de bandas), AutoCAD 2010 (Cartografía), Google Earth Pro (Georeferenciación), Global Mapper 18 (Traspaso de información entre software) y SASplanet (obtención de imágenes satelitales).

En cuanto a la imagen satelital utilizada, obtenida con el Software SASplanet, del satélite Bing Maps, posee una resolución de 19z de unos 0,5 x 0,5 m² de tamaño de pixel, editada con el uso de Arcgis 10.5, aplicando un estiramiento del contraste (stretch) del tipo Standard Deviations con un valor de 2.2.

Para la confección de la topografía, o curvas de nivel, se utilizan imágenes de Modelos de Elevación Digital (DEM) del satélite ALOS PALSAR (2006-2011) de la

fuelle de Alaska Satellite Facility, Distributed Active Archive Center (ASF DAAC), en la base de datos Vertex Data Search, específicamente una imagen tomada el 7 de abril 2011, con una resolución máxima de 10 m, para ser generados los niveles topográficos con el software Arcgis 10.5. Elementos como, curvas de nivel, redes de drenajes, entre otros, facilitan el mapeo geológico en terreno del lugar.

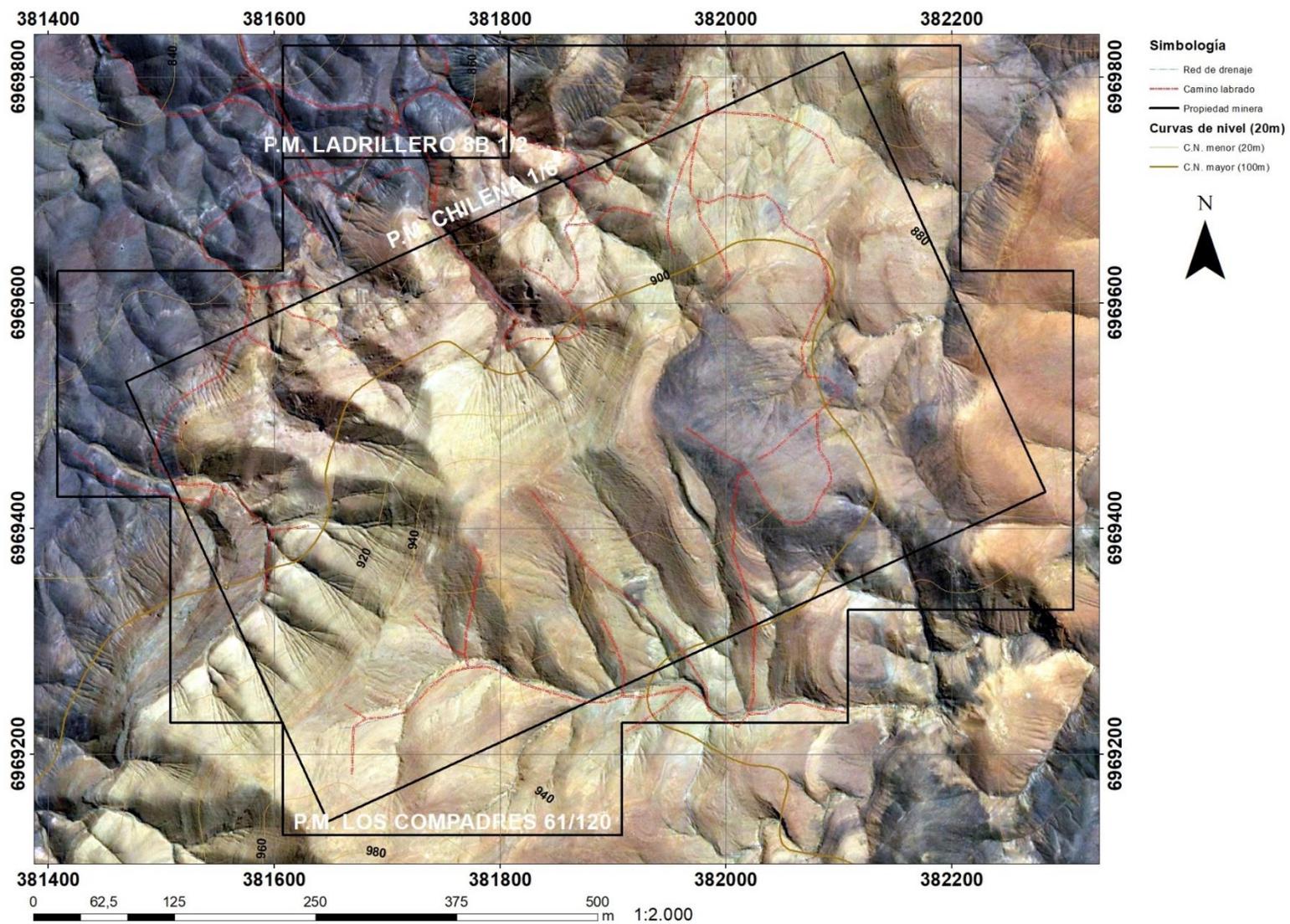


Figura 20: Mapa base del sector de estudio, P.M. La Chilena 1-6, Distrito Sierra Ladrillos (Fuente: Edición propia).

3.2. Etapa de terreno

La segunda etapa corresponde al trabajo de mapeo geológico en terreno, con un total de 10 días de mapeo, los cuales fueron ejecutados durante campañas intermitentes entre septiembre y octubre del 2019, octubre del 2020, y junio del 2021. De esta forma se realizó el levantamiento geológico de superficie de la Propiedad Minera La Chilena 1-6, con énfasis en descripción y definición de litologías, alteraciones, mineralización y estructuras, además de la recopilación de muestras y datos estructurales, para posteriormente ensamblar y analizar estas capas de información con fin de lograr esclarecer la alteración asociada al cobalto, REE's y sus elementos relacionados.

3.2.1. Mapeo geológico

Una vez en el área de estudio, se procedió a mapear el sector, demarcando puntos de control, de codificación asignada por el día de terreno (X) y número de punto (Y) con patrón "D_XP_Y", recopilando en cada punto información de terreno como: ubicación (proyección UTM); descripción, codificación y recolección de muestras, para reconocimiento de litologías, contactos, alteraciones y mineralización; medición y reconocimiento de estructuras tectónicas con su respectiva toma de mediciones en "dip/dipdirection" o "manteo/dirección de inclinación"; junto a información de importancia geológica en general y registro fotográfico del sector muestreado.

De esta forma, se plasmó la información cartográfica en un mapa de terreno a una escala de 1:2000, confeccionado en la etapa de pre-terreno, cuya información coetánea a la campaña presencial, facilitara la interpretación y desarrollo cartográfico de mapa geológico digital, por medio de software de modelación cartográfica, como Arcgis 10.5, Adobe Illustrator Portable. Recopilando la información estructural, litológica, de alteración, mineralógica, y conjugación geológica en general.

3.2.2. Recolección de muestras.

Este estudio está desarrollado en base a las muestras recolectadas en terreno, las cuales fueron obtenidas directo desde la roca huésped en superficie, con ayuda del martillo geológico, junto a muestras de marinas y calicatas de trabajos sobre la superficie, y en labores sub-superficiales de baja profundidad (hasta ~35 m). Para la codificación de las muestras se asignó el día de terreno (X) y número de muestra (Y) de forma “D_XM_Y”. La toma de muestras se hizo con preferencia a las zonas de interés geológico (zonas mineralizadas, contactos, zonas de alteración, litologías, etc.), y a zonas de acceso que favorecieran las condiciones de muestreo.

3.3. Etapa de laboratorio

En esta etapa de trabajo, se procedió a la discriminación de las muestras más representativas obtenidas en terreno, que serán analizadas por medio del equipo de Fluorescencia de Rayos X Bruker S1 TITAN (XRF) y fotografiadas con el equipo Estéreo Microscopio Motic modelo Zoom SMZ-171. La fase de laboratorio se llevó a cabo en el laboratorio de investigación, del proyecto FIC-FNDR, “Núcleo de investigación de Cobalto y REE’s”, de la Universidad de Atacama.

3.3.1. Preparación de muestras

Para la selección de las muestras que se someterán a análisis, se tuvo presente los siguientes criterios. Las muestras más representativas de cada sector fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos X, teniendo mayor énfasis en las muestras que presentaran óxidos de hierro, o sulfuros de hierro, los cuales suelen hospedar el cobalto y sus elementos relacionados en sus estructuras atómicas. En cuanto a la codificación de las muestras seleccionadas, se mantiene el código original de la muestra (D_XM_Y), agregando en esta el número de trozo correspondiente (Z), de forma “D_XM_YT_Z”, por ejemplo, de la muestra número 3 del día 1, “D₁M₃”, se obtiene un total de 5 trozos representativos de la mineralización y litología del punto, codificando estas de forma, “D₁M₃T₁”, “D₁M₃T₂”, ..., hasta “D₁M₃T₅”. Además, cada uno de estos trozos puede

tener 1 o más zonas de análisis XRF en su superficie, demarcando estas como Zona A, Zona B, y así sucesivamente, por medio de un lápiz marcador.

3.3.2. Fluorescencia de rayos X

El análisis de las muestras preparadas se realizó en el espacio asignado dentro del laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y REE's, el análisis cualitativo y semi-cuantitativo preliminar o de prospección de los elementos químicos en cuestión, permitirá el fácil reconocimiento de la composición elemental de los minerales que les hospedan, utilizando el analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF) modelo S1 TITAN Bruker (Fig. 21), del Departamento de Geología de la Universidad de Atacama. Su mecanismo de operación consiste básicamente en bombardear una muestra con rayos X, de esta forma los electrones de las capas internas se ven expulsados y reemplazados por los de las capas externas, para recuperar la estabilidad el átomo, es así como cada elemento genera una firma de rayos X característica y en base a la medición de los rayos secundarios o la fluorescencia emitida, el analizador da cuenta de la presencia de los diferentes elementos y su grado de abundancia, en dos distintos modos de análisis, modo componentes generales, y modo traza.

El equipo XRF Bruker modelo S1 TITAN, permite detectar en un período inferior a 2 minutos de forma simultanea 48 elementos (%), en conjunción de sus dos modos de operación, entre ellos, 9 Óxidos mayores, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O CaO, TiO₂, MnO y Fe₂O₃; y 39 elementos traza, S, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th y U; con una precisión superior al 90%. Para el caso de este estudio, la medición geoquímica se centró en cuantificar el contenido de Co, REE's y sus elementos relacionados, de las muestras obtenidas.



Figura 21: Equipo portátil de Fluorescencia de rayos X (XRF) modelo S1 TITAN Bruker, Laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y Tierras Raras, Universidad de Atacama (Fuente: Edición Propia).

3.3.3. Lupa trinocular.

Posterior al análisis recopilatorio de los datos obtenidos en la Fluorescencia de Rayos X, se procede a la selección de muestras con anomalías en cobalto y REE's que logra analizar el XRF, serían las LREE's, lantano y cerio, y la HREE's, itrio. Las muestras seleccionadas poseen una concentración mayor o igual a 10 (ppm) o 10 (g/ton) que equivale a 0,001%, estas serán estudiadas por medio de análisis microscópico, en el laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y Tierras Raras, utilizando el Estéreo Microscopio Motic modelo Zoom SMZ-171 (Fig. 22), con Tablet de 10" y cámara incorporada con resolución de hasta 5.0 MP. Las especificaciones incluyen, rango de aumento de 0,75X – 50X, y oculares de aumento 10X e iluminación tipo LED. De esta forma, con uso del software correspondiente del instrumento estereoscópico, se obtendrán fotografías de la superficie de las muestras con mayor información, localizando puntos de interés mineralógico reconociendo la paragénesis y alteraciones asociadas a este y a sus elementos relacionados.

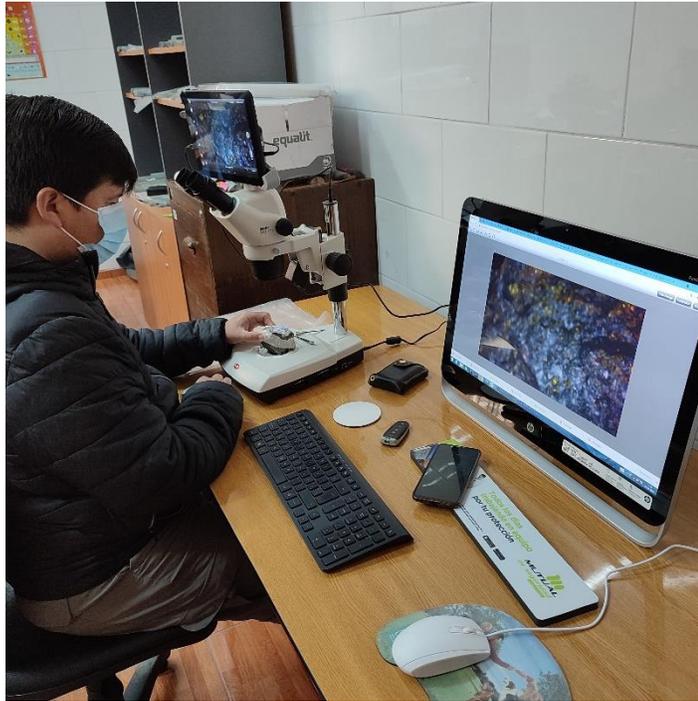


Figura 22: Estéreo Microscopio Motic Zoom SMZ-171, Laboratorio del Núcleo de Investigación de Cobalto y Tierras Raras, Universidad de Atacama (Fuente: Edición Propia).

3.4. Etapa de análisis estadístico

Ya en la última etapa de la metodología, con una gran cantidad de información recopilada, y la cuantificación de los contenidos de cobalto, REE's y elementos relacionados presentes, se da inicio a la etapa analítica, en la que se reconocieron las estadísticas de cada elemento, y la generación de gráficas correlativas por medio del uso de software MiniTab 20.3 y Microsoft Excel, que ayudarán al análisis estadístico detallado y visualización gráfica de datos, necesarios para el desarrollo de la etapa de discusión. Se trabaja en base al reconocimiento del comportamiento de los elementos formadores de roca, y elementos traza, con respecto al cobalto y las tierras raras que reconoce el equipo, en este caso La, Ce e Y. Dado esto, se podrá reconocer visualmente las relaciones positivas o negativas del conjunto de datos y cuáles de ellos parecen más interconectados.

Para facilitar el análisis gráfico estadístico, se genera una transformación logarítmica normal, una metodología aplicable en prospección geoquímica dada la naturaleza errática de las concentraciones de elementos traza, que al momento realizar la transformación, seguirán una distribución normal, o cercana a esta. Dado lo anterior, el análisis estadístico de la geoquímica del sector se verá generado por medio de gráficos univariados y multivariados, estos incluyen, estadísticas descriptivas básicas, histogramas de distribución, diagramas de cajas y bigotes, y análisis binario en diagramas de dispersión.

3.4.1. Estadísticas univariadas

Para los 9 óxidos mayores, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O CaO, TiO₂, MnO y Fe₂O₃; y 39 elementos traza, S, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th y U, se realizó un análisis de sus estadísticas básicas descriptivas, específicamente, media, desviación estándar, varianza, mínimo, mediana, máximo, cuartiles 1 y 3, frecuencia de datos; junto a los valores de asimetría (grado de simetría de concentración de valores del histograma) y curtosis (grado de concentración de valores del histograma), calculado sobre la transformación lognormal, útiles para la interpretación de histogramas. Para luego culminar el análisis univariado con el gráfico conjunto de cajas y bigotes.

3.4.1.1. Histogramas

Es uno de los gráficos estadísticos más populares, entrega la distribución estadística de la variable en cuestión, y sobre el grado de dispersión de los datos. Consiste en un diagrama de barras verticales, dispuestas en intervalos equidistantes, que muestran la distribución de una variable determinada. El histograma se complementa con la curva de frecuencias relativas (Fig. 23), el cual entrega información sobre la distribución de cada elemento dependiendo de su simetría, por medio de los valores de asimetría y curtosis, calculados sobre la base lognormal de transformación de los datos, valores que entregan información sobre la simetría o región favorable de la

concentración de los datos (asimetría), y también sobre el grado de concentración de los datos sobre esta región (curtosis), o incluso si existe un comportamiento bimodal con distintas familias de datos acumulados. Se analiza la distribución de los 9 óxidos mayores reconocidos por medio de XRF, y para 36 elementos traza representativos, incluyendo, S, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th y U.

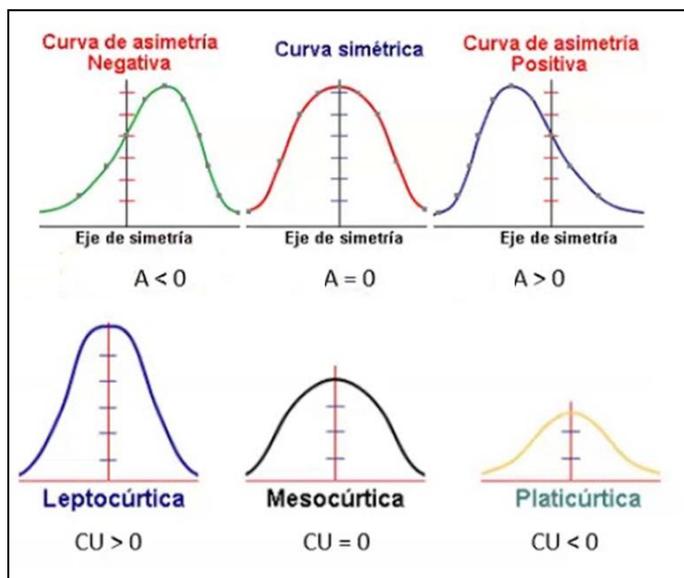


Figura 23: Grado de simetría de la curva de frecuencia relativa, entregado por el valor de asimetría (A), grado de distribución de datos con respecto a la media; y el valor de Curtosis (CU), grado de concentración de datos en la región central de distribución (Fuente: Edición propia).

3.4.1.2. Gráficos de cajas y bigotes

Este tipo de gráfico entrega información estadística básica resumida en sus diferentes componentes (Fig. 24). La caja representa el 50% de los datos, acotados por los extremos del rango inter cuartil, cuya longitud y límites están entregados por el primer y tercer cuartil, que son el 25% y 75% de los datos más frecuentes respectivamente. La barra central amarilla representa la mediana, la cual describe la simetría u oblicuidad de los datos, y la línea celeste que le acompaña representa a la media aritmética, o el valor intermedio del rango de datos. Los valores entre el extremo inferior y extremo superior de los bigotes representan los datos menos comunes pero que

se encuentran dentro del rango aceptable de dispersión de los datos, fuera de este límite se encuentran las concentraciones anómalas, o datos atípicos, demarcados por puntos verdes fuera de la figura. Por último, el máximo y mínimo, corresponde a los valores máximo y mínimo para el rango de datos.

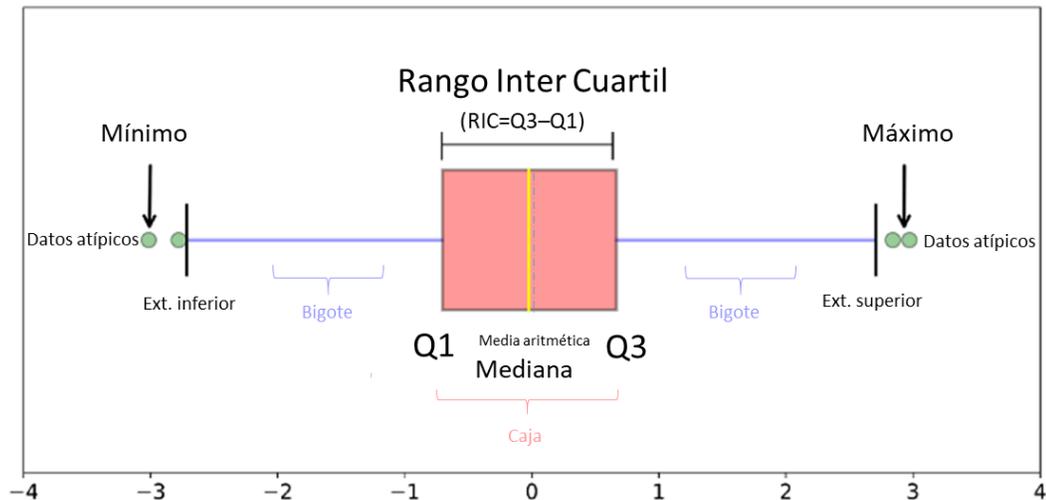


Figura 24: Gráfico de cajas y bigotes horizontal, utilizado en general para fácil reconocimiento de datos estadísticos descriptivos de la variable en cuestión (Fuente: Edición propia).

3.4.2. Estadísticas multivariantes

El análisis multivariable es representado por un conjunto de métodos estadísticos que permiten el análisis gráfico simultáneo de dos o más variables con el objetivo de identificar patrones y relaciones entre estas. Uno de estos métodos es el análisis por medio de diagramas de dispersión, que corresponde a un análisis binario, en el que se analiza el comportamiento de dos variables, en este caso variables elementales.

La relación entre dos variables puede ser resumida a través de un coeficiente de correlación, que guarda relación con la pendiente de la correlación lineal generada en el diagrama de dispersión, a través del uso de los datos transformados a lognormal. La pendiente de la función normal generada por la conjunción de las 2 variables, será obtenida con la metodología de correlación de Pearson, este dato entrega el grado de “proporcionalidad” que existe entre ambas variables, y entre las variables, gracias a la tabla generada que relaciona todas las variables en cuestión. Un valor positivo indica

que los valores de ambas variables aumentan juntos, y una correlación negativa significa que una variable disminuye a medida que la otra aumenta, de esta forma puede ser una relación positiva, alta, perfecta o baja, sus contrapartes, si el valor de la pendiente es igual a 0 indica una aleatoriedad entre las distribuciones de ambas variables, es decir, que no guardan ninguna relación (Fig. 25).

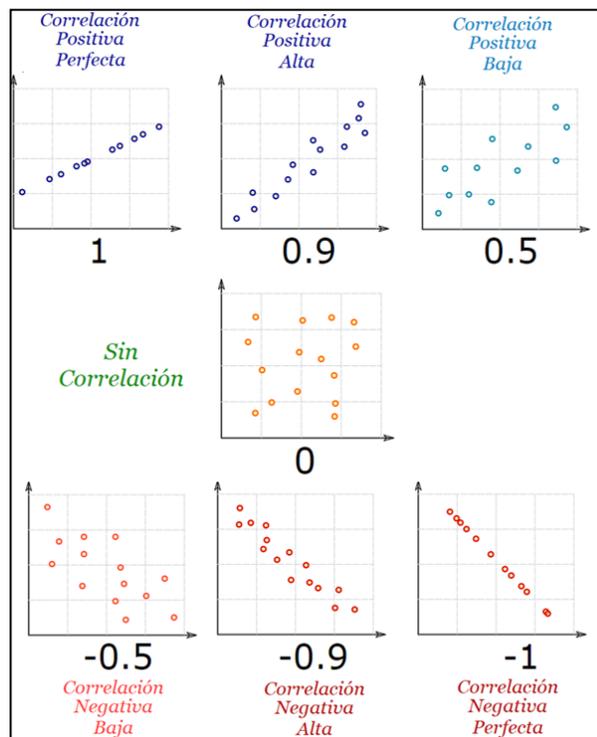


Figura 25: Diagramas de dispersión. El coeficiente de dispersión, o la pendiente de la curva generada por la relación lineal de las variables, entrega el grado de relación existente entre ambas variables (Fuente: Edición propia).

Para evaluar las relaciones que existen entre las variables presentes en la base de datos se realizó una selección de los elementos mayormente relacionados al Co, La, Ce e Y, con fin de generar los gráficos binarios de dispersión entre estos. El cobalto se asocia inicialmente a los óxidos mayores, para luego analizar su comportamiento con los elementos traza S, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Hf, Pt, Au, Pb y U, y su asociación a las REE's analizadas. Igualmente, las LREE's, lantano y cerio, y la HREE, itrio, se analizan con respecto a los óxidos mayores, y a los elementos traza S, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Ba, Hf, Ta, Pt, Tl, Pb, Th y U.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Geología local

De la mano de las metodologías utilizadas, se logra generar una base de datos con la información obtenida en 10 días de terreno, y los datos obtenidos en laboratorio, así, se realiza la conjunción de la información obtenida para la confección del mapa geológico del área de estudio.

4.1.1. Geología del área de estudio

Para un total de 73 puntos de control (Fig. 26), con información geológica obtenida en terreno, más la recolección de 106 muestras (Tabla 1), se procede al análisis de estas, junto al mapa geológico preliminar cartografiado en terreno, de esta forma, se genera la delimitación de cuerpos mineralizados, vetas, litologías y alteraciones, junto a datos de manto de capas y estructurales, más conjugación geológica en general. Toda esta información se plasmó sobre el mapa geológico digital (Anexo 3), con la ayuda de software de modelación cartográfica, Arcgis 10.5 y Adobe Illustrator Portable. Junto a la modelación de un perfil geológico de dirección NW-SE, cuya información entrega características subterráneas de la disposición litológica y contactos geológicos.

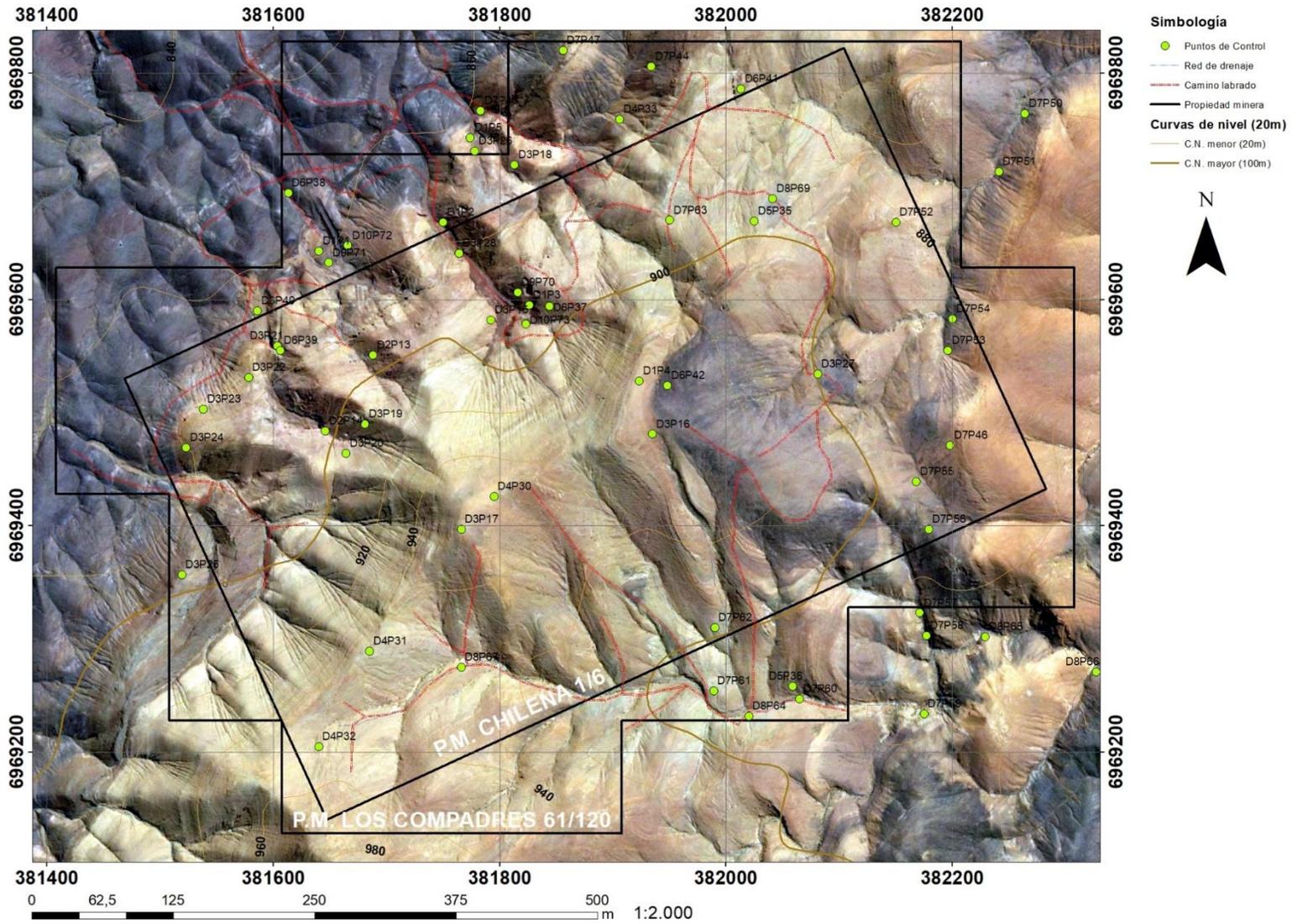


Figura 26: Mapa de puntos de control en el área de estudio, Mina La Chilena, Distrito Sierra Ladrillos (Fuente: Edición propia).

Tabla 1: Muestras recolectadas y puntos de control correspondiente, más ubicación en proyección UTM (Fuente: Edición propia).

PUNTO	MUESTRA	ESTE	NORTE	PUNTO	MUESTRA	ESTE	NORTE	PUNTO	MUESTRA	ESTE	NORTE
D1P1	D1M1T1	381640	6969643	D3P27	D3M13	382081	6969534	D7P56	D7M10T3	382179	6969397
D1P1	D1M1T2	381640	6969643	D3P28	D3M14	381764	6969641	D7P56	D7M10T4	382179	6969397
D1P2	D1M2	381750	6969668	D4P29	D4M1	381608	6969842	D7P56	D7M10T5	382179	6969397
D1P3	D1M3T1	381826	6969595	D4P30	D4M2	381795	6969426	D7P57	D7M11T1	382171	6969323
D1P3	D1M3T2	381826	6969595	D4P31	D4M3	381685	6969289	D7P57	D7M11T2	382171	6969323
D1P3	D1M3T3	381826	6969595	D4P32	D4M4	381640	6969205	D7P58	D7M12	382177	6969303
D1P3	D1M3T4	381826	6969595	D4P33	D4M5	381906	6969759	D7P60	D7M13	382065	6969247
D1P3	D1M3T5	381826	6969595	D4P34	D4M6	381498	6970152	D7P61	D7M14T1	381989	6969254
D1P4	D1M4T1	381923	6969528	D5P35	D5M1T1	382025	6969669	D7P61	D7M14T2	381989	6969254
D1P4	D1M4T2	381923	6969528	D5P35	D5M1T2	382025	6969669	D7P62	D7M15T1	381990	6969310
D1P5	D1M5	381774	6969743	D5P36	D5M2T1	382059	6969258	D7P62	D7M15T2	381990	6969310
D2P6	D2M1T1	382005	6969852	D6P37	D6M1T1	381831	6969595	D7P63	D7M16T1	381950	6969670
D2P7	D2M2T1	382083	6969892	D6P37	D6M1T2	381831	6969595	D7P63	D7M16T2	381950	6969670
D2P8	D2M3T1	382048	6969936	D6P37	D6M1T3	381831	6969595	D8P64	D8M1	382020	6969232
D2P9	D2M4T1	382085	6970014	D6P37	D6M1T4	381831	6969595	D8P65	D8M2	382229	6969302
D2P10	D2M5T1	382144	6970170	D6P38	D6M2T1	381613	6969694	D8P67	D8M3T1	381766	6969275
D2P11	D2M6T1	382098	6970163	D6P39	D6M3	381606	6969555	D8P68	D8M4T1	382368	6969783
D2P12	D2M7T1	382083	6970058	D6P40	D6M4T1	381586	6969590	D9P70	D9M1T1	381826	6969595
D2P12	D2M7T2	382083	6970058	D6P40	D6M4T2	381586	6969590	D9P70	D9M2T1	381826	6969595
D2P13	D2M8T1	381688	6969551	D6P41	D6M5T1	382013	6969786	D9P70	D9M3T1	381826	6969595
D2P14	D2M9T1	381646	6969484	D6P41	D6M5T2	382013	6969786	D9P70	D9M4T1	381826	6969595
D2P14	D2M9T2	381646	6969484	D6P42	D6M6T1	381948	6969524	D9P70	D9M5T1	381826	6969595
D3P15	D3M1	381792	6969582	D7P43	D7M1T1	381783	6969767	D9P70	D9M6T1	381826	6969595
D3P16	D3M2T1	381935	6969481	D7P43	D7M1T2	381783	6969767	D9P70	D9M7T1	381826	6969595
D3P16	D3M2T2	381935	6969481	D7P44	D7M2T1	381934	6969806	D9P71	D9M8T1	381640	6969643
D3P16	D3M2T3	381935	6969481	D7P47	D7M3T1	381856	6969820	D9P71	D9M9T1	381640	6969643
D3P17	D3M3	381766	6969397	D7P50	D7M4	382264	6969764	D9P71	D9M10T1	381640	6969643
D3P18	D3M4T1	381813	6969719	D7P51	D7M5	382241	6969713	D9P70	D9M11T1	381826	6969595
D3P19	D3M5	381681	6969490	D7P52	D7M6T1	382150	6969668	D9P71	D9M12T1	381640	6969643
D3P20	D3M6T1	381664	6969464	D7P52	D7M7	382150	6969668	D10P72	D10M1T1	381640	6969643
D3P21	D3M7T1	381604	6969556	D7P53	D7M8T1	382196	6969555	D10P72	D10M2T1	381640	6969643
D3P22	D3M8	381578	6969531	D7P53	D7M8T2	382196	6969555	D10P72	D10M3T1	381640	6969643
D3P23	D3M9	381538	6969503	D7P54	D7M9	382200	6969583	D10P72	D10M4T1	381640	6969643
D3P24	D3M10	381523	6969469	D7P56	D7M10T1	382179	6969397	D10P73	D10M5T1	381826	6969595
D3P25	D3M11	381519	6969357	D7P56	D7M10T2	382179	6969397	D10P73	D10M6T1	381826	6969595
D3P26	D3M12	381778	6969731								

4.1.2. Unidades litológicas

Se reconocieron 4 unidades litológicas principales, que serán descritas en sentido evolutivo (de la más antigua a la más joven). En general, corresponden a facies

sedimentarias marinas someras, compuestas por calcarenitas, e intercalaciones de granulometrías más finas subordinadas, interdigitadas por eventos volcanoclásticos de composición basalto-andesíticos que se asocian a facies sedimentarias terrígenas de areniscas y lutitas rojizas. Se exponen las siguientes litologías:

1. **Unidad vulcano-sedimentaria antigua (Vsa):** Secuencia de areniscas y lutitas rojas intercaladas con para conglomerados volcánicos de matriz andesítica, bien estratificadas, su dirección de inclinación de $\sim 110^\circ$ mantea entre 15° y 30° . Aflora al W del área de estudio, en contacto angular discordante con la unidad Smt, además, corresponde a la unidad de mayor antigüedad de la zona (Fig. 27).

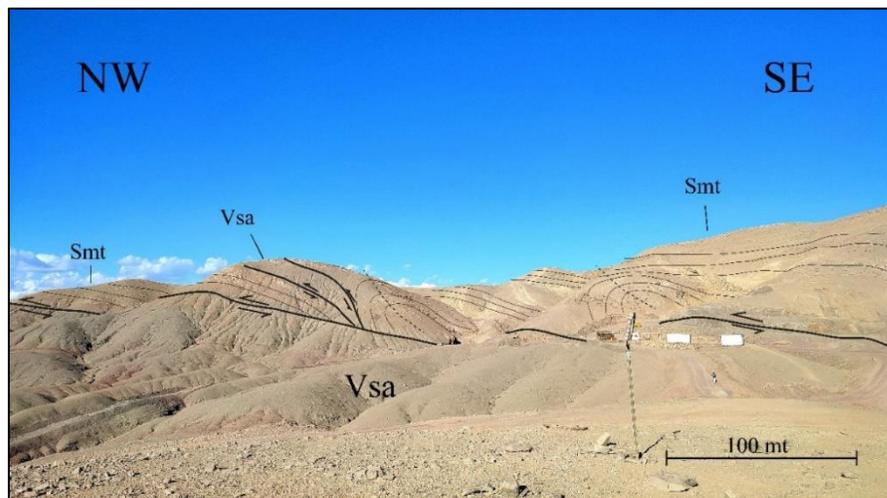


Figura 27: Contacto por falla entre Vsa y Smt (falla inversa de alto ángulo, punto D4P29), se observan el anticlinorium de tierra amarilla al este de la falla, asociado a unidad Smt, y mineralización de oxidados de Cu, Ag y Au (Fuente: Edición propia).

2. **Unidad sedimentaria marina transicional (Smt):** Compuesta principalmente por calcarenitas en alternancia con calcilitas bien estratificadas con manteo de 30 a 40° y dirección de inclinación de $\sim 105^\circ$ en su extensión oriental, al contrario de su afloramiento occidental, cuyas capas se presentan plegadas con escurrimiento en dirección NW y manteos de hasta 80° en dirección $\sim 320^\circ$ (Fig. 28). Se identificó un contacto del tipo discordancia angular con la unidad vulcano sedimentaria antigua (Vsa),

donde una falla inversa de alto ángulo genera una zona de cizalle y brecha hidrotermal asociada. A techo presenta ciertos niveles fosilíferos tipo *wackestone* que afloran al E. Su potencia general sobrepasa los 700 mt en el sector de estudio, y se encuentra asociada directamente a zona de mayor explotación de óxidos en la P.M. La Chilena, cuyas capas mineralizadas presentan oxidados de cobre, junto a menor contenido de plata y oro. La mineralización oxidada está representada por crisocola, malaquita, y minerales oxidados de plata, mientras que la mineralización primaria asociada a brechas hidrotermales, que aflora a unos 30 m de profundidad, cercanos al contacto angular con Vsa, está representada por pirita, calcopirita, magnetita y sulfuros de plata. La alteración está representada por calcita y menor cuarzo.



Figura 28: Extension occidental de unidad Smt, afloramiento de pliegue anticlinal con escurrimiento en dirección NW, asociada a gran mineralización de oxidados de cobre, Ag y Au, a unos 50 m de distancia hacia el este de la foto se genera su contacto con Vsa. Fotografiado en punto D1P2 (Fuente: Edición propia).

3. **Unidad volcano-sedimentaria joven (Vsj):** Esta unidad está compuesta en su base por calcilita, intercaladas con para-conglomerados volcánicos de matriz basalto-andesítica, estas rocas están sobreyacidas concordantemente por calcarenitas tipo

packstone y *wackestone*, seguido de sedimentos terrígenos finos con intercalaciones volcanoclásticas a techo. Infrayace por contacto discordante erosivo a la unidad Smtf (Fig. 29), y sobreyace por discordancia angular a la unidad sedimentaria marina transicional (Smt). Presenta mineralización oxidada (hematita, \pm goetita), y magnetismo leve a medio. Esta unidad aflora en la mitad E del área de estudio, y presenta una potencia de hasta ~150 m. Su dirección de inclinación es hacia el N50E aprox. y posee un ángulo de manteo ~20°.



Figura 29: Relaciones de contacto de unidad Vs_j. En punto de control D7P54 (Fuente: Edición propia).

4. **Unidad sedimentaria marina transicional fosilífera (Smtf):** Aflora al extremo E del área de estudio, está compuesta por lutitas terrígenas en base, seguido por calcilitas en alternancia con calcarenitas de restos fosilíferos bioclásticos, tipo *packstone* y *wackestone* bien estratificadas, demarcando una transición continental-marina. En conjunto alcanzan ~200 m de potencia, con manteo en dirección aproximada de N70E variando entre 25° y 30°. Corresponde a la unidad más joven del sector, sobreyaciendo mediante contacto erosivo a la unidad volcano-sedimentaria joven (Vs_j). Sus rocas presentan una silicificación leve, y minerales oxidados de hierro (hematita, \pm goetita, jarosita subordinada) y manganeso, junto a calcita, dolomita, y siderita en vetillas (Fig. 30).



Figura 30: Muestras D8M4T1, lutitas terrígenas, y D7M10T5, calcarenitas bioclásticas tipo packstone, ambas con contenido en óx. de Fe, representativas de la unidad Smtf (Fuente: Edición propia).

4.1.3. Alteración

La alteración presente en el área se encuentra asociada a vetas y estructuras mineralizadas. La alteración identificada en las unidades vulcano-sedimentarias, corresponden a una asociación de magnetita, calcita, dolomita, y silicificación moderada a leve; se ve sobrepuesta localmente y en menor medida por alteración a epidota leve y clorítica leve, junto a mineral de calcita, siderita, dolomita, piritita y silicificación leve. A su vez se reconoce alteración propilítica moderada asociada a las unidades sedimentarias marinas descritas, las cuales presentan óxidos de hierro o limonitas (principalmente hematita), calcita, dolomita, siderita, anhidrita, baritina y menor clorita (Fig. 31).

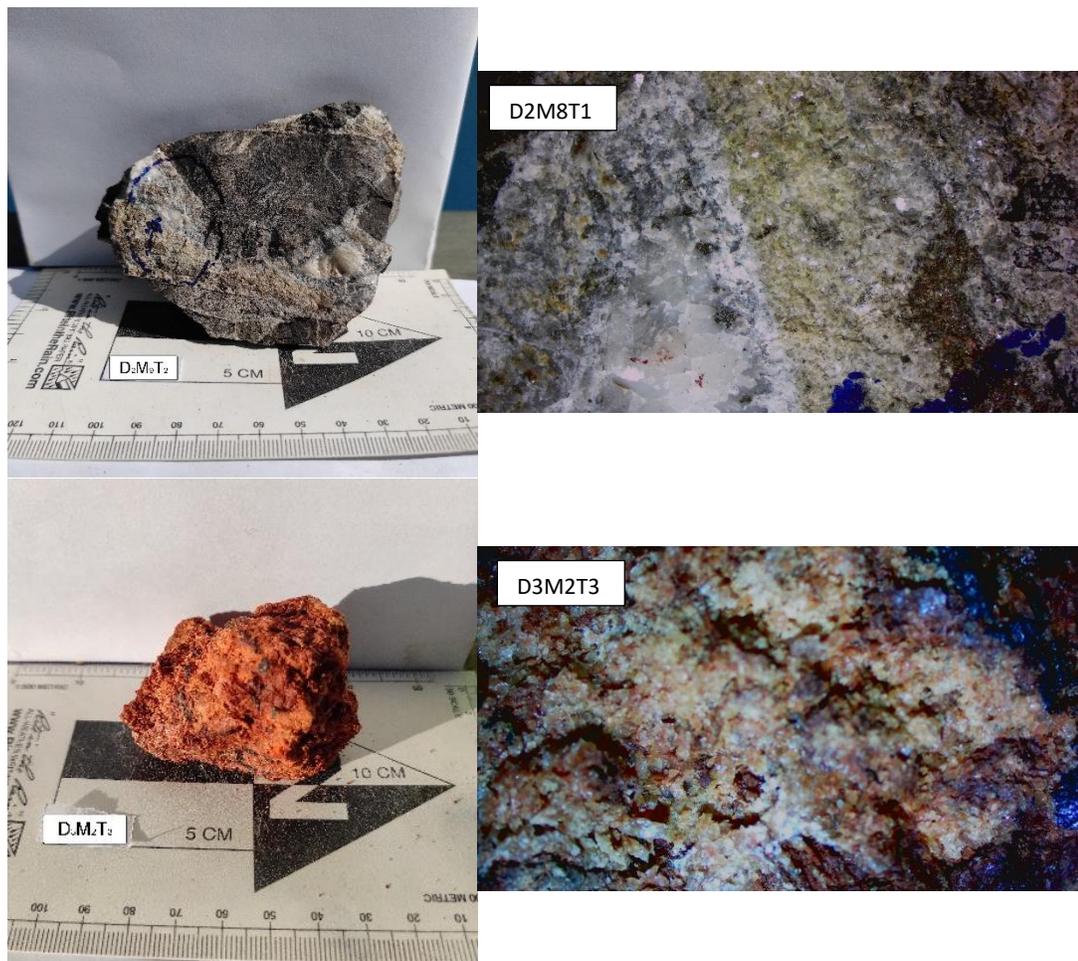


Figura 31: Muestra D2M8T1, representativa de zona con alteración hipógena, y muestra D3M2T3, representativa de alteración supérgena.

4.1.4. Mineralización

La mineralización primaria consiste en magnetita, titanio magnetita, calcopirita, pirita y arsenopirita subordinada, junto a Co, Ni y Au asociados a los minerales primarios mencionados. Además se presentan minerales con concentraciones traza de Pb, Zn, Ag asociados a mineralización distal de cuerpos mineralizados principales. El modo de ocurrencia principal es en vetillas, brechas hidrotermales, y diseminado en mantos, en rocas volcánicas y sedimentarias. La mineralización secundaria incluye menas oxidadas de cobre (crisocola, malaquita, atacamita, calcantita), óxidos de hierro (principalmente hematita y goetita), cobalto hospedado en óxidos oscuros y óxidos de hierro, principalmente hematita, también minerales arseniatos de Cu, Co y Pb (Fig. 32).

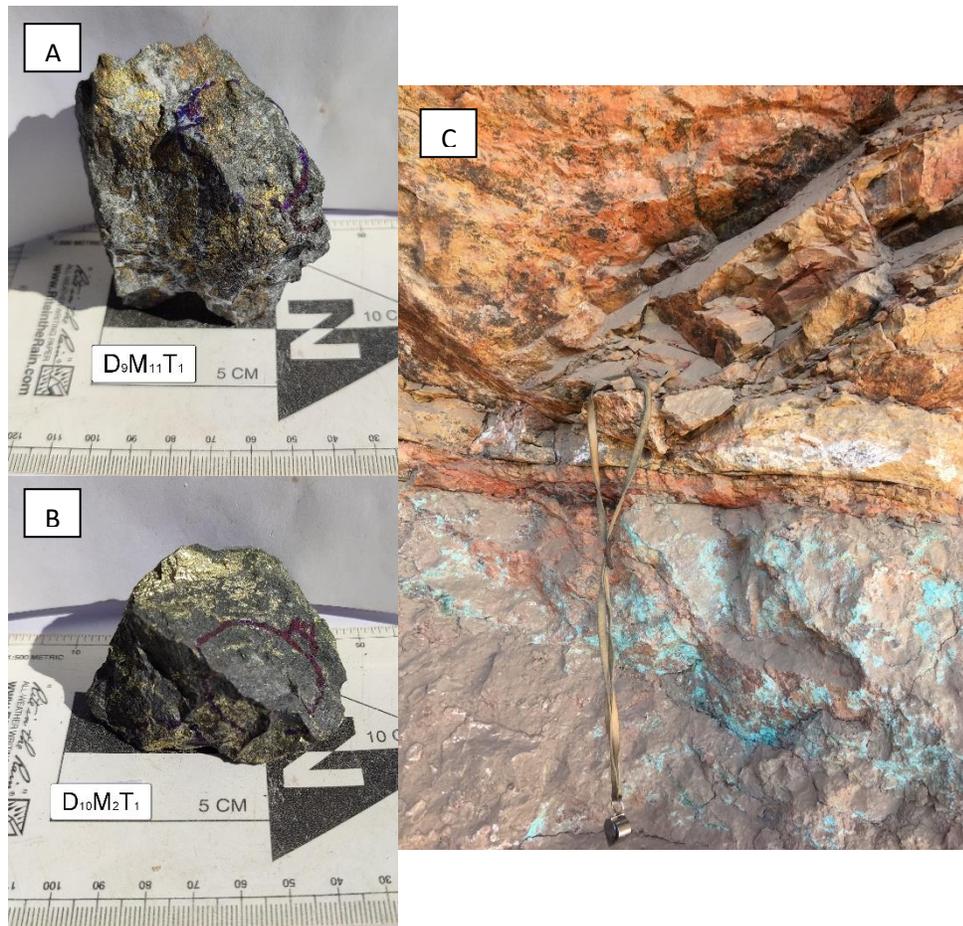


Figura 32: A y B) Muestras representativas de mineralización primaria de magnetita, calcopirita, pirita, muestras D9M11T1 y D10M2T1. C) Perfil de oxidación típico del área de estudio mineralización de oxidados de cobre, hierro, punto DIP3 (Fuente: Edición propia.).

4.1.5. Geología estructural

La geología estructural del sector se asocia a fallas inversas de alto ángulo. Estas estructuras presentan un rumbo preferencial NNE-SSW a N-S, con manteos hacia el SE en sus trazas occidentales, y al NW en sus trazas orientales, siguiendo un patrón de levantamiento “tipo Horst”, con manteos que van de los 40°, en menor medida, a los 80° en general, generando zonas de cizalle y brechas hidrotermales, reconocibles en el área. Se logra reconocer movimiento oblicuo sinistral, y en menor medida dextral en ciertas

estructuras. Asociado al contacto entre Smt y Vsa se aprecia una estructura inversa de alto ángulo (Fig. 33), y un pliegue anticlinal tumbado con inmersión de $\sim 10^\circ$ hacia N50E, el cual aflora unos metros hacía en NW del contacto mencionado. De no menor importancia, se da cuenta de la presencia de una gran falla regional sinistral, llamada Falla Bandurrias (Arévalo, 2005) que corta y desplaza las unidades del sector. En menor cantidad, se presentan fallas normales al extremo SE del mapa, y guardan relación espacial a una conjunción de estructuras complejas, producto de la unión de la falla de rumbo regional Bandurrias, y la falla inversa de alto ángulo presente en el contacto litológico entre Vsj y Smtf (Fig. 34).



Figura 33: Contacto inverso de alto ángulo entre Smt (arriba) y Vsa (abajo), con zona de cizalle observable de alto nivel diastrófico. Fotografiado en punto D7P43 (Fuente: Edición propia.).

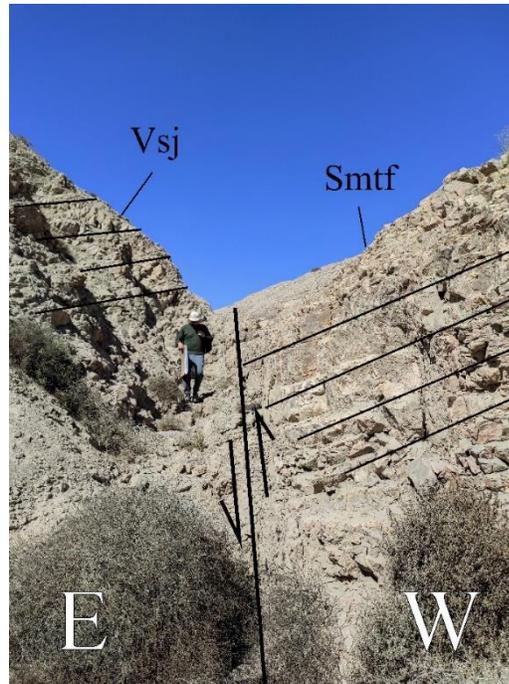


Figura 34: Contacto angular entre VsJ y Smtf, contacto por falla inversa de alto ángulo, característica común de fallas normales invertidas, En punto de control D8P65 (Fuente: Edición propia.).

4.2. Geoquímica y mineralogía

4.2.1 Geoquímica

Para un total de 106 muestras, de las cuales, 79 han sido analizadas por medio del equipo de fluorescencia de rayos X S1TITAN pistola XRF, generando un total de 110 análisis XRF, 10 de ellos analizados con metodología “Geología General” (incluye los óxidos mayores TiO_2 , MnO y Fe_2O_3 y 100 de ellos en metodología “Geología Traza” (reemplaza 3 óxidos mayores mencionados por Ti, Mn, y Fe elemental). Los resultados de estos análisis se ven presentados en el Anexo 1, la descripción y analítica, univariable y multivariable de estos resultados, se presentará en la sección “análisis estadístico” de este mismo capítulo.

4.2.2 Mineralogía

Posterior al análisis XRF, y recopilación de los datos obtenidos, se procede a seleccionar las muestras de mayor interés, discriminando por su contenido en Co, La, Ce e Y, para poder localizar los puntos de interés mineralógico, por medio del análisis estereoscópico. De esta forma se llega al total de 63 muestras, las cuales arrojaron concentraciones de los elementos de interés, en 102 análisis XRF en distintas zonas y trozos de estas mismas muestras (Tabla 2), de los cuales 30 poseen concentración de cobalto $\geq 0,001$ %; junto a 2 análisis con concentraciones de La del 0,044% y 0,035% respectivo; 3 análisis en concentración de Ce con rango de 0,013% a 0,214% o 2140 ppm; y un total de 67 análisis con contenido bajo en Y, desde los 0,001% a 0,006% o 60 ppm, de los cuales 40 análisis contienen 10 ppm de Y. Las fotografías estereoscópicas de mayor interés serán presentadas y descritas a continuación, las muestras de menor interés son descritas en la sección Anexo 2.

Tabla 2: Datos de análisis con concentraciones en Co, y las LREE's, lantano y cerio, y la HREE, itrio.

Código	Zona	Análisis	Co	Y	La	Ce	Código	Zona	Análisis	Co	Y	La	Ce
D1M1T1	A	1	0,008	0,002	0,000	0,000	D6M5T1	B	56	0,014	0,001	0,000	0,000
D1M1T2	A	2	0	0,001	0		D6M5T1	C	57	0	0,002	0	
D1M1T2	B	3	0	0,003	0		D6M5T2	D	58	0	0,001	0	0
D1M3T5	A	4	0,008	0,000	0,000	0,000	D6M6T1	A	59	0,036	0,003	0,000	0,000
D1M3T1	A	5	0,201	0,001	0,000	0,000	D7M1T1	A	60	0,002	0,001	0,000	
D1M3T2	A	6	0	0,001	0,044	0	D7M1T2	B	61	0	0,002	0	0
D1M3T2	A	7	0	0,001	0	0	D7M3T1	A	63	0	0,001	0	
D1M3T2	B	8	0	0,002	0		D7M8T1	A	65	0	0,001	0	0
D1M3T3	A	9	0	0,001	0	0	D7M8T2	B	66	0	0,001	0	
D1M4T1	A	12	0,017	0,001	0,000	0,000	D7M10T1	A	67	0	0,001	0,035	0
D1M4T2	A	14	0	0,001	0		D7M10T2	C	69	0	0,001	0	0
D2M1T1	A	15	0,013	0,001	0,000	0,214	D7M10T3	D	70	0	0,002	0	0
D2M1T1	A	16	0	0,003	0	0,093	D7M10T4	A	71	0	0,001	0	
D2M2T1	A	17	0,126	0,006	0,000	0,013	D7M10T5	B	72	0	0,002	0	
D2M2T1	A	18	0,059	0,005	0,000		D7M11T1	A	73	0	0,003	0	
D2M3T1	A	19	0	0,001	0		D7M11T2	B	74	0	0,002	0	
D2M4T1	A	20	0	0,001	0		D7M14T1	B	76	0	0,002	0	
D2M4T1	A	21	0	0,004	0	0	D7M15T1	A	78	0,067	0,001	0,000	0,000
D2M5T1	A	22	0	0,001	0	0	D7M15T1	B	79	0	0,001	0	0
D2M5T1	A	23	0	0,001	0	0	D7M16T1	A	81	0,048	0,000	0,000	
D2M6T1	A	25	0	0,002	0		D7M16T2	B	82	0,016	0,001	0,000	0,000
D2M7T2	A	29	0,008	0,001	0,000	0,000	D8M4T1	A	83	0	0,001	0	
D2M8T1	A	30	0,134	0,001	0,000	0,000	D9M2T1	A	86	0,111	0,000	0,000	0,000
D2M9T1	A	31	0,012	0,002	0,000	0,000	D9M3T1	A	87	0	0,002	0	
D3M2T1	A	34	0	0,001	0	0	D9M4T1	A	88	0,013	0,001	0,000	0,000
D3M2T2	B	35	0	0,001	0	0	D9M7T1	A	91	0	0,002	0	0
D3M2T3	D	37	0	0,001	0	0	D9M8T1	B	93	0,237	0,002	0,000	0,000
D3M4T1	A	38	0	0,002	0		D9M9T1	A	94	0,192	0,000	0,000	0,000
D3M4T1	B	39	0	0,002	0	0	D9M9T1	B	95	0,329	0,000	0,000	0,000
D3M6T1	A	40	0,002	0,000	0,000		D9M11T1	B	99	0,139	0,000	0,000	0,000
D3M6T1	B	41	0	0,003	0		D9M11T1	C	100	0	0,002	0	0
D3M6T1	C	42	0	0,002	0	0	D9M12T1	A	101	0,048	0,000	0,000	0,000
D5M1T1	A	45	0	0,001	0	0	D9M12T1	B	102	0	0,001	0	
D6M1T1	A	47	0	0,001	0		D10M1T1	A	103	0,064	0,003	0,000	0,000
D6M1T2	B	48	0	0,001	0		D10M1T1	B	104	0,209	0,000	0,000	
D6M1T3	B	49	0,014	0,000	0,000		D10M2T1	A	105	0,041	0,000	0,000	0,000
D5M2T1	A	51	0	0,002	0	0	D10M3T1	A	106	0	0,001	0	0
D6M2T1	A	52	0	0,001	0	0	D10M4T1	A	107	0,046	0,000	0,000	
D6M4T2	B	54	0	0,001	0		D10M5T1	A	108	0	0,001	0	0
D6M5T1	B	56	0,014	0,001	0,000	0,000	D10M6T1	B	110	0,033	0,001	0,000	

D1M3 T1 a T3, y T5: Calcilitas pardo rojizas, asociada a la zona de óxidos, presenta vetillas de calcita y siderita, óxidos de hierro, principalmente hematita; y baritina y jarosita solo para el caso de la muestra T5; óxidos de manganeso y de cobre (cooper wad, crisocola, menor malaquita y atacamita) reconocible en muestras de mano (Fig. 35), obtenidas a unos 100 m al este del eje de pliegue principal; la muestra T1, arroja concentraciones de hasta 2010 ppm de cobalto, junto a valores de S, Ti, Mn, Ni, Cu, Zn, Ag y Pb (4,596; 0,086; 0,681; 0,017; 3,017; 0,319; 0,015 y 0,139%); T2 y T3, muestran datos de Pt (20 a 100 ppm), Pb (160 a 1620 ppm) y presentan leves contenidos en Y, para diferenciarse en contenido de La de la muestra T2, de 440 ppm, y 1160 ppm de Ti. La muestra T5 contiene altísimo contenido de As y Pb (~80 y 100%) que podría deberse a el análisis directo sobre un mineral arseniuro de plomo, junto a contenidos subordinados de Cu, Zn (~13 y 17%), y concentraciones de U (1810 ppm) y elementos traza (análisis XRF N°4) (Fig. 36).

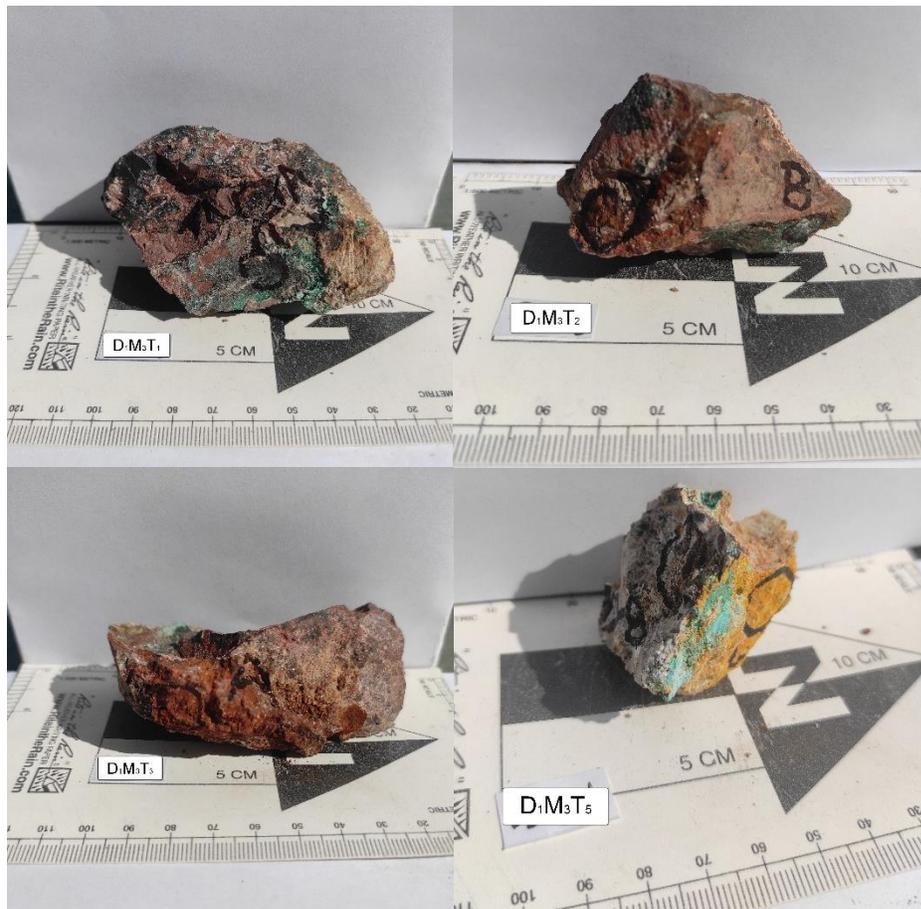


Figura 35: Muestra D1M3, trozos 1 al 3, y 5, zonas de análisis demarcadas.

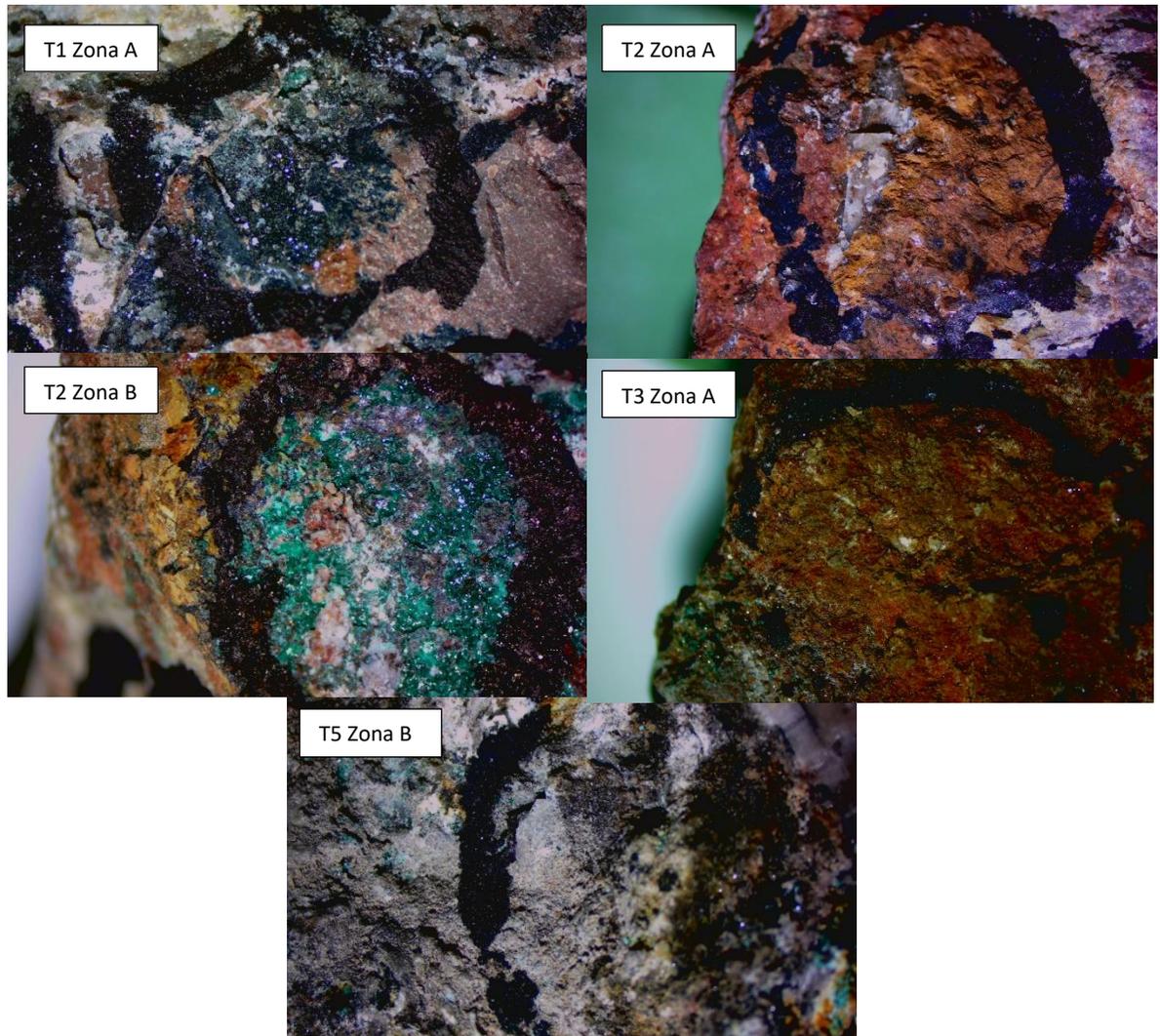


Figura 36: Fotos lupa trinocular de los trozos 1 al 3 y trozo 5.

D2MIT1: Areniscas calcáreas de grano medio-grosos, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt; el análisis XRF arroja concentraciones para ocurrencia de óxidos de Co, Ni, Zn, As y Pb (130, 230, 1430, 2240, 150 ppm respectivamente) y contenidos de 930 a 2140 ppm de Ce y trazas de Y (Fig. 37).

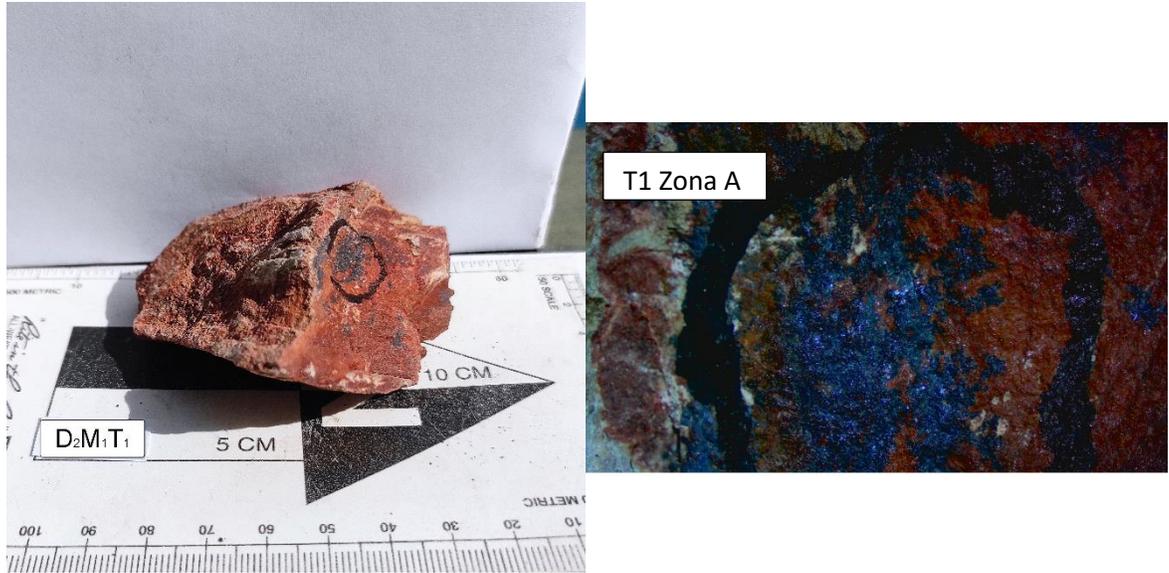


Figura 37: Muestra D2M1, trozos 1 con zonas de análisis demarcada y fotografías de lupa trinocular.

D2M8T1: Areniscas calcáreas de grano medio-grueso, asociada a la zona de óxidos, minerales de calcita y sulfatos de calcio, óxidos de Fe principalmente hematita, óx. de Mn subordinado y Cu leve, presenta magnetismo leve, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt unos 140 m al este del eje de pliegue; a través del análisis XRF, se reconocen como componente principal CaO, S, SiO₂ (~26, 15 y 9%), presenta concentración de Cobalto e Y (1340 y 10 ppm) y concentraciones asociadas de Ti, Ni, As, Sb y Hf (1490, 210, 6820, 840 y 210 ppm respectivo) (Fig. 38).

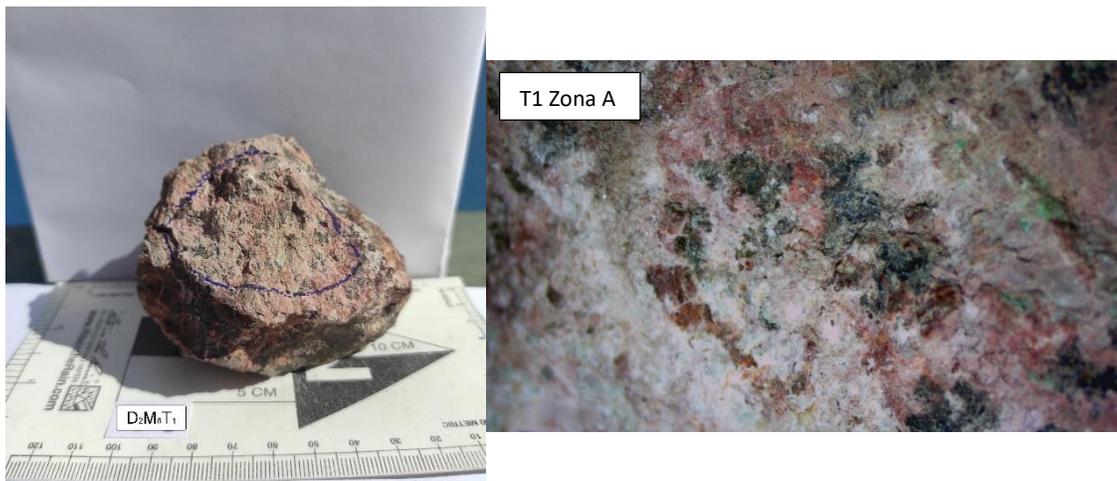


Figura 38: Muestra D2M8, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.

D6MIT1 a T3: Muestras obtenidas en zona de mineralización a ~130 m del este del eje de pliegue, t1 y t3, presentan alta cantidad de oxidados de Cu (crisocola, atacamita, calcantita, malaquita) y Fe (hematita) y Mn subordinado, junto a ganga de calcita, siderita, y magnetismo leve; T2 arenisca de grano medio-grueso, con alto contenido en óx. de Fe, principalmente jarosita goetita, y hematita subordinada. La muestra T1 y T2 poseen 10 ppm de Y; y 3620 y 90 ppm respectivo de Pb; en el caso de Ti en T2 alcanza 2110 ppm, al contrario de T1 y T3 que poseen 140 y 550 ppm respectivo; T3, posee contenidos de Co, Ni, Zn y Pb (140 ppm, 3680 ppm, 6,305% y 8940 ppm respectivamente), y concentraciones de Nb (180 ppm), U (500 ppm) y Th (5160 ppm) (análisis XRF N°4). (Fig. 39).

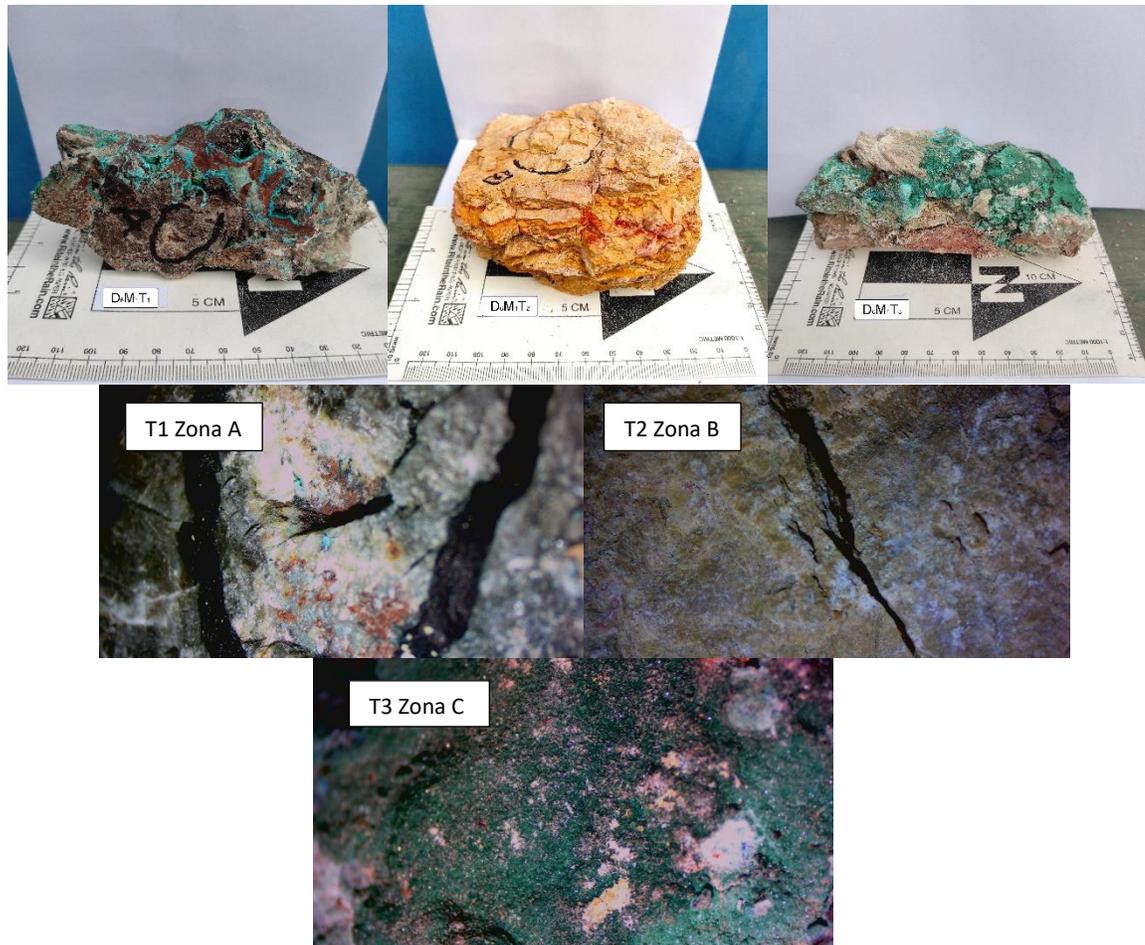


Figura 39: Muestras D6M1, trozo 1 a 3, y lupa trinocular respectiva.

D6M6T1: Muestras obtenidas de Unidad Smt zona de mineralización oxidada, areniscas calcáreas de grano fino, alto contenido en minerales óx. de Fe (hematita) y Cu

(atacamita, crisocola), óx. de Mn subordinado; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Co, Y, Sb, y Pt (360, 30, 530 y 10 ppm respectivamente) (Fig. 40).

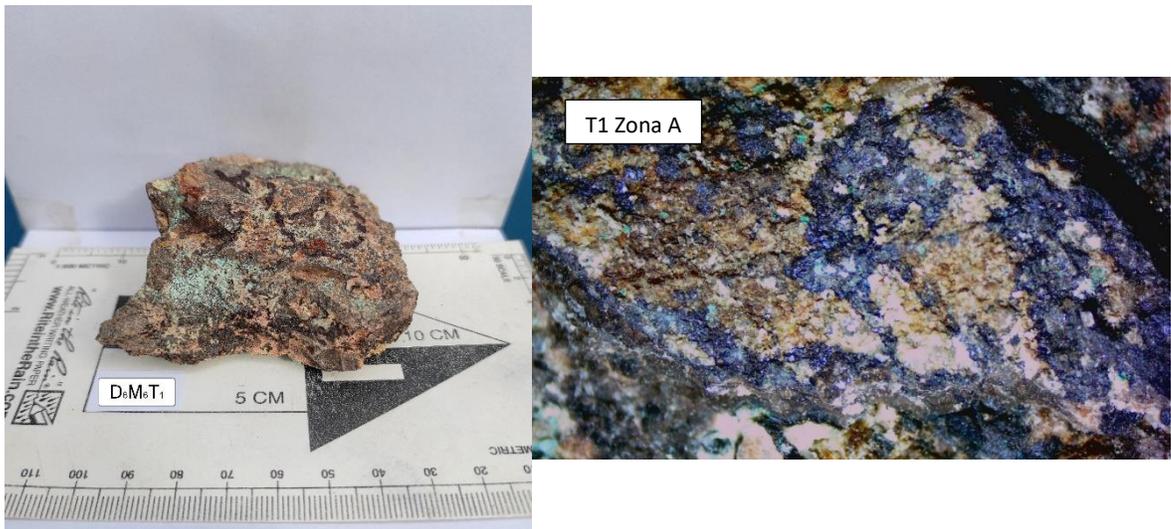


Figura 40: Muestra D6M6, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.

D7M15T1: Areniscas calcáreas de grano medio-grosos, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita, jarosita y goethita subordinada, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt al SE del sector; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Co, Ni, Y y Pb (670, 40, 10 y 30 ppm respectivamente) (Fig. 41).

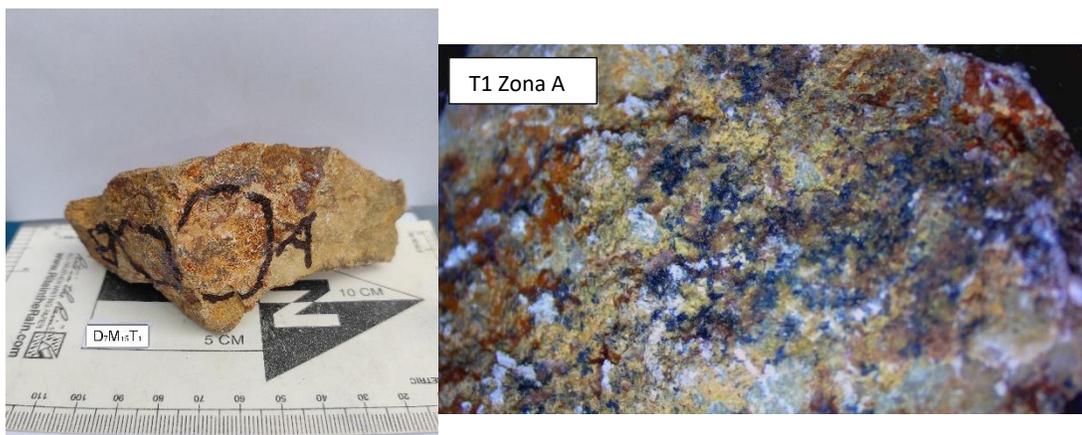


Figura 41: Muestra D7M15, trozo 1 foto de muestra de mano y lupa trinocular.

D7M16T1 y T2: Areniscas calcáreas de grano medio-grueso, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita, magnetismo leve, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt; el análisis XRF arroja concentraciones para ocurrencia de óxidos de Ti, Co, Ni, As y Pb (2310, 160 a 480, 80, 1280, 1640 a 2340 ppm respectivamente) (Fig. 42).

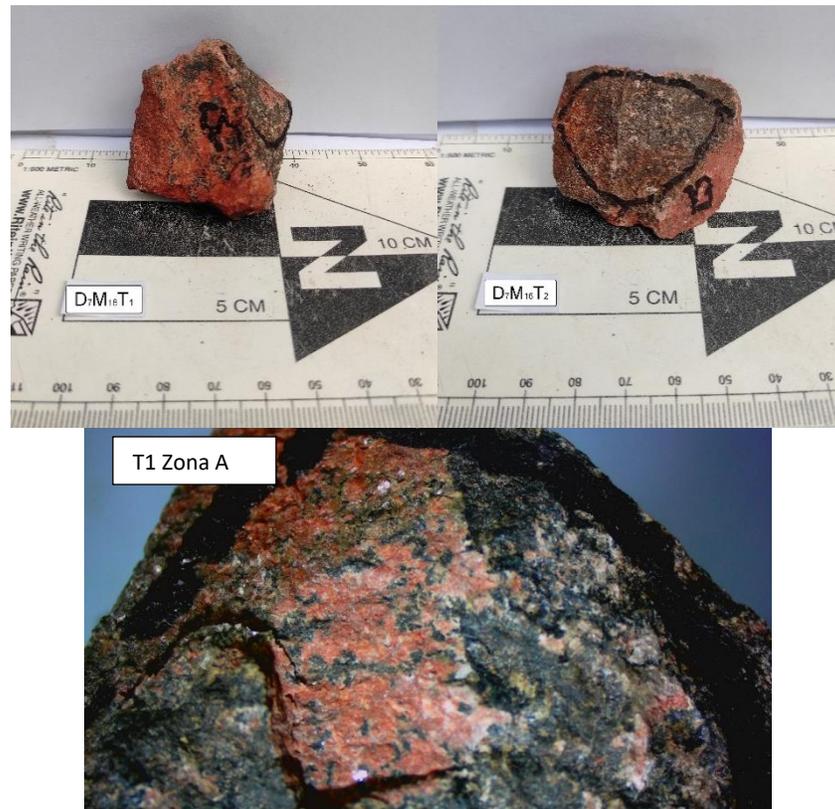


Figura 42: Muestra D7M16, trozo 1 y 2 foto de muestra de mano y lupa trinocular T1.

D9M2, M4 y M12: Areniscas calcáreas de grano medio-fino, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita, magnetismo leve a medio, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt a unos 100 m al este del eje de pliegue principal; el análisis XRF arroja concentraciones para ocurrencia de óxidos de Ti, Co, Ni, Zn, As, Y, Ag, Pb para estas muestras de zona oxidada (760 a 1130; 130 a 1110; 100 a 200; 770 a 3440; 130 a 2930; 20; 30 a 50; 620 a 11390 ppm respectivamente) (Fig. 43).

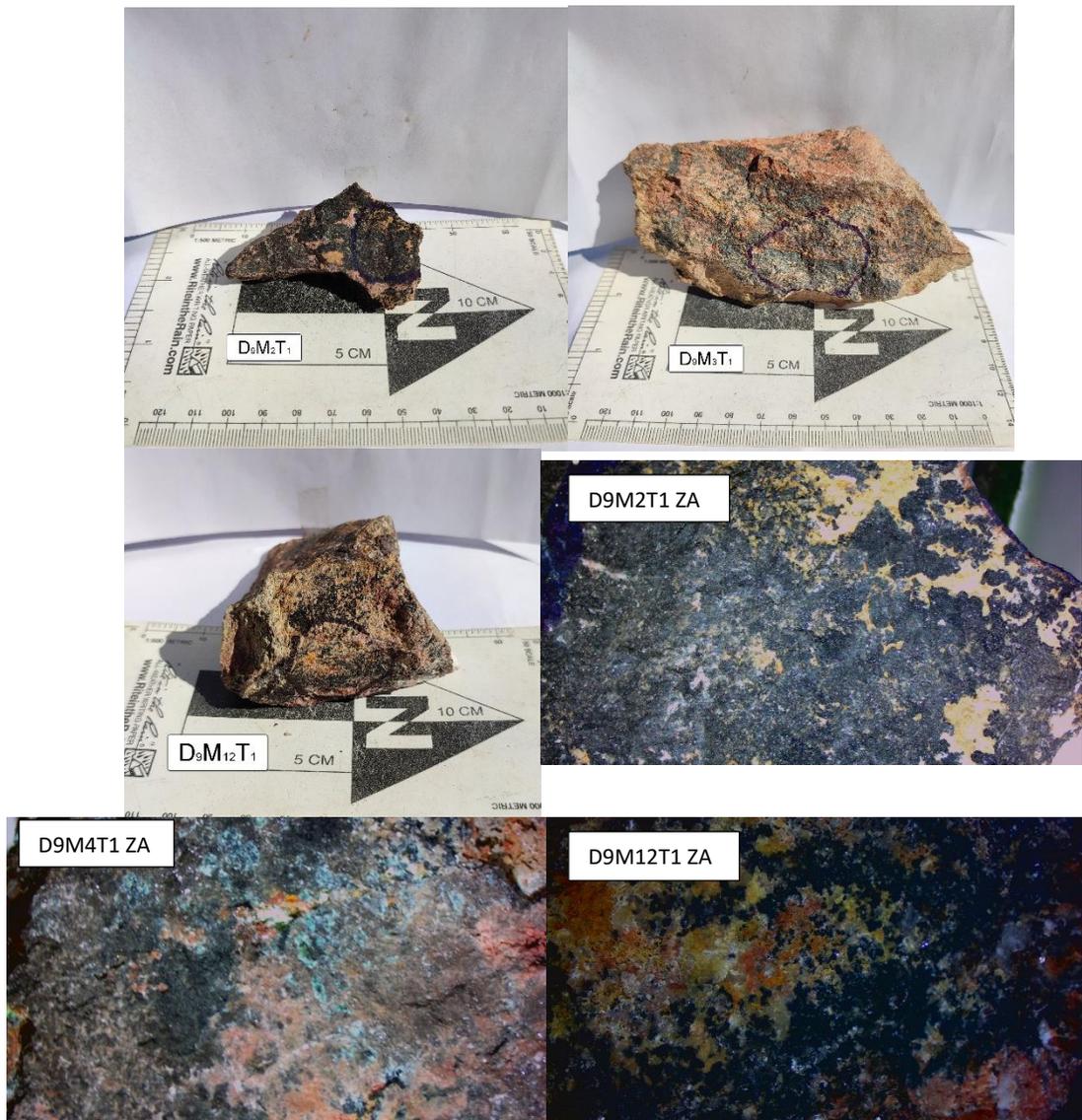


Figura 43: Muestra D9M2, M4 y M12, Fotos macroscópicas.

D9M8, M9 y M11: Muestra obtenida cercano a contacto y zona de falla en trabajo minero unos 20 - 30 m de profundidad, asociada a la zona de sulfuros, calcita hidrotermal, sulfuros de Fe y Cu subordinado, principalmente pirita, calcopirita y magnetita; a través del análisis XRF de modo geología general, entrega concentración de MgO de ~1,6% A 8,5%, presenta concentración traza de Ti, Co, Ni y As (970 a 4260; 1390 a 3290; 170 a 2050 ppm; y hasta 3,4% As) y concentraciones asociadas de Ag, Sb, Hf, Pb y Th (~80, 530, 820, 530 y 1580 ppm respectivo) (Fig. 44).

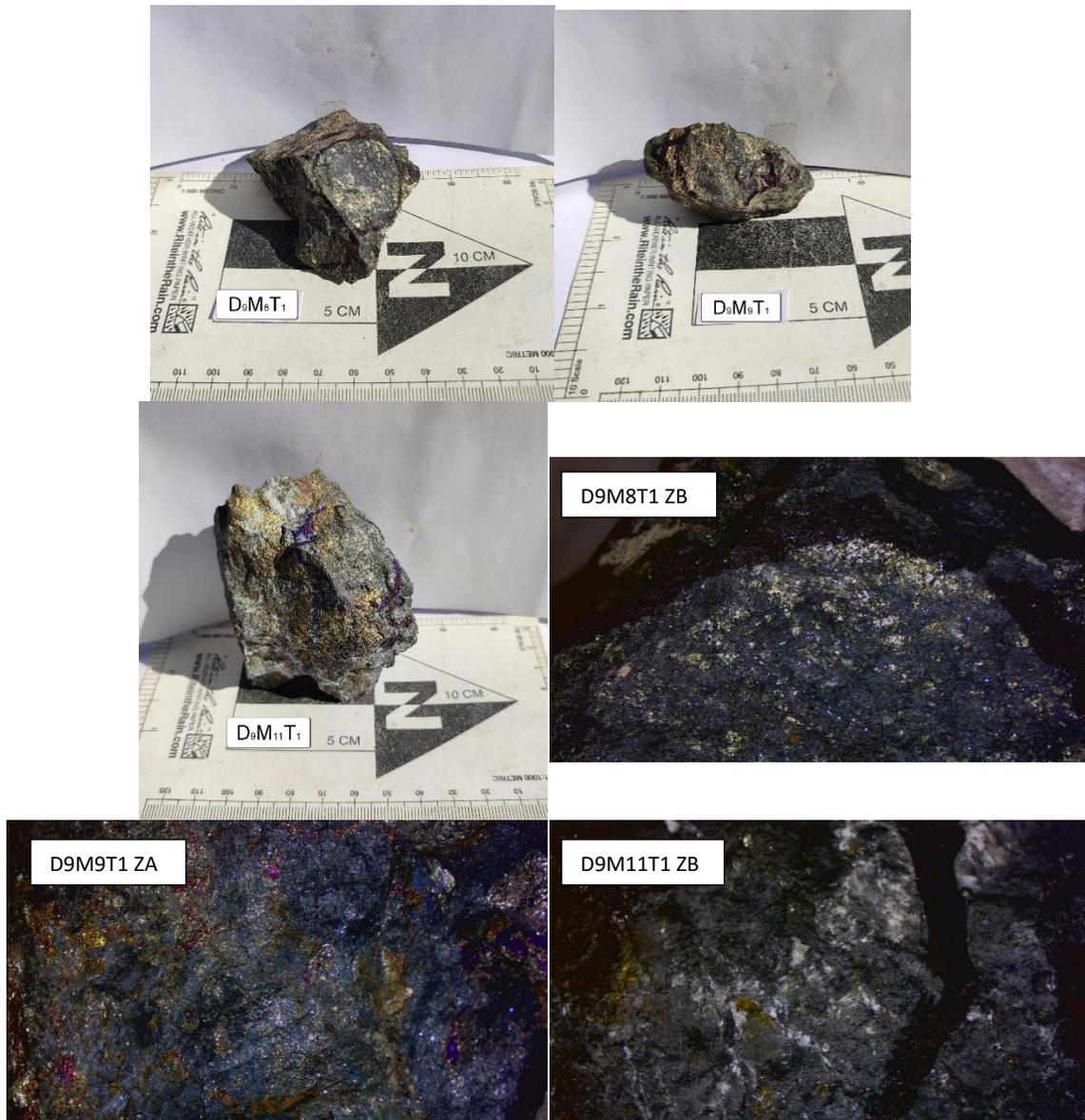


Figura 44: Muestra D9M8, M9 y M11, Fotos macroscópicas.

4.3 Análisis estadísticos

4.3.1 Análisis univariable

Se analizan estadísticas descriptivas por categoría de elementos, en elementos de óxidos mayores, y elementos traza, junto a análisis de distribución de concentraciones con histogramas y diagrama de cajas y bigotes.

4.3.1.1 Óxidos mayores

Para el análisis univariable estadístico descriptivo con los elementos mayores, ya con los datos normalizados y unidad de medida en % en peso, se generan los datos estadísticos (Tabla 3), los gráficos de distribución o histogramas (Gráfico 1), y los gráficos de caja y bigote (Gráfico 2).

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	N	Asimetría	Curtosis
MgO	2,024	2,165	4,686	0,000	0,000	1,774	2,552	10,640	78	0,2	0,91
Al ₂ O ₃	4,860	4,660	21,717	0,000	1,784	3,107	6,025	24,039	109	-0,14	-0,34
SiO ₂	20,430	16,240	263,890	0,000	7,810	15,920	34,280	74,750	103	-0,92	1,38
P ₂ O ₅	0,800	2,158	4,657	0,000	0,081	0,294	0,710	18,675	91	-0,79	2,89
K ₂ O	0,803	1,089	1,186	0,000	0,142	0,439	0,925	6,639	97	-0,68	1,66
CaO	16,290	13,470	181,370	0,480	6,780	12,720	23,720	55,180	110	-1,01	0,8
TiO ₂	0,245	0,237	0,056	0,000	0,053	0,142	0,484	0,656	8	-0,39	-0,79
MnO	0,877	1,216	1,478	0,000	0,019	0,283	1,518	3,558	8	-0,78	-0,21
Fe ₂ O ₃	7,220	5,200	27,020	0,510	2,830	7,040	11,620	15,910	9	-1,21	0,86

Tabla 3: Resumen estadísticos para elementos de óxidos mayores.

Con respecto a las medias el valor más alto es el SiO₂ (20,430 wt, %), seguido por CaO (16,290%), Fe₂O₃ (7,220%), Al₂O₃ (4,860%) y MgO (2,024%), y con medias bajo el 1%, MnO, K₂O, P₂O₅ y TiO₂, de 0,877%, 0,803%, 0,800%, y 0,245%, respectivamente. Asimismo, las medianas tienen el mismo orden de abundancia. 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. En cuanto a la frecuencia, el óxido más reconocido entre las 110 muestras fue el CaO, en la totalidad de los análisis, seguido por el Al₂O₃, SiO₂, K₂O y P₂O₅. Cabe destacar la frecuencia de los elementos mayores TiO₂, MnO y Fe₂O₃, de 8, 8 y 9 de entre 110 análisis, respectivamente, esto es debido a la metodología de análisis realizada con el instrumento XRF, del total de 110 muestras, solo 10 de ellas se analizan con la metodología Geología General, cuyo análisis entregan el valor de estos 3 óxidos mayores mencionados, sin embargo, sus elementos representativos, Ti, Mn y Fe, serán analizados con una mayor cantidad de datos en la siguiente sección, de elementos traza.

Los valores de asimetría y curtosis serán tratados en la siguiente Figura de Histogramas (Gráfico 1).

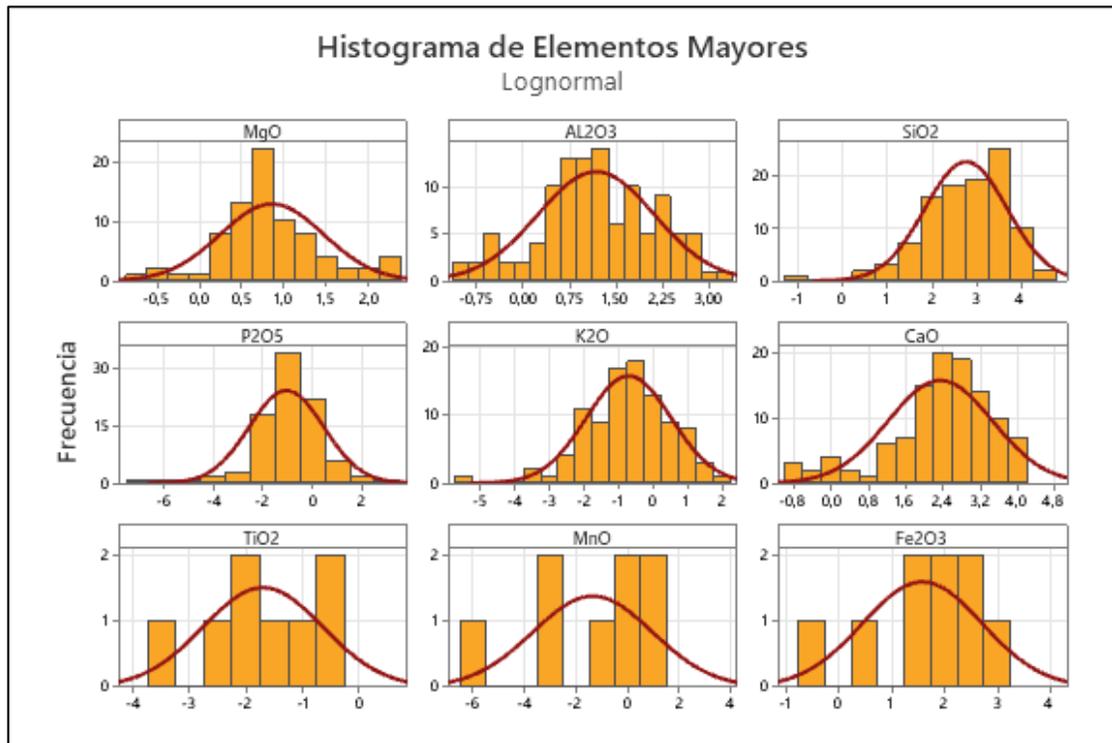


Gráfico 1: Histograma para elementos mayores (Fuente: Edición propia).

Los valores de asimetría y curtosis entregan información útil, con respecto a la distribución de las concentraciones, en si la mayoría de elementos presentan una curva asimétrica negativa leve, esto significa una concentración de los elementos por sobre el eje de simetría, Fe₂O₃ y CaO marcan una asimetría negativa fuerte, los óxidos que marcan una tendencia simétrica con valores de -0,14 y 0,2 corresponde al Al₂O₃ y MgO respectivamente. Los valores de curtosis presentan en general una tendencia positiva, leptocúrtica, a excepción de Al₂O₃, TiO₂, MnO cuyos valores de -0,34, -0,79 y -0,21 respectivos, marcan una tendencia negativa platicúrtica, con baja densidad de datos. El elemento de mayor curtosis, o de gráfica leptocúrtica, corresponde al P₂O₅, cuyo resultado indica una alta concentración de datos dentro de su media.

En cuanto al gráfico de cajas, se puede observar una alta concentración de datos del SiO₂ y CaO, lo cual va de la mano con la naturaleza calcárea de las rocas, y su

reconocible alteración calcosilicatada. Le siguen los valores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 y MgO , este último presenta sobre 3 datos atípicos, que no representan la tendencia general de los resultados. Por último, los valores de MnO , K_2O , P_2O_5 Y TiO_2 , corresponden a los elementos de menores concentraciones, en orden de abundancia; además MnO , es el elemento que presenta más frecuencia entre todos, generando una alta densidad de datos alrededor de su media aritmética; y el óxido mayor P_2O_5 corresponde al elemento con más valores atípicos arrojados (Gráfico 2).

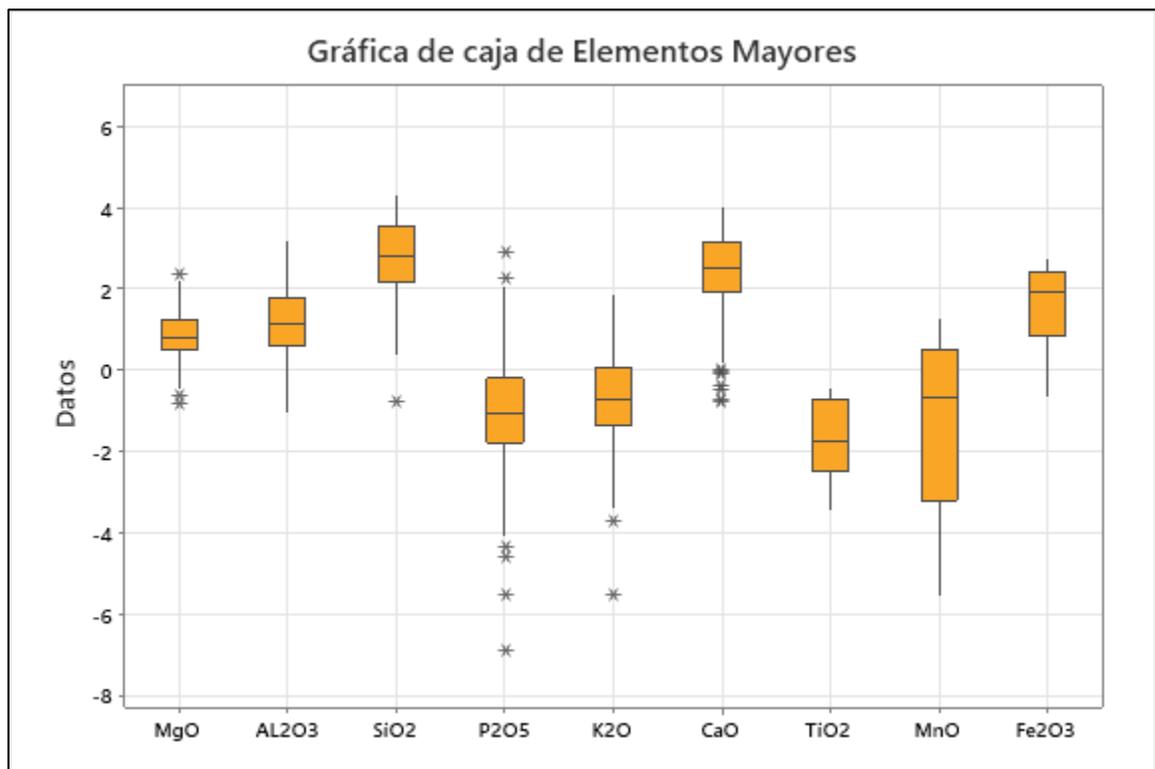


Gráfico 2: Gráfico de boxplot para elementos mayores (Fuente: Edición propia).

4.3.1.2 Cobalto, REE's y elementos relacionados.

El análisis de datos estadísticos es presentado a continuación (Tabla 4). Los valores de media están encabezados por, S (6,267%), Fe (6,163%) y Cu (4,960%), seguidos por el Pb y Cl, con valores cercanos al 1% (1,042 y 1,004 respectivamente); bajo el 1% de concentración, valores que podrían representar datos relevantes, en orden

decreciente serían As (0,933%), Mn (0,353%), Zn (0,340%), Ti (0,143%), Sb (0,032%), Sr (0,029%), Ba (0,024%), Ni (0,023%), Co (0,020%), Mo (0,016%), Ta (0,016%) y Ag (0,012%). Cabe destacar la ausencia de media para los elementos W, Nb, Au, Rh y Pd, debido a su baja o ausente frecuencia de datos (“N”), así como también los elementos U, Hg, Bi, Ce y La, cuya frecuencia bajo 10, imposibilita su correcto análisis estadístico. La distribución de la mediana en orden descendente se encuentra encabezado por Fe (2,452%), seguido por S (1,399%), Cu (0,18%), Cl (0,121%), Ti (0,095%), Mn (0,079%) y As (0,032%), demostrando una gran diferencia entre media y mediana. En cuanto a la desviación estándar el Cu (15,070), Pb (9,531), S (9,351), Fe (9,152) y As (7,617) lideran la lista; la frecuencia de datos se concentra en los elementos, Cu, Cl, S, Zn, As, Fe, Mn, Sr, Zr y Ti, sobre las 95 repeticiones en el total de 110 análisis. Los valores de asimetría y curtosis serán tratados en la siguiente Figura de Histogramas (Gráfico 3).

La asimetría de los resultados reflejan una simetría positiva en general, con la concentración de datos a la izquierda del eje de simetría, y en menor medida, de curva simétrica negativa y central de menor medida, representado esta tendencia los elementos As, Mn, Fe, S, Co y Ti principalmente (0,19; 0,12; -0,08; -0,26; -0,33 y -0,71 valor de asimetría respectivo). Los valores de curtosis presentan ambas tendencias de forma equitativa, representado por 18 elementos en tendencia negativa platicúrtica, del total de 34 elementos representativos. La curva positiva, leptocúrtica, está representada por el resto de elementos, destacando Ag, Sr, Pb, Cl, Ti e Y (8,99; 1,54; 1,38; 1,32; 0,29 y 0,19 valor de curtosis respectivo) (Gráfico 3).

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	N	Asimetría	Curtosis
S	6,267	9,351	87,433	0,000	0,210	1,399	8,873	41,433	103	-0,26	-1,09
Cl	1,004	3,574	12,772	0,000	0,061	0,121	0,336	28,714	105	1,21	1,32
Ti	0,143	0,134	0,018	0,000	0,046	0,095	0,206	0,577	97	-0,71	0,29
V	0,006	0,009	0,000	0,000	0,000	0,002	0,007	0,049	63	0,15	-0,46
Cr	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	13	0,44	2,03
Mn	0,353	0,760	0,577	0,000	0,018	0,079	0,294	5,663	100	0,12	-0,79
Fe	6,163	9,152	83,756	0,092	1,024	2,452	7,034	39,360	101	-0,08	-0,35
Co	0,020	0,055	0,003	0,000	0,000	0,000	0,008	0,329	30	-0,33	-0,54
Ni	0,023	0,059	0,003	0,000	0,001	0,004	0,017	0,402	88	0,59	-0,18
Cu	4,960	15,070	227,190	0,000	0,010	0,180	1,400	95,950	110	0,36	-0,95
Zn	0,340	1,774	3,146	0,000	0,003	0,010	0,140	17,457	103	0,49	-0,5
As	0,933	7,617	58,014	0,000	0,003	0,032	0,191	79,946	102	0,19	-0,31
Se	0,004	0,040	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	12	2,11	5,43
Rb	0,005	0,009	0,000	0,000	0,001	0,003	0,004	0,090	83	0,79	1
Sr	0,029	0,066	0,004	0,000	0,004	0,009	0,015	0,321	99	1,31	1,54
Y	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,006	67	1,05	0,19
Zr	0,007	0,018	0,000	0,000	0,003	0,004	0,007	0,181	99	0,93	3,21
Nb	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	1 *		*
Mo	0,016	0,066	0,004	0,000	0,000	0,001	0,003	0,596	63	1,26	0,87
Rh	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0 *		*
Pd	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0 *		*
Ag	0,012	0,116	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	1,219	26	2,48	8,99
Cd	0,006	0,043	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,448	34	1,67	4,53
Sn	0,002	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	24	0,26	-0,34
Sb	0,032	0,112	0,013	0,000	0,000	0,000	0,011	0,969	35	0,53	-0,44
Ba	0,024	0,134	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	1,100	15	1,85	2,74
La	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	2 *		*
Ce	0,004	0,027	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214	3	-1,1 *	
Hf	0,005	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,099	27	0,65	-0,53
Ta	0,016	0,161	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	1,689	13	2,11	5,13
W	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	8	-0,1	-1,92
Pt	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	14	0,18	-1,17
Au	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	6	0	-3,33
Hg	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	8	-0,19	-1,11
Tl	0,006	0,052	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,550	20	2,4	7,21
Pb	1,042	9,531	90,841	0,000	0,000	0,005	0,045	100,000	74	1,08	1,38
Bi	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	6	-0,53	-1,18
Th	0,009	0,053	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,516	14	1,13	0,42
U	0,003	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,181	9	0,32	-0,97

Tabla 4: Resumen estadísticos para elementos traza en porcentaje.

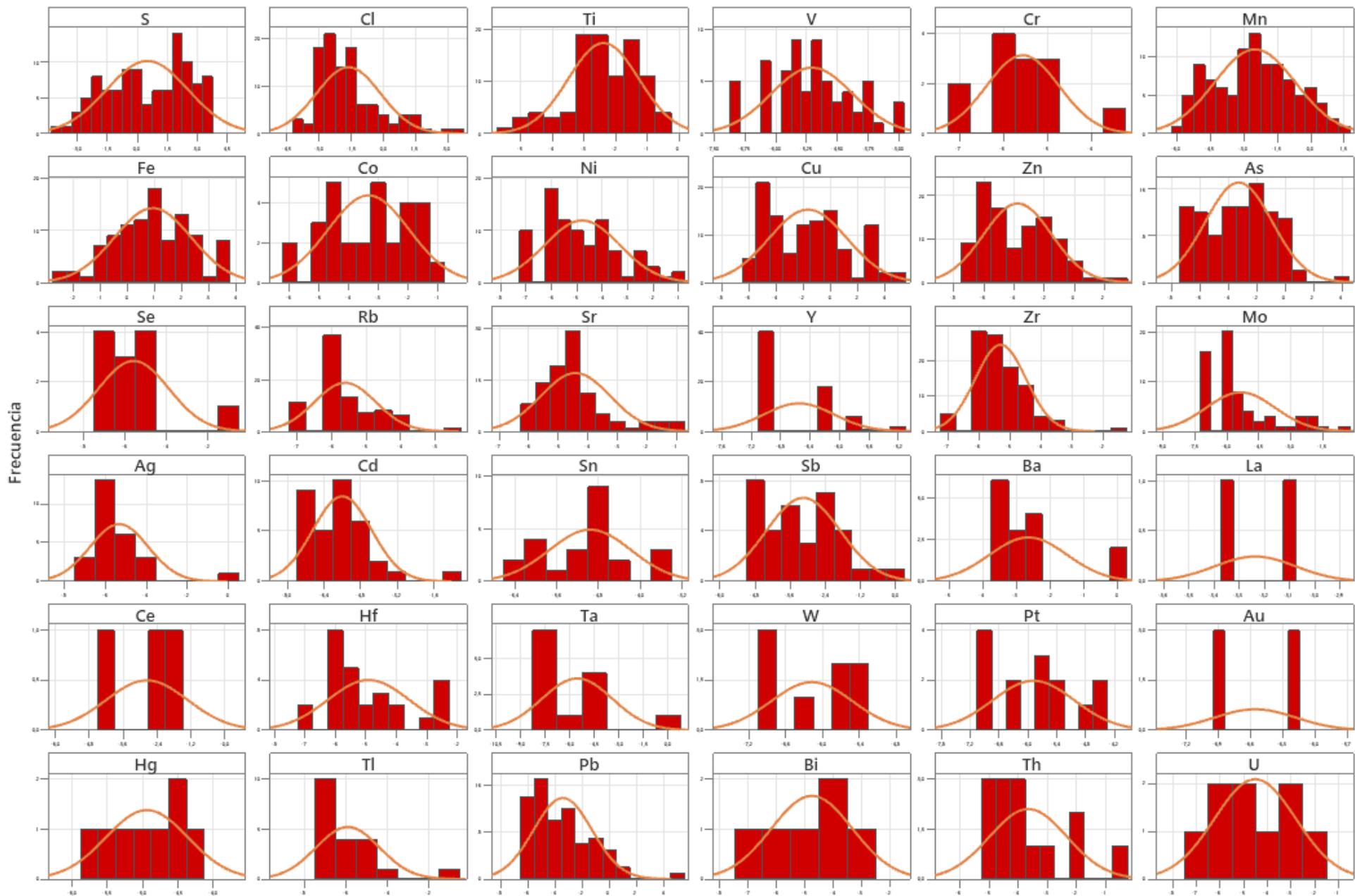


Gráfico 3: Histograma para elementos traza (Fuente: Edición propia).

Al analizar los gráficos de caja, se observa la mayor concentración en los elementos S, Fe, Cu, Cl, Mn, As, Ti, Zn y Co, entre ellos, el Cl, As y Ti, presentan datos atípicos, los dos primeros presentan datos fuera del gráfico, por sobre el bigote superior, y el último, datos por debajo. Cl, Ti y Sr, corresponden a los elementos con mayor cantidad de datos atípicos. Los elementos S, Mn, Cu, Zn y As presentan la mayor densidad de datos alrededor de su media aritmética, y los elemento Co y Ni, presentan un gráfico aceptable en cuanto a su dispersión de datos, con valores concentrados en su media aritmética, entregando un resultado favorable para su posterior análisis de discusión (Gráfico 4).

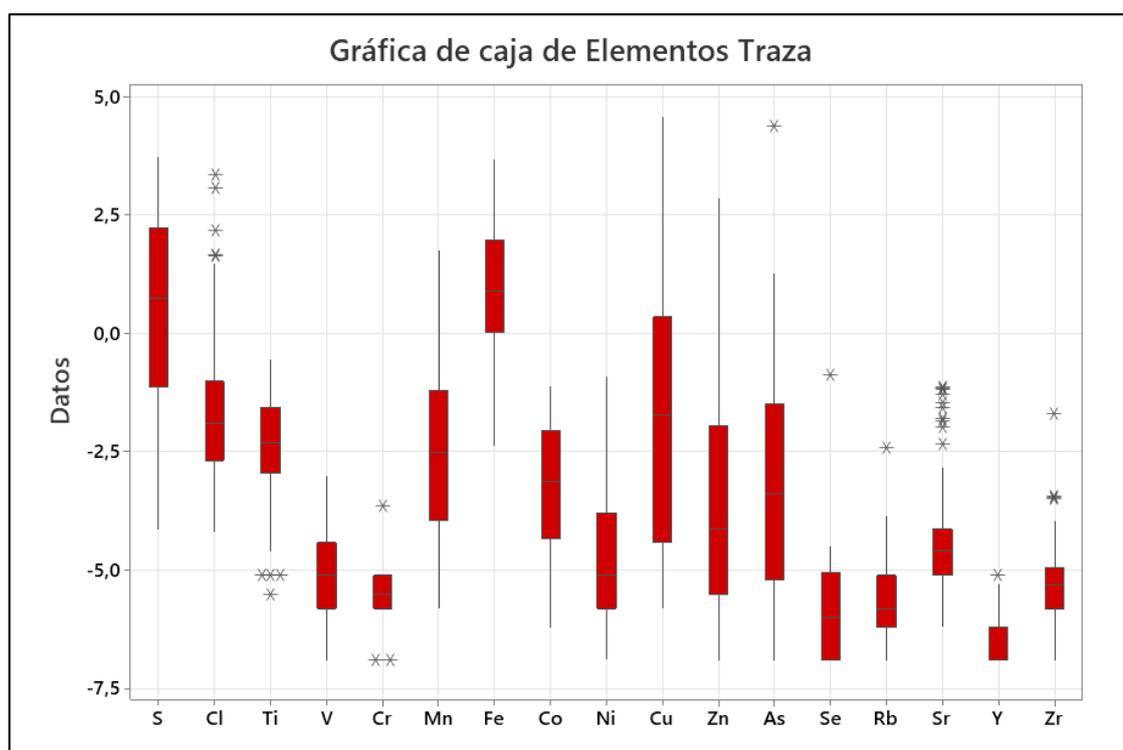


Gráfico 4: Gráfico de caja para elementos mayores (Fuente: Edición propia).

4.3.2 Análisis multivariable

Para evaluar las relaciones que existen entre las variables presentes en la base de datos se realizó una selección de los elementos mayormente relacionados al Co, La, Ce e Y, con fin de generar los gráficos binarios de dispersión entre estos. Para el caso de las LREE's, lantano y cerio, su poca frecuencia en los datos de concentraciones obtenidos, limita el análisis binario requerido.

4.3.2.1 Cobalto y óxidos mayores

Para el análisis gráfico simultáneo de cobalto vs. óxidos mayores, se procede a identificar patrones y relaciones entre estas, ya con los datos normalizados y unidad de medida en % en peso, se estudia la gráfica binaria (Gráfico 5), y la tabla de correlación de Pearson (Tabla 5).

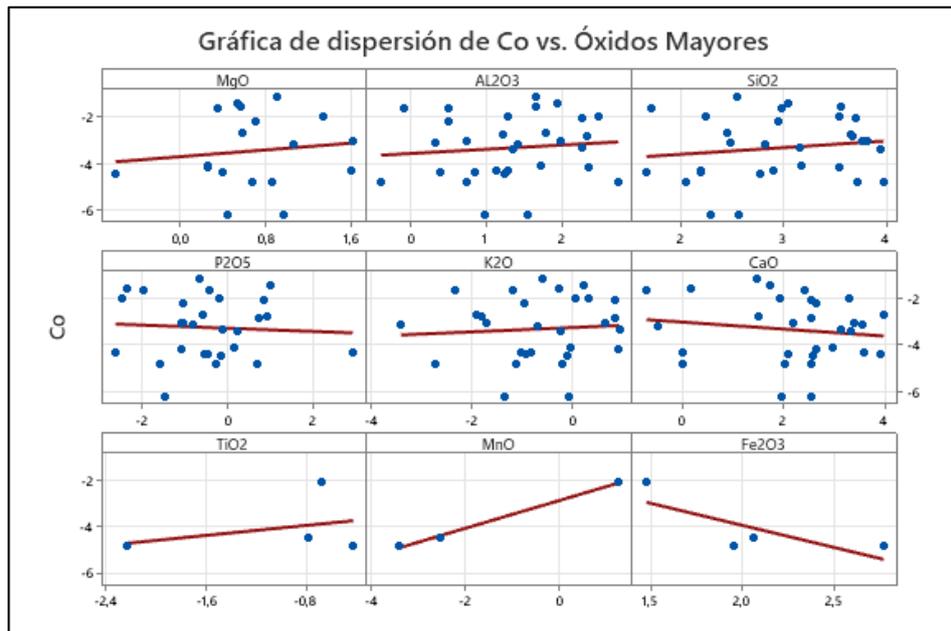


Gráfico 5: Gráficos binarios para Cobalto vs. óxidos mayores (Fuente: Edición propia).

El gráfico 5 y la tabla 5 muestran la correlación de los óxidos mayores y el cobalto, estos presentan en general una correlación positiva baja con el cobalto, destacando con una mayor correlación, el MnO (0,999) el TiO₂ (0,329) y SiO₂ (0,144). Marcando una correlación nula, o muy cercano a 0, destacan P₂O₅ (-0,063) y K₂O (0,075), y elementos como CaO (-0,140) y Fe₂O₃ (-0,764), poseen una correlación negativa leve a fuerte. Cabe destacar la baja densidad de datos en elementos como MnO (0,999), TiO₂ (0,329) y Fe₂O₃ (-0,764), lo cual podría limitar las conclusiones con respecto a esta correlación con el cobalto.

Tabla 5: Valores del grado de correlación, Co vs. óx. mayores, metodología de Pearson.

Correlaciones Co vs. Óxidos Mayores									
	Co	MgO	AL2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO
MgO	0,12								
AL2O3	0,104	0,149							
SiO2	0,144	-0,017	0,688						
P2O5	-0,063	-0,079	0,063	0,084					
K2O	0,075	0,013	0,787	0,631	0,015				
CaO	-0,14	0,041	0,019	-0,137	0,352	-0,026			
TiO2	0,329	-0,308	0,897	0,178	-0,028	0,735	-0,199		
MnO	0,999	-0,032	0,115	0,079	0,538	0,596	0,509	-0,045	
Fe2O3	-0,764	0,459	0,35	0,527	-0,018	0,669	0,367	0,083	0,422

4.3.2.2 Cobalto y elementos traza

Al cobalto se correlaciona a los elementos traza S, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Hf, Pt, Pb, y U. Su relación con los REE's será tratada en la siguiente sección. Los resultados del análisis binario y correlación de Pearson son presentados a continuación.

Tabla 6: Valores del grado de correlación, Co vs. E. traza, metodología de Pearson.

Correlaciones Co vs. Elementos Traza								
	Co	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As
S	0,292							
Mn	0,003	-0,21						
Fe	0,61	0,175	0,16					
Ni	0,277	0,06	-0,034	0,109				
Cu	0,217	0,073	0,134	0,108	0,691			
Zn	-0,239	-0,151	0,132	-0,061	0,587	0,79		
As	0,014	0,162	0,123	0,164	0,324	0,6	0,772	
Se	-0,266	-0,02	-0,393	-0,64	0,671	0,446	0,909	0,39

Correlaciones Co vs. Elementos Traza							
	Co	Mo	Ag	Cd	Hf	Pt	Pb
Mo	-0,386						
Ag	0,271	0,265					
Cd	-0,242	0,31	-0,128				
Hf	0	-0,028	-0,152	-0,456			
Pt	-0,343	0,187	0,305	0,728	-0,495		
Pb	-0,057	0,48	0,272	0,574	-0,169	0,562	
U	-0,062	0,944	-0,465	0,542	0,59	-0,262	0,777

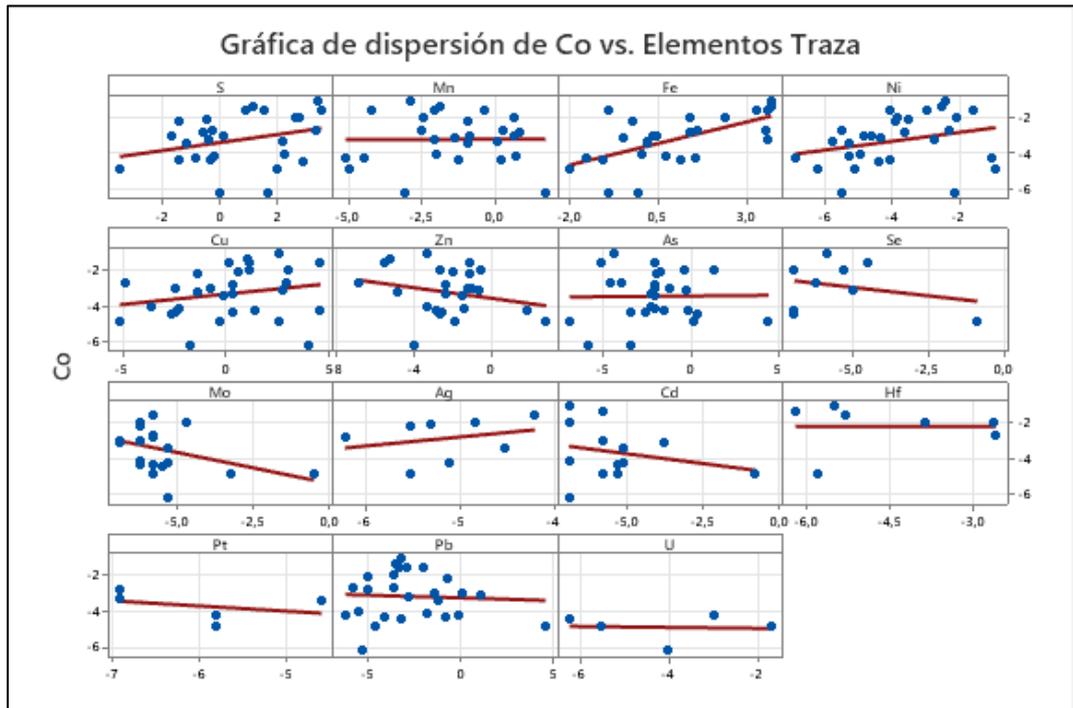


Gráfico 6: Gráficos binarios para Cobalto vs. elementos traza (Fuente: Edición propia).

Se observa en el gráfico 6 que el cobalto y los elementos Fe, S, Ni, Ag, Cu, poseen una correlación positiva alta, en orden descendente (0,610; 0,292; 0,277; 0,271; y 0,217) (Tabla 6), indicando un crecimiento proporcional de estos elementos en cuestión. En el caso de elementos con nula relación al cobalto, o grado de correlación cercano a 0, se desprenden los elementos As, Mn, Hf, Pb y U. Por último, los elementos con correlación negativa alta al cobalto, en orden descendente, encabezados por, Mo, luego, Pt, Se, Cd y Zn (-0,386; -0,343; -0,266; -0,242; y -0,239 respectivamente).

4.3.2.3 REE's y óxidos mayores

Al encontrar poca densidad de datos en los elementos La y Ce (frecuencia de 2 y 3), la información obtenida de sus gráficos de dispersión es poco fidedigna, por otro lado, itrio (Y) suele aparecer con bastante frecuencia y sus graficas serán analizadas a continuación.

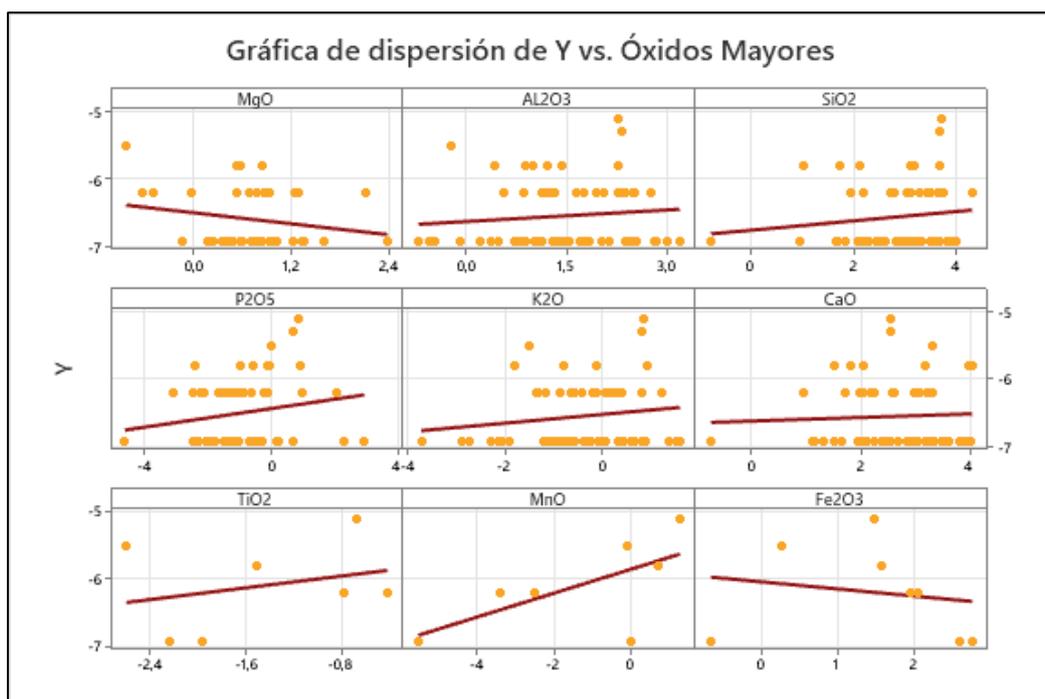


Gráfico 7: Gráficos binarios para itrio vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).

La correlación de la HREE, itrio (Gráfico 7), con respecto a los óxidos mayores, se mantiene positiva alta solo con el óxido MnO (0,650), seguido por los óxidos TiO₂ (0,272) y P₂O₅ (0,184), de correlación positiva baja, junto a K₂O, SiO₂ y Al₂O₃, en orden descendente. Los óxidos de Fe₂O₃ y MgO, entregan un grado negativo leve de correlación, y CaO un valor de 0,049, considerado como tendencia nula, debido a su cercanía a correlación 0 (Tabla 7).

Tabla 7: Valores del grado de correlación, Y vs. óx. mayores, metodología de Pearson.

Correlaciones Y vs. Óxidos Mayores									
	Y	MgO	AL2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO
MgO	-0,195								
AL2O3	0,108	0,149							
SiO2	0,129	-0,017	0,688						
P2O5	0,184	-0,079	0,063	0,084					
K2O	0,149	0,013	0,787	0,631	0,015				
CaO	0,049	0,041	0,019	-0,137	0,352	-0,026			
TiO2	0,272	-0,308	0,897	0,178	-0,028	0,735	-0,199		
MnO	0,65	-0,032	0,115	0,079	0,538	0,596	0,509	-0,045	
Fe2O3	-0,177	0,459	0,35	0,527	-0,018	0,669	0,367	0,083	0,422

Las gráficas de dispersión de las LREE's, lantano y cerio, se ven relacionados con los elementos: Al_2O_3 , P_2O_5 y CaO ; junto a Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O y CaO , respectivamente. La poca frecuencia de datos observables en la base de datos, cuyos resultados arrojaran concentraciones en lantano o cerio, imposibilitaron el análisis con los óxidos restantes, y generan gráficos poco fidedignos, con baja cantidad de datos.

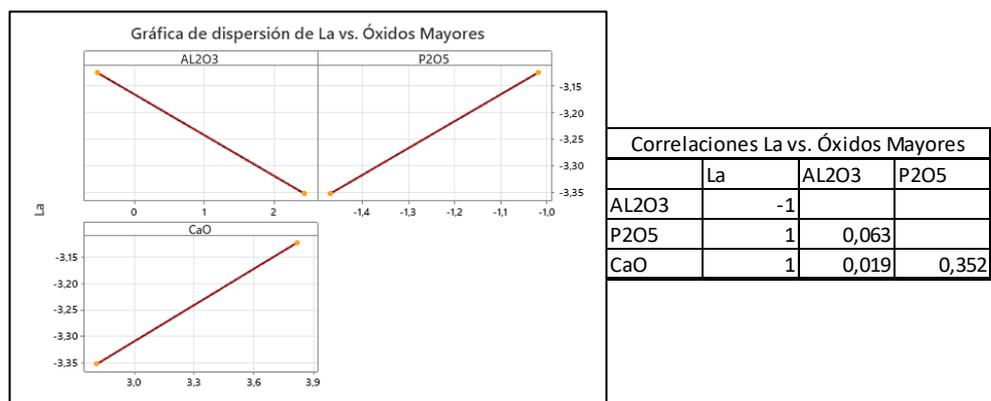


Figura 45: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para lantano vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).

El La, presenta una correlación negativa con el óxido Al_2O_3 , y positivo con P_2O_5 y CaO (Fig. 45). Gráficas generadas con solo 2 coincidencias de datos entre La, y los óxidos mencionados.

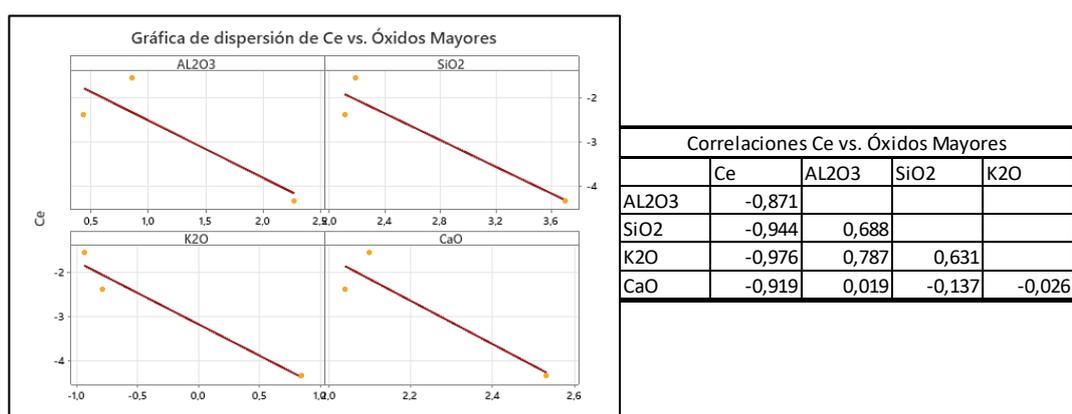


Figura 46: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para cerio vs. elementos mayores (Fuente: Edición propia).

En el caso del elemento Ce, se observa una correlación negativa general con los gráficos de los óxidos, Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O y CaO , siendo las gráficas generadas por la coincidencia de 3 datos entre del Ce y estos óxidos, entre 110 análisis (Fig. 46).

4.3.2.4 REE's y elementos traza

La tabla de correlación de Y es tratada a continuación, con una frecuencia de 67 del total de 110 análisis. Por otro lado, al analizar las gráficas de dispersión de lantano, con una frecuencia de 2, se observa una tendencia con los elementos, S, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Sr, Zr y Hf; y el gráfico de cerio, con solo 3 apariciones dentro del total de los análisis, concede valores con los elementos S, V, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo y Pb, que podrían asemejarse a la realidad de sus tendencias, aun así, hace falta un estudio en detalle para conocer su tendencia verdadera.

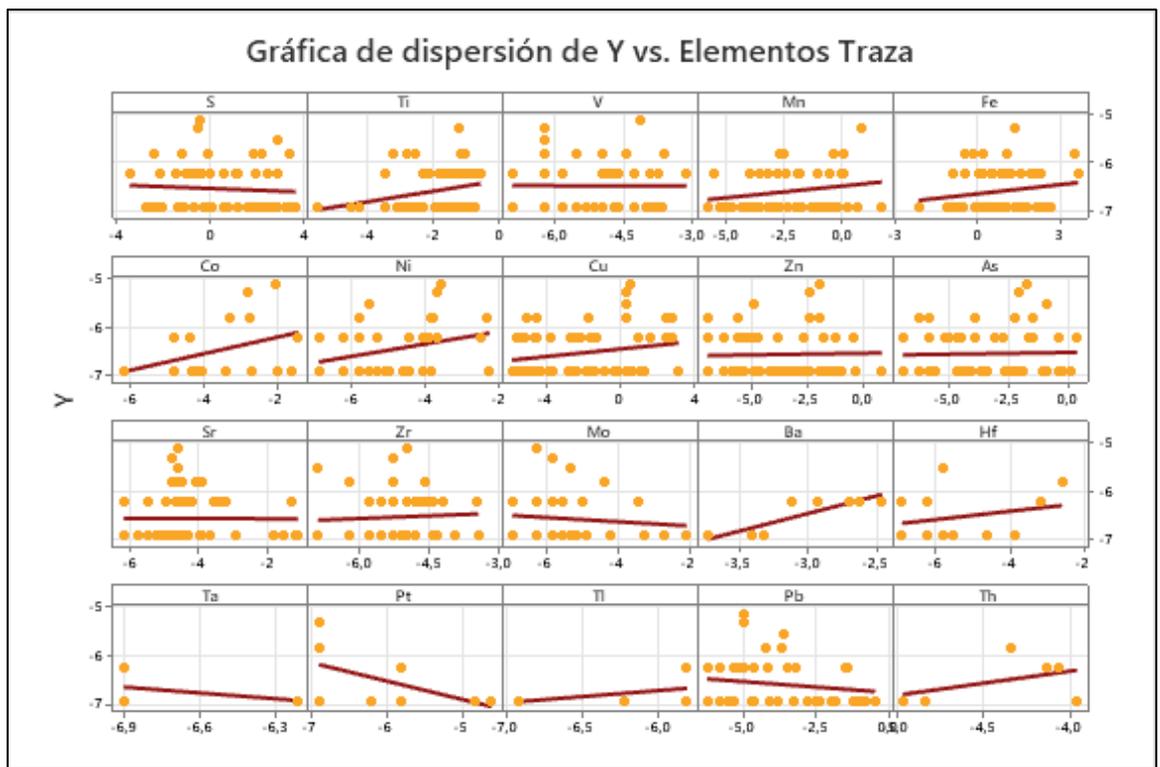


Gráfico 8: Gráficos binarios para itrio vs. elementos traza (Fuente: Edición propia).

La correlación entre el itrio y los elementos traza, es graficada y correlacionada en el gráfico 8, y la tabla 8. Entre los elementos descritos, se logra destacar un valor positivo alto con los elementos, Ba, Tl y Th, (0,864; 0,532 y 0,436 respectivamente), destaca su relación positiva con los elementos Co y Ni (0,356 y

0,326) entre otros metales con relación positiva leve. Guarda relación negativa leve con los elementos Ta, Pb y Mo (-0,588; -0,153 y -0,107 respectivamente), y relación nula o casi 0 con S, V, Zn, As, Sr, Zr y U.

Correlaciones Y vs. Elementos Traza										
	Y	S	Ti	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
S	-0,072									
Ti	0,254	0,058								
V	-0,003	-0,265	0,194							
Mn	0,214	-0,21	0,07	0,146						
Fe	0,167	0,175	-0,02	0,382	0,16					
Co	0,356	0,292	-0,029	0,056	0,003	0,61				
Ni	0,326	0,06	-0,185	0,052	-0,034	0,109	0,277			
Cu	0,217	0,073	-0,153	-0,168	0,134	0,108	0,217	0,691		
Zn	0,03	-0,151	-0,183	-0,221	0,132	-0,061	-0,239	0,587	0,79	
As	0,032	0,162	-0,241	-0,197	0,123	0,164	0,014	0,324	0,6	0,772

Correlaciones Y vs. Elementos Traza											
	Y	Sr	Zr	Mo	Ba	Hf	Ta	Pt	Tl	Pb	Th
Sr	-0,004										
Zr	0,057	0,626									
Mo	-0,107	0,516	0,342								
Ba	0,864	0,57	0,585	0,961							
Hf	0,244	-0,17	0,122	-0,028	0,46						
Ta	-0,316	0,843	0,783	0,797	*	*					
Pt	-0,588	-0,126	-0,398	0,187	*	-0,495	*				
Tl	0,532	0,417	0,516	0,441		1	-0,414	0,983	0,656		
Pb	-0,153	-0,126	0,071	0,48	0,912	-0,169	0,877	0,562	0,796		
Th	0,436	-0,456	-0,007	0,121	*	0,342	*	*	-0,519	0,202	
U	0	0,39	0,517	0,944	*	0,59	1	-0,262	0,968	0,777	0,995

Tabla 8: Valores del grado de correlación, Y vs. e. traza, metodología de Pearson.

Las gráficas de dispersión de lantano (Fig. 47), reflejan una tendencia negativa solo con 3 elementos, el S, Sr y Zr, y una tendencia positiva con el resto de elementos. Aun así, las relaciones entre los elementos traza, S, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Sr, Zr y Hf, que se ven reflejados en la tabla de correlación de Pearson de la figura 47, podrían dilucidar alguna relación con los elementos de tierras raras.

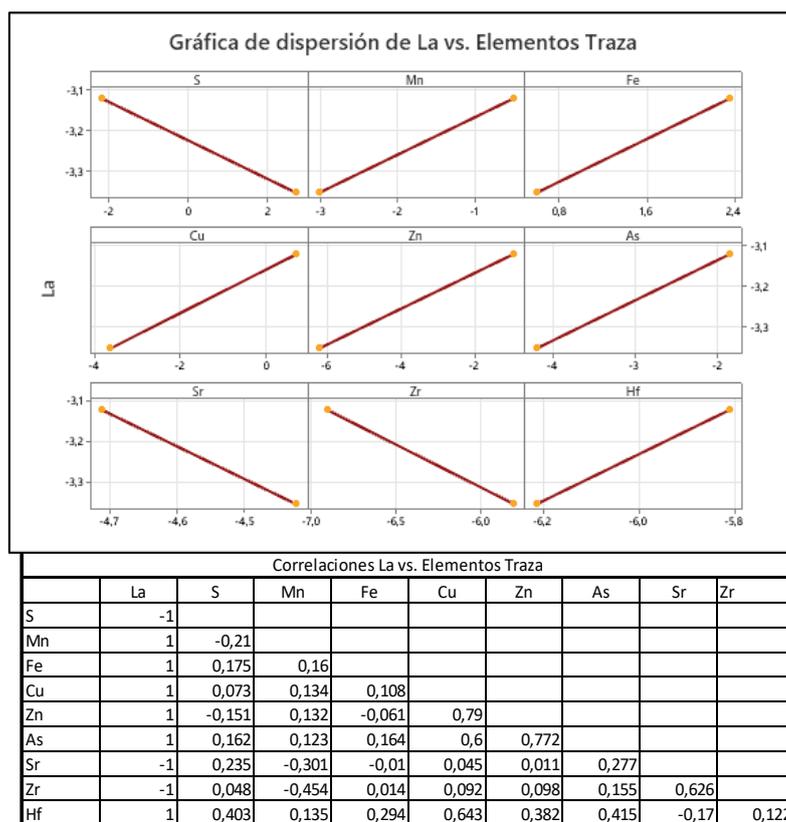
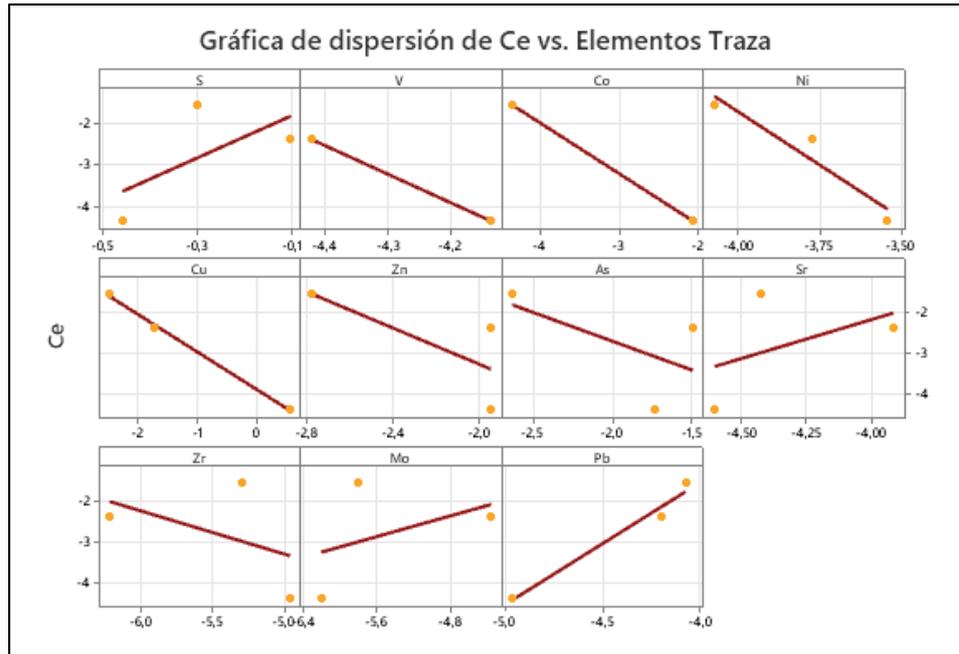


Figura 47: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para lantano vs. elementos trazas (Fuente: Edición propia).

El gráfico de cerio, con solo 3 apariciones dentro de 110 análisis, concede valores con los elementos S, V, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo y Pb (Fig. 48), mostrando un gráfico positivo con solo 4 de ellos, Pb, S, Sr y Mo, en orden descendente de afinidad.



Correlaciones Ce vs. Elementos Traza											
	Ce	S	V	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Zr	Mo
S	0,635										
V	-1	-0,265									
Co	-1	0,292	0,056								
Ni	-0,954	0,06	0,052	0,277							
Cu	-0,999	0,073	-0,168	0,217	0,691						
Zn	-0,729	-0,151	-0,221	-0,239	0,587	0,79					
As	-0,581	0,162	-0,197	0,014	0,324	0,6	0,772				
Sr	0,467	0,235	0,014	-0,416	-0,176	0,045	0,011	0,277			
Zr	-0,473	0,048	0,098	-0,294	0,162	0,092	0,098	0,155	0,626		
Mo	0,423	0,207	-0,008	-0,386	0,373	0,369	0,436	0,607	0,516	0,342	
Pb	0,987	-0,308	-0,054	-0,057	0,501	0,418	0,678	0,475	-0,126	0,071	0,48

Figura 48: Gráficos binarios y valores del grado de correlación de Pearson, para cerio vs. elementos trazas (Fuente: Edición propia).

5CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Entre las unidades descritas en este estudio, demarcadas principalmente por facies sedimentarias marinas someras, intercaladas con eventos volcanoclásticos y facies sedimentarias terrígenas de areniscas y lutitas rojizas, se correlacionan directamente con las facies sedimentarias correspondientes al techo del Gp. Chañarcillo descritas por Arévalo (2005). En orden de antigüedad, la Fm. Nantoco (Kin), en específico su unidad “Kin 1a”, se correlaciona a la unidad vulcano-sedimentaria antigua (Vsa), de secuencias de areniscas y lutitas rojas intercaladas con para conglomerados volcánicos, representando la regresión marina Hauteriviense aflorando al oeste del área. A su vez, la unidad sedimentaria marina transicional (Smt), integrada principalmente por calcarenitas en alternancia con calcilutitas y niveles fosilíferos a techo, se correlaciona directamente con la Fm. Totoralillo (Kit), compuesta por calcilutitas masivas con laminaciones planas y alto contenido fosilífero a techo, representando una transgresión marina en el Barremiense. La siguiente litología definida como unidad vulcano-sedimentaria joven (Vsj), de Calcilutitas y calcarenitas fosilíferas en base, intercaladas con para conglomerados volcánicos y sedimentos terrígenos finos a techo, se ve relacionada a la Fm. Pabellón (Kip) en específico a su miembro “Kip a”, la cual mantiene facies que responden a una regresión marina y emersión de la cuenca Chañarcillo, en el Aptiense, descrito como secuencias de areniscas y conglomerados volcánicos a techo. La unidad sedimentaria marina transicional fosilífera (Smtf), integrada por calcilutitas en alternancia con calcarenitas bioclásticas tipo packstone y wackestone y lutitas terrígenas en base, se relaciona al miembro “Kip”, descrito como secuencias sedimentarias marinas fosilíferas transicionales, calcarenitas bioclásticas y areniscas y conglomerados terrígenos interdigitados.

La geología estructural del sector está controlada principalmente por fallas inversas de alto ángulo, con cierto grado de movimiento oblicuo sinistral, asociadas a zonas de cizalle y brechas hidrotermales. El contacto entre Smt y Vsa, consiste en contacto por falla inversa con manteo de hasta 78° al SE, asociado a la estructura de pliegue, que se encuentra directamente al E del contacto, consiste en un pliegue anticlinal tumbado hacia en NW, e inmersión de ~10° hacia el NE, cuyas características guardan relación con el “Anticlinorium de Tierra Amarilla”.

Las zonas de alteración en el área, se encuentran asociadas a vetas y estructuras mayores mineralizadoras, donde la diferencia entre los tipos de alteración presentes en las unidades vulcano-sedimentaria (i.e. silicificación moderada a leve, epidota y clorita leve, magnetita, pirita, calcita, dolomita, siderita), y las unidades sedimentarias marinas (i.e. limonitas (mayor hematita), calcita, dolomita, siderita, anhidrita, baritina y menor clorita), demuestra una cercanía a la fuente calórica en las rocas de mayor contenido volcánico. La mineralización primaria consiste en magnetita, titanomagnetita, calcopirita, pirita y arsenopirita subordinada, con modo de ocurrencia principal, tipo vetilla, brecha hidrotermal, y disseminado en mantos, en rocas volcánicas y sedimentarias.

Los cambios de granulometría y un alto contenido de carbonato de calcio, tiene una influencia directa en la porosidad/permeabilidad primaria de estas rocas y la neutralización de los fluidos ácidos, facilitando los procesos de mineralización, tal como se ha observado en depósitos estratoligados de Cu-Co hospedado en rocas sedimentarias y depósitos polimetálicos hidrotermales (IOCG e IOA) (Smith, 2001), como es el caso de las rocas pertenecientes a la unidad “Smt”, cuya mineralización incluye menas oxidadas de cobre, hierro, cobalto y plata, minerales arseniatos de Cu, Co y Pb.

Este estilo de mineralización y control estructural, junto a la presencia de metales como Pb, Zn, Au y Ag, indican una relación de proximidad, denotando una posible génesis periférica con respecto a la mineralización IOCG presente en el distrito Candelaria-Punta del Cobre, aledaño al sur del área de estudio y relacionado directamente al “Anticlinorium de Tierra Amarilla”. Este yacimiento IOCG se encuentra hospedado en zonas de fallas, brechas y litologías específicas, con características de deformación transpresional y compresional, y mineralización sincrónica, donde los mayores eventos mineralizadores alrededor de 118-112 Ma, concuerdan con las dos mayores facies del batolito Copiapó, correspondiente a los plutones La Brea y San Gregorio, y coinciden con la inversión de la cuenca Chañarcillo (~110 Ma) en el Aptiense, lo cual habría inducido la adición de fluidos salinos de la cuenca, y fluidos magmáticos hidrotermales con una afinidad máfica intermedia esto asociado al largo periodo de actividad de un marco tectónico extensivo a transtensivo generalizado, que pudo haber facilitado el ascenso de fluidos astenosféricos derivados del manto (del Real et al., 2020). Existen estudios que

asocian las antiguas fallas normales de alto ángulo, que controlaban las cuencas extensivas de trasarco donde fue depositado el Gp. Chañarcillo en el Cretácico Inferior, con las fallas inversas de alto ángulo presentes en el área, las cuales fueron invertidas por movimientos regionales asociado al cambio de configuración tectónica del Cretácico Inferior tardío, asociado a la Fase orogénica Peruana generando el cese de la sedimentación marina (Martínez et al., 2013).

Una segunda posible fuente de estos metales poco convencionales como el cobalto, podría estar relacionada a la presencia de litologías aledañas del área de estudio asociadas a un magmatismo del tipo intermedio (SERPLAC, 1983; Arévalo, 2005), como lo es el cuerpo intrusivo hipabisal diorítico porfídico de clinopiroxeno y olivino (Kihd), como filón manto interdigitado a “Kip” al E del área de estudio, siendo la fuente del Co su concentración en ciertos minerales formadores de roca, por ejemplo, del olivino, espinela y clorita (Smith, 2001). Por otra parte, en ciertos casos, donde no se reconoce una conexión con rocas máficas y ultramáficas, se relaciona a sistemas hidrotermales a escala corteza que pudieron extraer y transportar el cobalto desde grandes profundidades (Hitzman et al., 2017).

El análisis de los resultados estadísticos univariados, entrega información con respecto al comportamiento de los elementos, se puede observar una alta concentración de datos del SiO₂ y CaO, lo cual va de la mano con la naturaleza calcárea de las rocas, y su reconocible alteración calcosilicatada. El elemento Co presenta una baja dispersión de datos con valores concentrados en su media aritmética (0,020%), donde su máximo valor alcanzó los 3290 ppm o 0,329%, y una curva de simetría negativa, indicando que sus valores están concentrados por debajo de su máximo valor encontrado, lo que concuerda con los antecedentes previos de investigación por evaluación del potencial de cobalto, donde se reportan análisis con resultados de leyes entre 0,13% y 0,22% (SERPLAC, 1983), generando un lugar de alto interés para concentraciones de cobalto. Los valores de mediana, dato estadístico a favor de su concentración promedio, para los elementos traza está encabezado por Fe (2,452%), seguido por S (1,399%), Cu (0,18%), Cl (0,121%), Ti (0,095%), Mn (0,079%), As (0,032%), y los valores de media para Sb (0,032%), Sr (0,029%), Mo (0,016%) y Ni (0,023%), los vuelve interesantes para futuros estudios. La obtención de datos con respecto a Ag (mediana 0,012%), con una frecuencia de 24 de 110

análisis, y el Au que por su baja frecuencia de 6 entre 110, o elementos como U, W, Hg, Bi, o el Nb, cuyo análisis arroja una muestra con una concentración de 0,018% o 180 ppm, elementos que marcan una baja frecuencia de datos (“N”), imposibilitan la correcta interpretación gráfica, pero esto no los hace menos importantes, futuros estudios enfocados podrían dilucidar sus magnitudes reales. Así mismo las LREE’s, lantano y cerio, denotan una baja frecuencia en los datos de concentraciones obtenidos, limitando sus correctos análisis unitarios y binarios.

Al comparar los contenidos de cobalto con los de otros elementos se pudo identificar una correlación positiva alta con Fe, S, Ni, Ag y Cu en orden descendente (0,610; 0,292; 0,277; 0,271; y 0,217 respectivamente), indicando un crecimiento proporcional con los elementos en cuestión. En el caso de elementos con nula relación al cobalto, o grado de correlación cercano a 0, se desprenden los elementos As, Mn, Hf, Pb y U. Y por último, pero no menos importante, los elementos con correlación negativa alta al cobalto, los que denotan una proporción inversa a este, ordenados de mayor a menor, están encabezados por Mo, luego, Pt, Se, Cd y Zn. Esto denota y corrobora la relación directa que existe entre el Co, el Fe y el S, puesto que, los iones de Cobalto, Co^{2+} y Co^{3+} , poseen radio iónico similar a los iones como Mg^{2+} , Mn^{4+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} y Ni^{2+} , sustituyéndolos en la formación de ciertos minerales, de esta forma, en bajas cantidades, el Co ingresa como impureza en la estructura de la magnetita, pirita y calcopirita e inclusive en limonitas, entre otros (Smith, 2001; Chepillo, 2019).

El Y posee concentraciones bajas en general de hasta 0,006%, pero mantiene una alta frecuencia de datos de 67 entre 110, y al ser analizadas sus correlaciones, marca una tendencia positiva alta con Ba, Tl y Th, (0,864; 0,532 y 0,436), y destaca su relación positiva con los elementos Co y Ni (0,356 y 0,326) y el óxido mayor P_2O_5 (0,184). Además guarda una proporción negativa de sus concentraciones con los elementos Ta, Pb y Mo (-0,588; -0,153 y -0,107), y relación nula o casi 0 con S, V, Zn, As, Sr, Zr y U. A su vez, el La y Ce, que poseen baja frecuencia, (2 y 3 entre 110 respectivamente) generan gráficos poco fidedignos, que demuestran ciertas tendencias con algunos elementos, los cuales pueden utilizarse para futuros análisis con mayor detalle con respecto a estas LREE’S. Las afinidades denotadas por Y, guardan relación a el tipo de yacimiento IOA, caracterizados por valores altos de

tierras raras en apatita, y mineral de mena magnetita y martita, con trazas de fases minerales sulfuradas, como pirita, arsenopirita, calcopirita, entre otros, con paragénesis elemental, de alto contenido en V (>1000 ppm), bajo Cr (<10 ppm), bajo contenido de Ti (100-1000 ppm), y posible adición de 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) (Villela et al., 2016). En el área de estudio, se mantienen con valores bajos de V (490 ppm), pero los demás elementos mencionados, guardan mucha semejanza con los de este estudio.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

- Mediante el estudio semi-cuantitativo realizado, por medio de metodologías como, mapeo geológico en terreno, análisis de fluorescencia de rayos x, microscopia estereoscópica, y análisis estadístico univariable y multivariable, se logra confirmar contenidos anómalos de cobalto e itrio, junto a metales como níquel, cobre, hierro, hafnio, plata, oro, platino, plomo, y uranio. Este amplio rango de elementos posiciona a La Chilena como un yacimiento polimetálico de origen magmático-hidrotermal hospedado en secuencias sedimentarias marinas. La correcta valoración de estos elementos dilucidará el verdadero valor económico de este yacimiento.
- El análisis macroscópico y estereoscópico de litologías, junto a el análisis estadístico y antecedentes teóricos, permiten relacionar espacialmente las concentraciones de cobalto, a la brecha tectónica hidrotermal, donde actualmente se explota la zona de sulfuros, en específico a la magnetita y pirita. En menor medida a calcopirita y a los mantos de óxidos de hierro, hematita y jarosita, y minerales oxidados oscuros, posiblemente óxidos de manganeso hidratado, llamado asbolana o groroilita de cobalto (i.e. cobalt wad).
- Las concentraciones de tierras raras analizadas en este estudio, en el caso del Y, muestra concentraciones uniformes de hasta 30 ppm, en general en las cercanías de los contactos litológicos, marcando una afinidad con los elementos Ba, Tl, Th, Co, Ni y P_2O_5 . La y Ce alcanzan valores mínimos, cuyo alcance deberá ser estudiado en trabajos posteriores.
- Propuestas exploratorias van dirigidas al extremo SE del área, donde se pudo localizar una zona de anomalía leve en Cu y Co, la cual coincide con una zona de conjugación de estructuras tectónicas complejas y contactos litológicos. La posibilidad de encontrar concentraciones de Cobalto y REE's en los depósitos de relave de este yacimiento puede ser abordada en estudios futuros.

- Se recomienda un análisis exploratorio y cristaloquímica a profundidad de las litologías que guardan las concentraciones de cobalto y REE's (confección de mallas de muestreo, análisis microscópico de cortes pulidos y transparentes, QEMSCAN, entre otros) para llegar a conocer la temporalidad de los eventos de mineralización y alteración hidrotermal, junto a una valorización cuantitativa de sus leyes, y su predicción geo metalúrgica, con el fin de lograr una futura explotación de estos elementos estratégicos.

REFERENCIAS

- Alaska Satellite Facility, Distributed Active Archive Center (ASF DAAC). Vertex Data Search. [En línea] (Fecha de consulta: 01/05/2019). Disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Arévalo C. (2005). Carta Copiapó, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta geológica de Chile, Serie Geología Básica*, N° 91, 53 p., 1 mapa escala 1: 100,000.
- Cembrano, J., Garrido, I., & Marquardt, M. (2009). Tectonic setting of IOCG deposits in the Central Andes: Strike-slip-dominated deformation. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago.
- Chakhmouradian, A. R., & Wall, F. (2012). Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More). *Elements*, 8(5), 333–340.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile* (Moreno, T. & Gibbons, W.; editors). The Geological Society, 21-114.
- Chepillo, J. (2019). 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. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Chile, 118 p.
- Decrée, S., Deloule, É., Ruffet, G., Dewaele, S., Mees, F., Marignac, C., Yans, J. & De Putter, T. (2010). Geodynamic and climate controls in the formation of Mio–Pliocene world-class oxidized cobalt and manganese ores in the Katanga province, DR Congo. *Mineralium Deposita*, 45(7), 621-629.
- del Real, I., Thompson, J. F. H., Simon, A. C., & Reich, M. (2020). Geochemical and Isotopic Signature of Pyrite as a Proxy for Fluid Source and Evolution in the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper-Gold District, Chile. *Economic Geology*, 115(7), 1493–1518
- del Real, I., Thompson, J.F.H., & Carriedo, J., (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre iron oxide copper gold district, northern Chile: *Ore Geology Reviews*, v. 102, p. 106–153.
- Dewaele, S., Muchez, P., Vets, J., Fernández-Alonzo, M., & Tack, L. (2006). Multiphase origin of the Cu–Co ore deposits in the western part of the Lufilian

fold-and-thrust belt, Katanga (Democratic Republic of Congo). *Journal of African Earth Sciences*, 46(5), 455-469.

- Emparán, C., & Pineda, G. (2006). Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta geológica de Chile, Serie Geología Básica*, N° 96, 85 p., 1 mapa escala 1: 100.000.
- European Commission Enterprise Industry. (2017). Study on the review of the list of critical raw materials. [En línea] (Fecha de consulta 20/12/2019). Disponible en: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- Filip I. (2016). Informe Geológico Mina La Chilena 1/6. ROMEXPLOR, Exploraciones Filip y Araya Ltda., Copiapó, Región de Atacama, Chile.
- Fontaine, L., De Putter, T., Bernard, A., Decrée, S., Cailteux, J., Wouters, J., & Yans, J. (2019). Complex mineralogical-geochemical sequences and weathering events in the supergene ore of the Cu–Co Luiswishi deposit (Katanga, DR Congo). *Journal of African Earth Sciences*, 161.
- Geoexploraciones Ltda., Secretarías Regionales de Planificación y Coordinación (SERPLAC), 1983. Proyecto Cobalto – Copiapó, diversificación de la pequeña y mediana minería, Copiapó, Región de Atacama, Chile.
- Gusenius, E. (1967). Beginnings of Greatness in Swedish Chemistry: Georg Brandt,(1694-1768). *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 70(4), 413-425.
- Hitzman, M. W., Bookstrom, A. A., Slack, J. F., & Zientek, M. L. (2017). Cobalt—styles of deposits and the search for primary deposits. US Geological Survey Open-File Report, 1155, 47.
- Kissin, S.A. (1993). Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) Veins. En Sheahan, P.A., y Cherry, M.E., (Eds). *Ore Models volumen 2*, Geoscience Canada, Series 6, 87-98.
- Lightfoot, P. C., & Evans-Lamswood, D. (2015). Structural controls on the primary distribution of mafic–ultramafic intrusions containing Ni–Cu–Co–(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. *Ore Geology Reviews*, 64, 354–386.

- López, L., & Echeveste, H. (2012). Paragénesis mineral del depósito tipo five element Purísima-Rumicruz, Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(4), 537-543.
- Maksaev, V. (2001). Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. Notas de clase, Departamento de Geología, Universidad de Chile. [En línea] (Fecha de consulta: 05/08/2019). Disponible en: https://www.ucursos.cl/uchile/2011/0/COMGEOPLD/1/material_docente/bajar?id_material=389028
- Manheim, F. T. (1986). Marine cobalt resources. *Science*, 232(4750), 600-608.
- Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I., & Deckart, K. (2013). The structure of the Chañarcillo Basin: An example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 42, 1-16.
- McGowan, R. R., Roberts, S., & Boyce, A. J. (2005). Origin of the Nchanga copper–cobalt deposits of the Zambian Copperbelt. *Mineralium Deposita*, 40(6-7), 617–638.
- Minera Nittetsu Chile Ltda. 2019. Los Compadres. Servicio Nacional de Geología y Minería, Sistema de Información Geológica de Exploración (SIGEX). [En línea] (Fecha de consulta: 01/08/2019). Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/sigex/>.
- Morata, D. y Aguirre, L. (2003). Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29° 20'–30° S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(6), 459-476.
- Moscoso, R., Nasi, C., & Salinas, P. (1982). Geología de la Hoja Vallenar y parte Norte de la Hoja La Serena. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, N° 55, 100 p.
- Muech, P., Vanderhaeghen, P., El Desouky, H., Schneider, J., Boyce, A., Dewaele, S., & Cailteux, J. (2008). Anhydrite pseudomorphs and the origin of stratiform Cu–Co ores in the Katangan Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *Mineralium Deposita*, 43(5), 575.

- Mudd, G. M., Weng, Z., Jowitt, S. M., Turnbull, I. D., & Graedel, T. E. (2013). Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt. *Ore Geology Reviews*, 55, 87–98.
- Oliveros, V., Morata, D., Aguire, L., Féraud, G., Fornari, M., (2007). Jurassic to early cretaceous subduction-related magmatism in the Coastal Cordillera of northern Chile (18°30–24°S): Geochemistry and petrogenesis. *Revista Geologica de Chile* 34.
- Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Lucassen, F., Ducea, M. N., Ciocca, I., González J., Espinoza M., Salazar E., Coloma F. & Kasemann, S. A. (2020). Lithospheric evolution of the Pre- and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*, 80, 202-207.
- Puche, R., Cascales, C., Porcher, P. & Maestro, P. (2000). Tierras raras: materiales avanzados. Real Sociedad Española de Química. *Anales de la Real Sociedad española de Química*, 4, 11-26.
- Regueiro, M. y Barros, G. (2014). Minerales críticos en Europa: metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España. *Macla*, (19).
- Rossel, P., Oliveros, V., Ducea, M.N., Charrier, R., Scaillet, S., Retamal, L., Figueroa, O. (2013). The Early Andean subduction system as an analog to island arcs: evidence from across-arc geochemical variations in northern Chile. *Lithos* 179, 211–230.
- Ruthven, R., Singleton, J., Seymour, N., Gomila, R., Arancibia, G., Stockli, D. F., Magloughlin, J. (2020). The geometry, kinematics, and timing of deformation along the southern segment of the Paposo fault zone, Atacama fault system, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 102355.
- Schlacher, T. A., Baco, A. R., Rowden, A. A., O'Hara, T. D., Clark, M. R., Kelley, C., & Dower, J. F. (2014). Seamount benthos in a cobalt-rich crust region of the central Pacific: conservation challenges for future seabed mining. *Diversity and Distributions*, 20(5), 491-502.
- Seddon, M. (2001). The cobalt market—current volatility versus future stability?. *Applied Earth Science*, 110(2), 71-74.
- Sherman N., British Broadcasting Corporation News (BBC News), Nueva York. (2018). Cobalto: el metal precioso que está provocando una nueva "fiebre del

oro". [En línea] (Fecha de consulta: 01/06/2019). Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44966801>

- Smith, C. G. (2001). Always the bridesmaid, never the bride: cobalt geology and resources. *Applied Earth Science*, 110(2), 75-80.
- Statista (2018). Ranking de los principales países productores de cobalto a nivel mundial en 2018 (en toneladas métricas). [En línea] (Fecha de consulta: 01/06/2019). Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/635437/paises-lideres-en-la-produccion-de-cobalto-a-nivel-mundial/>
- Sweeney, M. A., Binda, P. L., & Vaughan, D. J. (1991). Genesis of the ores of the Zambian Copperbelt. *Ore Geology Reviews*, 6(1), 51–76.
- Tisserant, A., & Pauliuk, S. (2016). Matching global cobalt demand under different scenarios for co-production and mining attractiveness. *Journal of Economic Structures*, 5(1), 4.
- Townley, B., Díaz, A., & Luca, R. (2017a). Potencial de Exploración y Explotación de Recursos Minerales de Cobalto en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemática, Universidad de Chile, Chile, 52 p.
- Townley, B., Díaz, A., & Luca, R. (2017b). Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemática, Universidad de Chile, Chile.
- Villela D., Donoso F. & Cantallopts J. (2016). Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Ministerio de Minería. Chile. 48 p. [En línea] (Fecha de consulta: 01/06/2019). Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tierras%20Raras%20final.pdf>
- Wells, M. A., Ramanaidou, E. R., Verrall, M., & Tessarolo, C. (2009). Mineralogy and crystal chemistry of “garnierites” in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia. *European Journal of Mineralogy*, 21(2), 467–483.
- Wendorff, M. (2011). Tectonosedimentary expressions of the evolution of the Fungurume foreland basin in the Lufilian Arc, Neoproterozoic–Lower Palaeozoic, Central Africa. Geological Society, London, Special Publications, 357(1), 69-83.

ANEXOS

1. TABLAS DE RESULTADOS ANÁLISIS XRF.

Tabla 9: 37 primeros análisis, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.

Codigo	Zona	Analisis	Tipo	Norte	Este	MgO	AL2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti	TiO2	V	Cr	Mn	MnO	Fe2O3	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr
D1M1T1	A	1	General	6969643	381640	2,372	15,634	41,262	0,205	0,032	0,051	0,806	12,746		0,656	0,024	0,000		0,033	7,035		0,008	0,002	0,006	0,000	0,001	0,000	0,004	0,013
D1M1T2	A	2	Traza	6969643	381640	2,574	16,782	48,773	0,103	0,066	0,045	0,686	7,254	0,174		0,006	0,000	0,030			2,573	0,000	0,000	0,006	0,003	0,001	0,000	0,002	0,009
D1M1T2	B	3	Traza	6969643	381640	2,303	2,735	2,754	0,575	0,306	0,094	0,000	51,351	0,077		0,004	0,000	0,071			0,837	0,000	0,000	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000	0,016
D1M3T5	C	4	Traza	6969595	381826	1,956	0,670	7,753	0,751	0,000	2,556	0,065	1,003	0,076		0,000	0,026	0,007			0,137	0,008	0,402	13,209	17,457	79,946	0,417	0,000	0,232
D1M3T1	A	5	Traza	6969595	381826	1,422	0,915	19,590	0,140	4,596	0,765	0,303	11,103	0,086		0,009	0,000	0,681			0,416	0,201	0,017	3,017	0,319	0,121	0,000	0,002	0,005
D1M3T2	A	6	Traza	6969595	381826	1,576	0,585	0,000	0,361	0,116	0,049	0,000	45,469	0,000		0,000	0,000	0,606			10,546	0,000	0,000	2,037	0,378	0,157	0,000	0,000	0,009
D1M3T2	A	7	General	6969595	381826	1,801	0,000	0,000	0,303	0,095	0,022	0,000	44,047		0,000	0,002	0,000		0,979	13,550		0,000	0,006	1,474	0,740	0,359	0,000	0,000	0,005
D1M3T2	B	8	Traza	6969595	381826	0,000	2,336	15,880	0,431	0,000	5,213	0,304	26,380	0,116		0,001	0,006	0,042			1,046	0,000	0,020	17,704	0,677	0,068	0,000	0,003	0,007
D1M3T3	A	9	Traza	6969595	381826	0,000	1,468	9,631	0,259	0,112	0,075	0,024	31,763	0,004		0,000	0,000	0,440			14,263	0,000	0,001	1,377	0,343	0,427	0,000	0,001	0,007
D1M3T4	A	10	Traza	6969595	381826	2,157	0,841	0,000	0,502	0,052	0,163	0,000	51,191	0,018		0,015	0,000	0,177			0,673	0,000	0,000	0,896	0,046	0,034	0,000	0,000	0,007
D1M3T4	B	11	Traza	6969595	381826	0,000	2,600	18,875	0,806	0,062	0,041	0,254	34,538	0,101		0,007	0,000	0,146			3,382	0,000	0,000	0,405	0,139	0,064	0,000	0,001	0,008
D1M4T1	A	12	Traza	6969528	381923	1,288	5,598	23,940	1,173	9,128	0,043	0,963	19,361	0,187		0,003	0,000	0,137			1,056	0,017	0,007	0,028	0,034	0,099	0,000	0,002	0,012
D1M4T1	B	13	Traza	6969528	381923	2,812	3,613	7,340	1,264	41,433	0,179	0,499	32,062	0,203		0,000	0,000	0,081			7,079	0,000	0,002	0,042	0,037	0,034	0,000	0,001	0,015
D1M4T2	A	14	Traza	6969528	381923	0,000	1,598	2,594	1,232	4,400	0,075	0,000	53,547	0,032		0,000	0,000	0,180			0,592	0,000	0,000	0,012	0,008	0,014	0,000	0,000	0,024
D2M1T1	A	15	Traza	6969852	382005	0,000	2,349	8,952	0,618	0,741	28,714	0,391	8,163	0,144		0,000	0,001	1,263			3,025	0,013	0,017	0,085	0,062	0,072	0,000	0,003	0,012
D2M1T1	A	16	General	6969852	382005	0,000	1,544	8,292	0,930	0,903	21,594	0,455	7,694		0,223	0,012	0,000		2,056	4,820		0,000	0,023	0,182	0,143	0,224	0,000	0,012	0,020
D2M2T1	A	17	General	6969892	382083	0,000	9,714	40,295	2,371	0,633	0,548	2,328	12,577		0,509	0,016	0,000		3,558	4,376		0,126	0,029	1,764	0,143	0,173	0,000	0,010	0,010
D2M2T1	A	18	Traza	6969892	382083	0,000	10,282	39,262	2,045	0,566	0,622	2,276	12,702	0,306		0,002	0,000	2,352			3,929	0,059	0,026	1,394	0,095	0,123	0,000	0,004	0,008
D2M3T1	A	19	Traza	6969936	382048	3,839	12,448	43,948	0,768	5,883	0,332	2,217	11,055	0,188		0,001	0,000	0,098			2,329	0,000	0,000	0,217	0,026	0,031	0,000	0,009	0,019
D2M4T1	A	20	Traza	6970014	382085	1,632	2,248	5,396	0,000	27,304	1,279	0,424	26,791	0,062		0,001	0,000	0,442			1,003	0,000	0,001	0,896	0,010	0,122	0,000	0,002	0,010
D2M4T1	A	21	General	6970014	382085	0,443	0,799	0,000	1,013	16,276	0,898	0,224	26,751		0,075	0,002	0,000		0,899	1,294		0,000	0,004	1,447	0,008	0,397	0,000	0,008	0,010
D2M5T1	A	22	General	6970170	382144	1,182	0,620	12,549	0,506	5,551	0,031	0,055	4,535		0,142	0,004	0,000		0,004	0,509		0,000	0,002	0,245	0,000	0,133	0,000	0,000	0,304
D2M5T1	A	23	Traza	6970170	382144	2,124	1,220	16,449	0,010	6,213	0,015	0,065	5,050	0,095		0,005	0,000	0,003			0,333	0,000	0,006	0,176	0,005	0,088	0,000	0,000	0,321
D2M5T1	B	24	Traza	6970170	382144	1,377	1,995	12,571	0,001	13,858	0,058	0,130	11,789	0,103		0,000	0,000	0,004			1,501	0,000	0,005	0,458	0,012	0,152	0,000	0,000	0,137
D2M6T1	A	25	Traza	6970163	382098	0,975	10,719	37,171	0,350	1,717	0,269	2,263	9,371	0,354		0,007	0,000	0,166			2,423	0,000	0,001	0,012	0,004	0,001	0,000	0,006	0,032
D2M7T1	A	26	Traza	6970058	382083	1,583	3,269	10,518	0,072	10,606	0,086	0,477	10,340	0,044		0,000	0,000	0,026			12,084	0,000	0,017	0,664	0,207	1,084	0,001	0,000	0,059
D2M7T1	A	27	General	6970058	382083	0,000	2,419	26,537	1,141	27,964	0,000	0,164	18,543	0,082		0,000	0,000	0,007			6,594	0,000	0,003	0,674	0,048	0,707	0,000	0,001	0,310
D2M7T2	A	28	Traza	6970058	382083	0,000	2,633	44,683	0,941	13,023	0,000	0,351	10,264	0,098		0,000	0,004	0,007			5,295	0,000	0,004	0,439	0,047	0,351	0,000	0,001	0,165
D2M7T2	A	29	General	6970058	382083	0,000	2,079	52,959	1,980	7,298	0,000	0,326	7,644		0,108	0,005	0,000		0,000	15,910		0,008	0,006	0,761	0,154	1,093	0,000	0,002	0,208
D2M8T1	A	30	Traza	6969551	381688	0,000	3,619	9,479	0,084	15,821	0,189	1,862	26,397	0,149		0,010	0,000	1,914			3,990	0,134	0,021	3,020	0,067	0,682	0,001	0,003	0,012
D2M9T1	A	31	General	6969484	381646	0,545	3,430	15,954	0,872	17,524	0,037	0,880	13,288		0,459	0,009	0,000		0,080	7,821		0,012	0,012	0,075	0,069	1,467	0,001	0,018	0,007
D2M9T2	A	32	General	6969484	381646	5,590	0,383	0,000	0,476	9,918	0,058	0,000	17,961		0,031	0,002	0,000		0,283	9,698		0,000	0,003	0,041	0,003	0,467	0,000	0,000	0,004
D2M9T2	A	33	Traza	6969484	381646	7,752	1,226	1,556	0,000	13,213	0,067	0,004	18,746	0,017		0,000	0,000	0,180			7,107	0,000	0,006	0,032	0,007	0,224	0,000	0,000	0,004
D3M2T1	A	34	Traza	6969481	381935	10,640	16,333	39,110	0,344	11,905	0,058	1,929	14,126	0,139		0,000	0,000	0,017			5,872	0,000	0,000	0,005	0,004	0,002	0,000	0,003	0,008
D3M2T2	B	35	Traza	6969481	381935	3,399	3,102	6,262	0,125	36,593	0,000	0,498	25,037	0,058		0,000	0,000	0,009			2,473	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,006
D3M2T3	C	36	Traza	6969481	381935	2,041	1,018	3,981	0,000	6,238	0,044	0,159	5,094	0,039		0,001	0,000	0,013			0,736	0,000	0,008	0,006	0,005	0,001	0,000	0,003	0,005
D3M2T3	D	37	Traza	6969481	381935	2,246	3,725	9,423	0,000	24,143	0,000	0,444	18,638	0,056		0,000	0,000	0,008			2,795	0,000	0,001	0,003	0,002	0,000	0,000	0,003	0,007

Tabla 10: 37 primeros análisis, con datos de concentraciones hasta el elemento U.

Codigo	Zona	Analisis	Tipo	Norte	Este	Y	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
D1M1T1	A	1	General	6969643	381640	0,002	0,007	0,000	0,003			0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D1M1T2	A	2	Traza	6969643	381640	0,001	0,006	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D1M1T2	B	3	Traza	6969643	381640	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D1M3T5	C	4	Traza	6969595	381826	0,000	0,181	0,000	0,596			0,000	0,448	0,032	0,000	1,100	0,000	0,000	0,000	1,689	0,000	0,000	0,000	0,007	0,550	100,000	0,000	0,000	0,181
D1M3T1	A	5	Traza	6969595	381826	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000		0,015	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,139	0,000	0,000	0,000
D1M3T2	A	6	Traza	6969595	381826	0,001	0,001	0,000	0,005	0,000	0,000	0,002	0,012	0,000	0,085	0,000	0,044	0,000	0,003	0,000	0,005	0,010	0,000	0,000	0,003	0,081	0,000	0,000	0,000
D1M3T2	A	7	General	6969595	381826	0,001	0,000	0,000	0,006		0,000	0,000	0,008	0,003	0,163	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,002	0,000	0,000	0,000	0,038	0,000	0,000	0,000
D1M3T2	B	8	Traza	6969595	381826	0,002	0,005	0,000	0,000		0,000	0,009	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,017	0,000
D1M3T3	A	9	Traza	6969595	381826	0,001	0,002	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,114	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,003	0,008	0,000	0,000	0,000	0,162	0,000	0,000	0,001
D1M3T4	A	10	Traza	6969595	381826	0,000	0,001	0,000	0,003	0,000		0,025	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000
D1M3T4	B	11	Traza	6969595	381826	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,057	0,000	0,000	0,000
D1M4T1	A	12	Traza	6969528	381923	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
D1M4T1	B	13	Traza	6969528	381923	0,000	0,003	0,000	0,001		0,000	0,002	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000
D1M4T2	A	14	Traza	6969528	381923	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M1T1	A	15	Traza	6969852	382005	0,001	0,005	0,000	0,003	0,000		0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,214	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M1T1	A	16	General	6969852	382005	0,003	0,002	0,000	0,013			0,000	0,000	0,030	0,000	0,000	0,000	0,093	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M2T1	A	17	General	6969892	382083	0,006	0,007	0,000	0,002			0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M2T1	A	18	Traza	6969892	382083	0,005	0,005	0,000	0,003		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000
D2M3T1	A	19	Traza	6969936	382048	0,001	0,006	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M4T1	A	20	Traza	6970014	382085	0,001	0,003	0,000	0,002	0,000		0,000	0,002	0,000	0,027	0,000	0,000		0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M4T1	A	21	General	6970014	382085	0,004	0,001	0,000	0,005		0,000	0,000	0,005	0,014	0,131	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M5T1	A	22	General	6970170	382144	0,001	0,000	0,000	0,128	0,000		0,000	0,000	0,009	0,510	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,096	0,000	0,008	0,000	0,000
D2M5T1	A	23	Traza	6970170	382144	0,001	0,032	0,000	0,070	0,000		0,004	0,000	0,000	0,205	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,164	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M5T1	B	24	Traza	6970170	382144	0,000	0,014	0,000	0,246	0,000		0,017	0,001	0,000	0,969	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,001	0,078	0,000	0,000	0,000
D2M6T1	A	25	Traza	6970163	382098	0,002	0,015	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M7T1	A	26	Traza	6970058	382083	0,000	0,010	0,000	0,103	0,000		0,000	0,028	0,000	0,082	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M7T1	A	27	General	6970058	382083	0,000	0,030	0,000	0,015		0,000	0,003	0,003	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,001	0,001	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,006
D2M7T2	A	28	Traza	6970058	382083	0,000	0,018	0,000	0,015	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000		0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,005
D2M7T2	A	29	General	6970058	382083	0,001	0,000	0,000	0,039		0,000	0,004	0,005	0,000	0,064	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,010	0,000	0,007	0,004	0,004
D2M8T1	A	30	Traza	6969551	381688	0,001	0,004	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,000	0,084	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
D2M9T1	A	31	General	6969484	381646	0,002	0,011	0,000	0,004		0,000	0,000	0,000	0,000	0,103	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000	0,002
D2M9T2	A	32	General	6969484	381646	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,005	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,046	0,000	0,000	0,000
D2M9T2	A	33	Traza	6969484	381646	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M2T1	A	34	Traza	6969481	381935	0,001	0,005	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M2T2	B	35	Traza	6969481	381935	0,001	0,002	0,000	0,000			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M2T3	C	36	Traza	6969481	381935	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M2T3	D	37	Traza	6969481	381935	0,001	0,004	0,000	0,000			0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 11: Análisis números 38 al 74, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.

Codigo	Zona	Análisis	Tipo	Norte	Este	MgO	AL2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti	TiO2	V	Cr	Mn	MnO	Fe2O3	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr
D3M4T1	A	38	Traza	6969647	381637	2,523	7,849	32,044	0,085	0,118	0,194	0,256	7,535	0,254	0,020	0,000	0,148			6,989	0,000	0,003	0,004	0,009	0,011	0,000	0,001	0,015	
D3M4T1	B	39	Traza	6969647	381637	3,597	5,707	21,730	0,120	0,115	0,098	0,524	13,262	0,198	0,010	0,000	0,030			2,601	0,000	0,001	0,004	0,002	0,000	0,000	0,004	0,031	
D3M6T1	A	40	Traza	6969556	381604	1,566	2,675	9,841	0,227	5,123	5,182	0,254	12,881	0,048	0,004	0,003	0,047			0,407	0,002	0,119	52,309	0,000	0,003	0,000	0,002	0,005	
D3M6T1	B	41	Traza	6969556	381604	1,703	4,153	22,034	0,091	0,093	4,393	0,890	6,126	0,319	0,000	0,000	0,079			0,638	0,000	0,021	12,465	0,000	0,003	0,000	0,006	0,008	
D3M6T1	C	42	Traza	6969556	381604	0,000	3,688	16,349	0,000	11,102	3,438	0,867	8,711	0,507	0,000	0,000	1,099			3,353	0,000	0,025	12,440	0,000	0,007	0,000	0,007	0,010	
D3M7T1	A	43	Traza	6969556	381604	5,006	5,153	27,358	1,343	2,242	2,600	0,333	39,699	0,054	0,000	0,000	0,129			6,376	0,000	0,003	0,011	0,004	0,038	0,000	0,000	0,012	
D3M7T1	B	44	Traza	6969556	381604	4,026	2,096	12,761	0,995	0,186	3,612	0,000	25,794	0,039	0,000	0,000	0,121			2,415	0,000	0,006	0,008	0,004	0,014	0,000	0,000	0,013	
D5M1T1	A	45	Traza	6969744	381694	2,545	4,565	19,561	0,000	16,905	0,597	1,361	12,388	0,063	0,000	0,000	0,006			2,378	0,000	0,000	0,007	0,002	0,001	0,000	0,011	0,009	
D5M1T2	A	46	Traza	6969744	381694	2,390	0,349	1,443	0,000	8,213	0,061	0,000	6,404	0,006	0,000	0,000	0,006			0,092	0,000	0,015	0,006	0,003	0,001	0,000	0,000	0,007	
D6M1T1	A	47	Traza	6969595	381831	2,089	0,493	0,463	0,253	0,000	0,084	0,000	18,018	0,014	0,000	0,000	0,049			0,116	0,000	0,012	0,453	0,096	0,034	0,000	0,000	0,005	
D6M1T2	B	48	Traza	6969595	381831	2,132	24,039	45,166	0,085	0,483	0,179	4,903	3,641	0,211	0,004	0,000	0,006			1,329	0,000	0,000	0,021	0,022	0,012	0,000	0,016	0,004	
D6M1T3	C	49	Traza	6969595	381831	0,000	3,070	8,902	0,073	0,450	8,847	0,434	0,988	0,055	0,007	0,006	0,011			0,213	0,014	0,368	95,948	6,305	0,205	0,000	0,000	0,000	
D6M1T4	D	50	Traza	6969595	381831	1,289	1,296	18,636	0,000	0,016	3,212	0,232	0,479	0,059	0,000	0,000	0,000			0,105	0,000	0,067	19,434	0,864	0,071	0,000	0,090	0,008	
D5M2T1	A	51	Traza	6969253	382967	8,119	11,827	31,735	0,531	0,220	0,207	1,138	19,451	0,337	0,014	0,000	0,019			4,981	0,000	0,001	0,005	0,008	0,006	0,000	0,003	0,009	
D6M2T1	A	52	Traza	6969694	381613	2,797	4,199	19,390	0,000	2,068	0,080	0,962	2,987	0,251	0,004	0,000	0,022			2,144	0,000	0,005	0,005	0,009	0,001	0,000	0,003	0,012	
D6M4T1	A	53	Traza	6969555	381606	2,294	2,893	7,697	0,000	11,877	0,255	0,483	14,195	0,091	0,003	0,000	0,005			0,486	0,000	0,002	0,006	0,001	0,000	0,000	0,001	0,021	
D6M4T2	B	54	Traza	6969555	381606	2,043	5,394	13,446	0,000	5,958	0,311	1,790	10,615	0,220	0,006	0,000	0,014			1,656	0,000	0,001	0,014	0,002	0,001	0,000	0,012	0,013	
D6M5T1	A	55	Traza	6969786	382013	1,837	2,779	15,098	3,528	8,528	0,052	0,330	10,355	0,051	0,003	0,000	0,026			15,138	0,000	0,006	0,987	0,112	0,257	0,000	0,003	0,095	
D6M5T1	B	56	Traza	6969786	382013	4,965	3,635	18,141	18,675	0,000	0,156	0,363	35,485	0,101	0,018	0,005	0,006			4,588	0,014	0,001	3,948	0,059	0,818	0,001	0,004	0,052	
D6M5T1	C	57	Traza	6969786	382013	0,619	12,228	72,821	7,968	0,000	0,018	1,513	7,023	0,306	0,002	0,003	0,004			1,586	0,000	0,000	0,202	0,023	0,187	0,000	0,005	0,272	
D6M5T2	D	58	Traza	6969786	382013	0,000	2,746	27,194	9,950	0,120	0,049	0,099	23,635	0,054	0,000	0,000	0,005			1,050	0,000	0,002	3,251	0,048	0,132	0,000	0,003	0,156	
D6M6T1	A	59	Traza	6969524	381948	0,000	9,730	23,538	0,888	8,788	0,115	2,504	23,071	0,368	0,007	0,000	1,073			1,200	0,036	0,003	1,435	0,092	0,105	0,000	0,003	0,009	
D7M1T1	A	60	Traza	6969767	381783	2,608	4,653	12,927	0,000	1,018	1,055	0,912	7,006	0,447	0,023	0,000	5,663			0,935	0,002	0,004	0,177	0,018	0,032	0,000	0,004	0,019	
D7M1T2	B	61	Traza	6969767	381783	2,168	5,140	15,151	0,313	0,499	1,326	0,777	23,990	0,514	0,007	0,000	1,015			7,859	0,000	0,003	0,099	0,004	0,021	0,000	0,001	0,039	
D7M2T1	A	62	Traza	6969806	381934	2,255	0,460	0,000	0,116	0,138	0,111	0,000	18,959	0,006	0,000	0,000	3,051			10,288	0,000	0,003	0,019	0,003	0,027	0,000	0,000	0,024	
D7M3T1	A	63	Traza	6969820	381856	0,000	7,584	25,662	0,000	5,650	0,049	0,905	7,423	0,391	0,014	0,000	0,061			1,888	0,000	0,001	0,061	0,010	0,014	0,000	0,002	0,004	
D7M6T1	A	64	Traza	6969668	382150	0,000	10,153	47,955	1,451	7,774	0,228	0,777	12,742	0,163	0,003	0,003	0,259			1,668	0,000	0,001	0,072	0,013	0,008	0,000	0,001	0,011	
D7M8T1	A	65	Traza	6969555	382196	0,000	16,578	34,538	0,286	0,129	0,177	3,883	20,245	0,481	0,026	0,000	0,067			2,452	0,000	0,000	0,012	0,002	0,003	0,000	0,015	0,003	
D7M8T2	B	66	Traza	6969555	382196	3,793	20,148	43,178	0,131	0,067	0,187	4,478	9,205	0,320	0,022	0,000	0,307			1,537	0,000	0,000	0,013	0,001	0,002	0,000	0,013	0,006	
D7M10T1	A	67	Traza	6969397	382179	1,576	11,576	35,396	0,230	15,091	0,508	1,545	16,608	0,258	0,005	0,000	0,049			1,812	0,000	0,000	0,027	0,002	0,015	0,000	0,005	0,012	
D7M10T2	B	68	Traza	6969397	382179	1,355	1,798	4,986	0,000	15,715	0,086	0,224	16,560	0,050	0,000	0,000	0,102			0,399	0,000	0,002	0,018	0,002	0,004	0,000	0,002	0,011	
D7M10T2	C	69	Traza	6969397	382179	0,000	3,591	7,833	0,000	9,218	0,085	0,560	8,224	0,199	0,009	0,000	0,013			0,486	0,000	0,002	0,010	0,001	0,004	0,000	0,005	0,007	
D7M10T3	D	70	Traza	6969397	382179	2,393	3,324	6,900	0,108	2,889	0,112	0,422	26,343	0,165	0,003	0,000	0,567			0,646	0,000	0,003	0,121	0,002	0,010	0,000	0,003	0,015	
D7M10T4	A	71	Traza	6969397	382179	1,431	2,396	8,159	0,000	3,066	0,104	0,741	3,133	0,171	0,000	0,000	0,006			1,068	0,000	0,010	0,004	0,002	0,001	0,000	0,008	0,018	
D7M10T5	B	72	Traza	6969397	382179	3,468	9,522	30,723	0,781	0,673	0,272	1,310	19,409	0,577	0,009	0,000	0,060			3,226	0,000	0,002	0,010	0,006	0,003	0,000	0,003	0,028	
D7M11T1	A	73	Traza	6969323	382171	1,772	2,425	5,703	0,380	5,899	0,097	0,000	55,180	0,061	0,027	0,000	0,729			2,852	0,000	0,000	0,007	0,004	0,002	0,000	0,000	0,011	
D7M11T2	B	74	Traza	6969323	382171	0,000	10,091	37,815	0,262	0,393	0,135	3,367	9,480	0,433	0,008	0,000	0,032			1,201	0,000	0,000	0,011	0,001	0,001	0,000	0,021	0,004	

Tabla 12: Análisis números 38 al 74, con datos de concentraciones hasta el elemento U.

Codigo	Zona	Analisis	Tipo	Norte	Este	Y	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
D3M4T1	A	38	Traza	6969647	381637	0,002	0,008	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M4T1	B	39	Traza	6969647	381637	0,002	0,010	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M6T1	A	40	Traza	6969556	381604	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,133	0,018
D3M6T1	B	41	Traza	6969556	381604	0,003	0,010	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000
D3M6T1	C	42	Traza	6969556	381604	0,002	0,010	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,016	0,000
D3M7T1	A	43	Traza	6969556	381604	0,000	0,004	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D3M7T1	B	44	Traza	6969556	381604	0,000	0,004	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
D5M1T1	A	45	Traza	6969744	381694	0,001	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D5M1T2	A	46	Traza	6969744	381694	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D6M1T1	A	47	Traza	6969595	381831	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000		0,000	0,020	0,006	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,362	0,000	0,000	0,000
D6M1T2	B	48	Traza	6969595	381831	0,001	0,013	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,009	0,000	0,000	0,000
D6M1T3	C	49	Traza	6969595	381831	0,000	0,007	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,070	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,894	0,000	0,516	0,050
D6M1T4	D	50	Traza	6969595	381831	0,000	0,003	0,000	0,076	0,000		1,219	0,003	0,000	0,026	0,878	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,906	0,003	0,034	0,000
D5M2T1	A	51	Traza	6969253	382967	0,002	0,009	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D6M2T1	A	52	Traza	6969694	381613	0,001	0,007	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,011	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
D6M4T1	A	53	Traza	6969555	381606	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D6M4T2	B	54	Traza	6969555	381606	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D6M5T1	A	55	Traza	6969786	382013	0,000	0,015	0,000	0,005	0,000		0,002	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
D6M5T1	B	56	Traza	6969786	382013	0,001	0,012	0,000	0,005		0,000	0,006	0,000	0,000	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
D6M5T1	C	57	Traza	6969786	382013	0,002	0,031	0,000	0,000		0,000	0,004	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
D6M5T2	D	58	Traza	6969786	382013	0,001	0,019	0,000	0,001	0,000		0,004	0,001	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000
D6M6T1	A	59	Traza	6969524	381948	0,003	0,002	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M1T1	A	60	Traza	6969767	381783	0,001	0,008	0,000	0,005	0,000		0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
D7M1T2	B	61	Traza	6969767	381783	0,002	0,007	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,010	0,000	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
D7M2T1	A	62	Traza	6969806	381934	0,000	0,003	0,000	0,008	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M3T1	A	63	Traza	6969820	381856	0,001	0,008	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
D7M6T1	A	64	Traza	6969668	382150	0,000	0,003	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
D7M8T1	A	65	Traza	6969555	382196	0,001	0,006	0,000	0,000			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M8T2	B	66	Traza	6969555	382196	0,001	0,006	0,000	0,001		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M10T1	A	67	Traza	6969397	382179	0,001	0,003	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,035	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M10T2	B	68	Traza	6969397	382179	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000		0,000	0,002	0,000	0,000	0,029	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
D7M10T2	C	69	Traza	6969397	382179	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M10T3	D	70	Traza	6969397	382179	0,002	0,004	0,000	0,003	0,000		0,000	0,000	0,008	0,000	0,044	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
D7M10T4	A	71	Traza	6969397	382179	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M10T5	B	72	Traza	6969397	382179	0,002	0,009	0,000	0,001			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
D7M11T1	A	73	Traza	6969323	382171	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M11T2	B	74	Traza	6969323	382171	0,002	0,007	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 13: Análisis números 75 al 110, con datos de concentraciones hasta el elemento Sr.

Codigo	Zona	Analisis	Tipo	Norte	Este	MgO	AL2O3	SiO2	P2O5	S	Cl	K2O	CaO	Ti	TiO2	V	Cr	Mn	MnO	Fe2O3	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr
D7M14T1	A	75	Traza	6969254	381989	2,329	7,620	39,775	0,235	0,341	0,119	2,704	16,959	0,081		0,000	0,000	0,005			2,784	0,000	0,000	0,011	0,001	0,001	0,000	0,006	0,004
D7M14T1	B	76	Traza	6969254	381989	2,385	5,737	26,121	0,195	0,552	0,061	0,562	21,383	0,216		0,003	0,000	0,089			1,732	0,000	0,000	0,024	0,002	0,001	0,000	0,002	0,011
D7M14T2	C	77	Traza	6969254	381989	9,205	15,326	74,748	0,013	0,217	0,204	6,639	0,679	0,073		0,004	0,004	0,011			5,180	0,000	0,000	0,014	0,002	0,001	0,000	0,020	0,002
D7M15T1	A	78	Traza	6969310	381990	1,776	5,981	11,507	0,555	0,799	0,108	0,146	52,857	0,044		0,004	0,000	1,290			4,895	0,067	0,004	0,008	0,001	0,010	0,000	0,000	0,012
D7M15T1	B	79	Traza	6969310	381990	2,335	6,157	9,749	0,343	0,791	0,065	0,126	33,334	0,152		0,021	0,000	0,849			12,776	0,000	0,004	0,005	0,001	0,018	0,000	0,002	0,012
D7M15T2	C	80	Traza	6969310	381990	1,914	2,347	6,716	0,502	0,563	0,346	0,123	29,986	0,077		0,004	0,000	0,105			5,852	0,000	0,003	0,016	0,005	0,004	0,000	0,002	0,019
D7M16T1	A	81	Traza	6969670	381950	5,017	7,333	42,972	0,335	1,139	0,449	1,901	8,832	0,231		0,004	0,000	1,887			1,538	0,048	0,008	0,090	0,283	0,128	0,000	0,005	0,009
D7M16T2	B	82	Traza	6969670	381950	1,298	10,646	34,608	0,342	0,807	0,376	2,445	14,195	0,226		0,006	0,000	2,033			2,026	0,016	0,005	0,103	0,248	0,122	0,000	0,005	0,011
D8M4T1	A	83	Traza	6969783	382368	0,000	4,697	32,376	0,169	5,038	0,084	0,755	3,661	0,267		0,007	0,000	0,039			5,408	0,000	0,003	0,007	0,020	0,026	0,000	0,002	0,006
D8M3T1	A	84	Traza	6969275	381766	2,582	1,464	5,983	0,000	7,235	0,093	0,122	11,358	0,066		0,000	0,000	0,012			0,468	0,000	0,007	0,005	0,009	0,002	0,000	0,002	0,015
D9M1T1	A	85	traza	6969595	381826	0,000	2,042	12,150	0,106	1,044	0,206	0,326	1,744	0,010		0,000	0,000	0,041			21,359	0,000	0,024	0,299	0,196	1,231	0,005	0,000	0,000
D9M2T1	A	86	traza	6969595	381826	2,009	1,644	18,947	0,352	0,240	0,197	0,387	13,852	0,113		0,001	0,000	0,404			0,782	0,111	0,020	0,266	0,337	0,139	0,000	0,003	0,003
D9M3T1	A	87	traza	6969595	381826	0,000	3,113	37,366	0,532	0,976	0,165	1,049	7,022	0,207		0,000	0,000	0,576			0,400	0,000	0,005	0,303	0,300	0,048	0,000	0,003	0,004
D9M4T1	A	88	traza	6969595	381826	1,486	1,461	5,293	0,589	0,248	0,220	0,000	49,021	0,032		0,000	0,000	0,281			0,348	0,013	0,000	1,329	0,077	0,033	0,000	0,001	0,010
D9M5T1	A	89	traza	6969595	381826	0,000	2,447	10,415	0,017	1,660	0,244	0,359	1,488	0,011		0,000	0,000	0,058			30,799	0,000	0,023	0,586	0,207	0,868	0,002	0,004	0,000
D9M6T1	A	90	traza	6969595	381826	5,223	0,610	0,000	0,179	0,162	0,069	0,000	15,974	0,006		0,000	0,000	0,252			3,253	0,000	0,009	0,170	0,003	0,016	0,000	0,000	0,010
D9M7T1	A	91	traza	6969595	381826	1,970	1,741	8,923	0,047	0,361	0,078	0,263	2,596	0,032		0,000	0,000	0,090			10,096	0,000	0,012	0,295	0,173	0,227	0,000	0,003	0,002
D9M8T1	A	92	traza	6969643	381640	2,124	1,908	28,246	0,004	1,033	0,044	0,448	0,951	0,097		0,000	0,000	0,055			8,327	0,000	0,023	0,415	0,006	0,002	0,000	0,003	0,000
D9M8T1	B	93	traza	6969643	381640	1,699	6,980	20,949	2,711	3,066	0,059	1,227	5,566	0,204		0,044	0,000	0,153			39,360	0,237	0,082	2,776	0,005	0,000	0,000	0,012	0,000
D9M9T1	A	94	traza	6969643	381640	0,000	1,640	5,505	0,652	33,468	1,370	0,097	0,492	0,000		0,000	0,000	0,015			26,012	0,192	0,205	93,028	0,000	0,006	0,011	0,004	0,000
D9M9T1	B	95	traza	6969643	381640	2,453	5,262	12,800	0,524	29,155	0,780	0,554	4,267	0,083		0,000	0,000	0,055			39,104	0,329	0,089	13,187	0,034	0,012	0,003	0,006	0,000
D9M10T1	A	96	traza	6969643	381640	3,660	1,486	3,149	0,672	41,005	0,069	0,110	3,950	0,000		0,000	0,000	0,064			29,787	0,000	0,073	57,872	1,134	2,051	0,000	0,000	0,000
D9M10T1	B	97	traza	6969643	381640	8,818	2,899	9,151	0,280	2,670	0,187	0,271	29,979	0,053		0,000	0,001	0,854			8,076	0,000	0,000	1,074	0,005	0,010	0,000	0,000	0,003
D9M11T1	A	98	traza	6969643	381640	8,574	1,885	3,721	0,086	17,386	0,105	0,148	14,255	0,000		0,000	0,000	0,269			14,119	0,000	0,024	15,668	0,102	0,268	0,000	0,000	0,004
D9M11T1	B	99	traza	6969643	381640	3,821	11,935	34,189	0,823	13,712	0,124	1,381	6,907	0,426		0,000	0,000	0,085			11,009	0,139	0,125	21,140	0,563	3,479	0,005	0,004	0,006
D9M11T1	C	100	traza	6969643	381640	3,648	3,542	15,337	0,231	6,836	0,113	0,664	20,067	0,101		0,000	0,000	0,354			8,225	0,000	0,017	5,363	0,072	0,683	0,000	0,003	0,007
D9M12T1	A	101	traza	6969595	381826	0,000	2,094	44,965	0,347	0,190	0,150	0,182	29,368	0,016		0,000	0,003	0,422			1,397	0,048	0,010	0,460	0,344	0,293	0,000	0,000	0,007
D9M12T1	B	102	traza	6969595	381826	0,873	2,840	35,860	0,263	0,083	0,151	0,699	4,522	0,076		0,005	0,000	0,020			0,493	0,000	0,004	0,087	0,141	0,013	0,000	0,002	0,003
D10M1T1	A	103	traza	6969643	381640	0,000	3,368	38,553	2,506	28,285	0,192	0,165	4,476	0,040		0,002	0,000	0,079			33,716	0,064	0,099	17,970	0,000	0,020	0,002	0,002	0,000
D10M1T1	B	104	traza	6969643	381640	1,767	5,191	35,069	0,094	2,468	0,099	0,765	1,191	0,044		0,047	0,000	0,123			35,838	0,209	0,051	1,163	0,004	0,000	0,000	0,012	0,000
D10M2T1	A	105	traza	6969643	381640	2,890	4,076	16,776	0,000	0,704	0,066	0,497	0,620	0,112		0,049	0,000	0,129			36,289	0,041	0,065	0,259	0,008	0,000	0,000	0,019	0,000
D10M3T1	A	106	traza	6969643	381640	0,000	8,463	22,012	0,696	1,667	0,049	1,532	11,636	0,174		0,000	0,000	0,263			8,684	0,000	0,004	0,024	0,016	0,069	0,000	0,003	0,007
D10M4T1	A	107	traza	6969643	381640	0,000	1,392	11,977	0,444	0,000	0,163	0,033	34,293	0,035		0,000	0,000	0,250			0,610	0,046	0,013	15,500	0,535	0,768	0,007	0,002	0,011
D10M5T1	A	108	traza	6969595	381826	2,777	0,632	12,018	0,000	0,000	0,391	0,119	0,476	0,011		0,000	0,000	0,023			5,832	0,000	0,107	24,264	2,312	0,796	0,000	0,000	0,002
D10M6T1	A	109	traza	6969595	381826	0,000	2,290	41,721	0,302	0,045	0,699	0,603	3,961	0,091		0,002	0,000	0,068			2,452	0,000	0,027	15,043	0,970	0,232	0,000	0,003	0,003
D10M6T1	B	110	traza	6969595	381826	0,000	3,846	51,170	1,245	0,319	0,056	0,783	27,960	0,151		0,000	0,006	0,397			1,196	0,033	0,005	0,877	0,211	0,125	0,000	0,002	0,004

Tabla 14: Análisis números 75 al 110, con datos de concentraciones hasta el elemento U.

Codigo	Zona	Analisis	Tipo	Norte	Este	Y	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
D7M14T1	A	75	Traza	6969254	381989	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M14T1	B	76	Traza	6969254	381989	0,002	0,012	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M14T2	C	77	Traza	6969254	381989	0,000	0,007	0,000	0,001		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M15T1	A	78	Traza	6969310	381990	0,001	0,002	0,000	0,003	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
D7M15T1	B	79	Traza	6969310	381990	0,001	0,005	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
D7M15T2	C	80	Traza	6969310	381990	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D7M16T1	A	81	Traza	6969670	381950	0,000	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,234	0,000	0,000	0,000
D7M16T2	B	82	Traza	6969670	381950	0,001	0,004	0,000	0,002	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,164	0,000	0,000	0,000
D8M4T1	A	83	Traza	6969783	382368	0,001	0,005	0,000	0,001	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
D8M3T1	A	84	Traza	6969275	381766	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D9M1T1	A	85	traza	6969595	381826	0,000	0,006	0,000	0,130	0,000		0,001	0,003	0,000	0,100	0,000	0,000	0,000	0,004	0,018	0,000	0,000	0,000	0,011	0,009	2,419	0,000	0,000	0,000
D9M2T1	A	86	traza	6969595	381826	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000		0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,484	0,000	0,000	0,000
D9M3T1	A	87	traza	6969595	381826	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000		0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,229	0,000	0,000	0,000
D9M4T1	A	88	traza	6969595	381826	0,001	0,002	0,000	0,002	0,000		0,000	0,005	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,447	0,000	0,000	0,000
D9M5T1	A	89	traza	6969595	381826	0,000	0,007	0,000	0,148	0,000		0,000	0,000	0,000	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,004	0,000	0,012	0,007	1,505	0,000	0,000	0,054
D9M6T1	A	90	traza	6969595	381826	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
D9M7T1	A	91	traza	6969595	381826	0,002	0,004	0,000	0,034	0,000		0,004	0,002	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,247	0,000	0,000	0,000
D9M8T1	A	92	traza	6969643	381640	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000		0,000	0,002	0,007	0,000	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D9M8T1	B	93	traza	6969643	381640	0,002	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,072	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,023	0,000	0,000
D9M9T1	A	94	traza	6969643	381640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,158	0,000
D9M9T1	B	95	traza	6969643	381640	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,006	0,000	0,000
D9M10T1	A	96	traza	6969643	381640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,099	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,054	0,000
D9M10T1	B	97	traza	6969643	381640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D9M11T1	A	98	traza	6969643	381640	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,082	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
D9M11T1	B	99	traza	6969643	381640	0,000	0,007	0,000	0,009	0,000		0,008	0,001	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000	0,072	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,001	0,028	0,000	0,009	0,000
D9M11T1	C	100	traza	6969643	381640	0,002	0,003	0,000	0,007	0,000		0,000	0,000	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
D9M12T1	A	101	traza	6969595	381826	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	1,139	0,000	0,000	0,000
D9M12T1	B	102	traza	6969595	381826	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000		0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,062	0,001	0,000	0,000
D10M1T1	A	103	traza	6969643	381640	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,074	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000
D10M1T1	B	104	traza	6969643	381640	0,000	0,005	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,062	0,000		0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,023	0,000	0,000	0,000
D10M2T1	A	105	traza	6969643	381640	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,059	0,042	0,000	0,000	0,000
D10M3T1	A	106	traza	6969643	381640	0,001	0,003	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
D10M4T1	A	107	traza	6969643	381640	0,000	0,004	0,000	0,001	0,000		0,000	0,022	0,010	0,000	0,000	0,000		0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	2,966	0,000	0,007	0,000
D10M5T1	A	108	traza	6969595	381826	0,001	0,000	0,000	0,015	0,000		0,000	0,000	0,000	0,313	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,624	0,000	0,019	0,000	0,000
D10M6T1	A	109	traza	6969595	381826	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,027	0,000	0,000		0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,194	0,000	0,013	0,000	0,000
D10M6T1	B	110	traza	6969595	381826	0,001	0,005	0,000	0,005		0,000	0,011	0,006	0,000	0,012	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,307	0,000	0,000	0,000	0,000

2. FOTOGRAFÍAS LUPA TRINOCULAR.

Resultado preliminar de análisis cualitativo por medio de fluorescencia de rayos X, pistola XRF, S1TITAN. Enfocado en Cobalto y REE's, en muestras pertenecientes al distrito Sierra Ladrillos. Incluye fotografías macroscópicas y micrografías de las muestras de interés (Tabla 2).

DIMITI y T2: Calcilutitas pardo rojizas, asociada a la zona de óxidos, presenta calcita, siderita y óxidos de hierro, principalmente hematita, y magnetismo leve, reconocible en muestra de mano obtenida de la unidad Smt a unos 20 mt del contacto por falla y zona de falla con Vsa; el análisis XRF arroja concentraciones para ocurrencia de óxidos de Mg y Ti (2,3 y 0,656%) y arseniuro de cobalto en pequeñas concentraciones (Co-Ni-As; 80, 20 y 10 ppm). presenta contenido moderado en SiO_2 y P_2O_3 , junto a ocurrencia de Y de 10 a 30 ppm (Fig. 49).

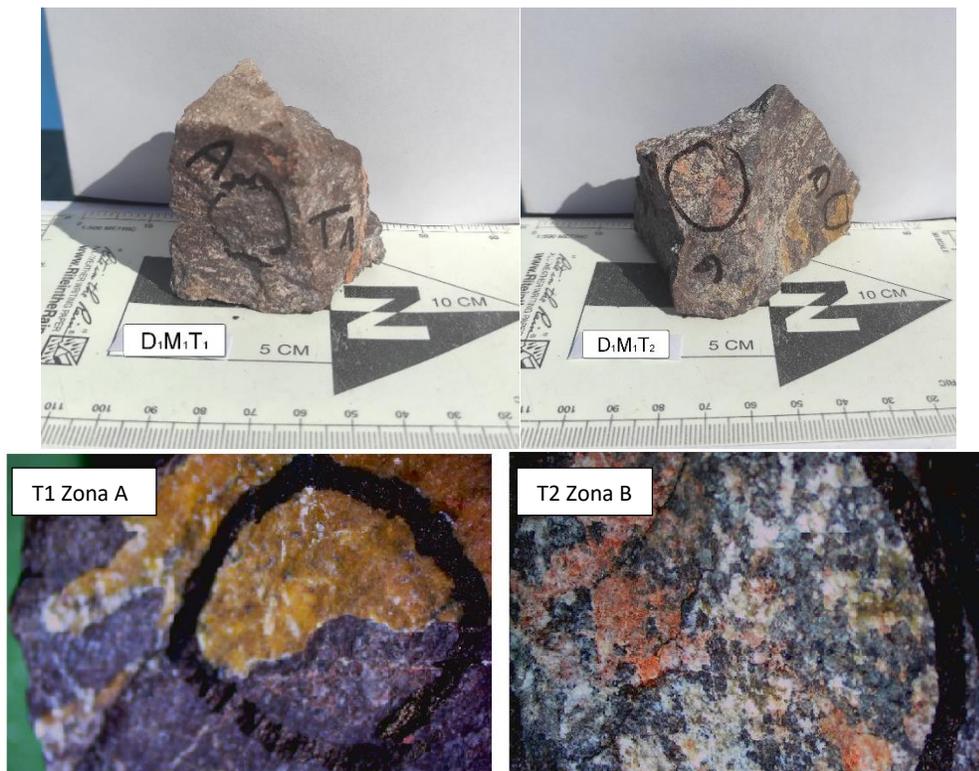


Figura 49: Muestra DIM1, trozos 1 y 2, con zonas de análisis demarcadas, abajo fotografías de lupa trinocular.

D2M3T1: Areniscas calcáreas de grano medio-gruesos, presenta minerales de calcita y anhídridos, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita y goethita, y magnetismo leve, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smta unos 20 mt al norte del límite norte de la propiedad minera (Fig. 50); entre los componentes arrojados por XRF, se presenta una concentración relativamente alta de SiO₂ (43,948%), junto a MgO, S, (~3,8 y 5,8% respectivo), y concentraciones traza de Ti, Zn, As, Sr, Y, Zr y Pb (1880, 210,30, 190, 10, 60 y 40 ppm respectivo).



Figura 50: Muestra D2M3, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.

D2M4T1: Areniscas calcáreas de grano medio-fino, asociada a la zona de óxidos, óxidos de Fe y óx. de Mn y Cu subordinados crisocola, chalcantita, principalmente hematita y goethita, presenta magnetismo leve, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smta unos 20 mt al norte del límite norte de la propiedad minera; entre los componentes arrojados por XRF, se presenta una concentración relativamente alta de S (~16 a 27%), junto a concentraciones traza de Ti, AS Y, Sb, Hf y Pb (~700, 2000, 40, 1000, 100 y 250 ppm respectivo) (Fig. 51).

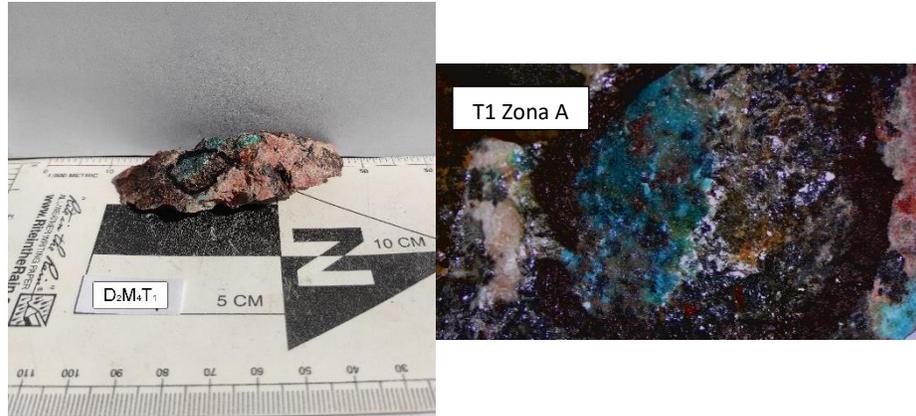


Figura 51: Muestra D2M4, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.

D2M6T1: Roca volcanosedimentaria basalto-andesítica, presenta óx. de Fe, hematita y jarosita, magnetismo medio, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Vsa, unos 10 mt al oeste del contacto por falla con Smt; entre los componentes analizados por XRF, presenta concentraciones traza de Ti, Sr e Y (3540, 320 y 20 ppm respectivo) (Fig. 52).

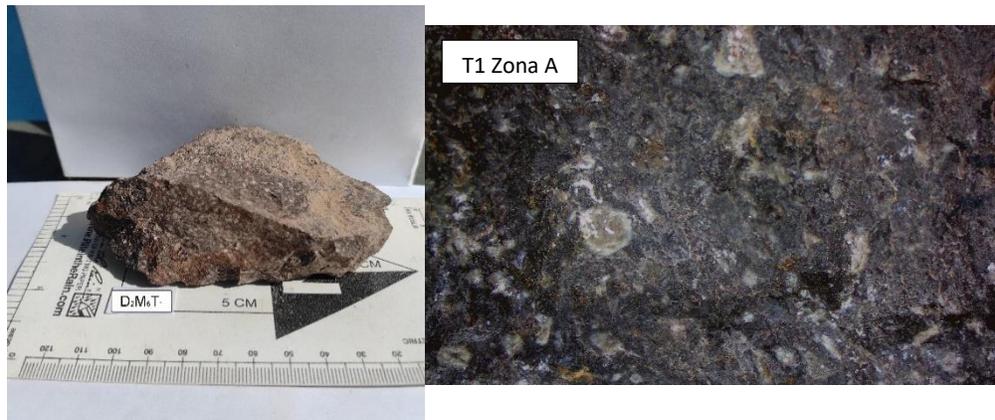


Figura 52: Muestra D2M6, trozo 1, foto de muestra y lupa trinocular.

D2M8T1 y T2: Muestra de Brecha hidrotermal cercano a contacto y zona de falla en trabajo minero unos 20 - 30 mt de profundidad, asociada a la zona de sulfuros con bajo contenido en óx. de Fe, principalmente hematita y jarosita, calcita hidrotermal en matriz y epidota, sulfuros de Fe y Cu subordinado, principalmente pirita, magnetita, calcopirita leve; a través del análisis XRF de modo geología general, entrega concentración de TiO_2 de 0,459%, presenta concentración traza de Cobalto e Y (120 y 20 ppm) y concentraciones asociadas de Sb, Pb y U (1030, 420 y 20 ppm respectivo) (Fig. 53).

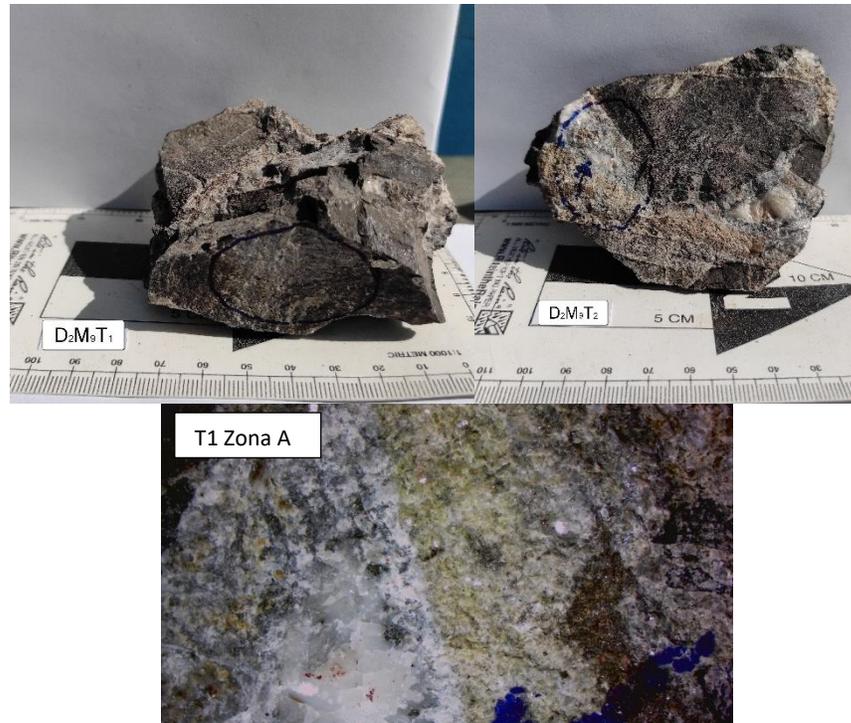


Figura 53: Muestra D2M9, trozo 1 y 2, foto de muestra y lupa trinocular T1.

D3M2T3: Muestras obtenidas de Zona oxidada, compuesta principalmente por sulfatos de calcio y óxidos de Fe, hematita y goethita; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Ti, Sr, Y y Ba (390 a 1390, 80, 10 y 240 a 330 ppm respectivamente) (Fig. 54).

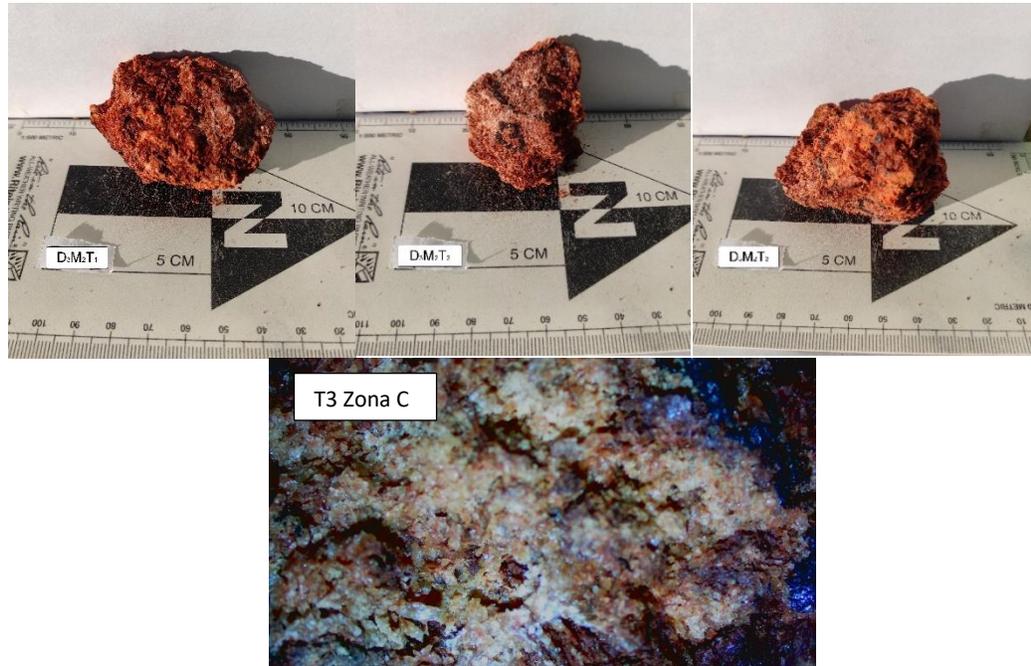


Figura 54: Muestra D3M2, trozo 1 al 3, foto de muestra y lupa trinocular T3.

D3M4T1: Muestras obtenidas de Zona de cizalle en contacto entre Smt y Vsa, clastos de roca volcánica y sedimentaria correspondientes, con fracturas rellenas con salbanda de falla, presenta mineralización de óx. de Fe (hematita) óx. de Mn leve y vetillas de Calcita y cuarzo subordinado; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Ti, V, Sr, Y, Sb (1980, 200 a 100, 310, 20 y 670 ppm respectivamente) (Fig. 55).



Figura 55: Muestra D3M4, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.

D3M6T1: Muestras obtenidas de Unidad Smt zona de mineralización oxidada, areniscas calcáreas de grano fino, alto contenido en minerales óx. de Fe (hematita) y Cu (Atacamita, crisocola), Ox de Mn subordinado; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Ti, Co, Ni, Sr, Y, Th, U (~3190, 20, 1190, 40 a 100, 30, 1330 y 180 ppm respectivamente) (Fig. 56).

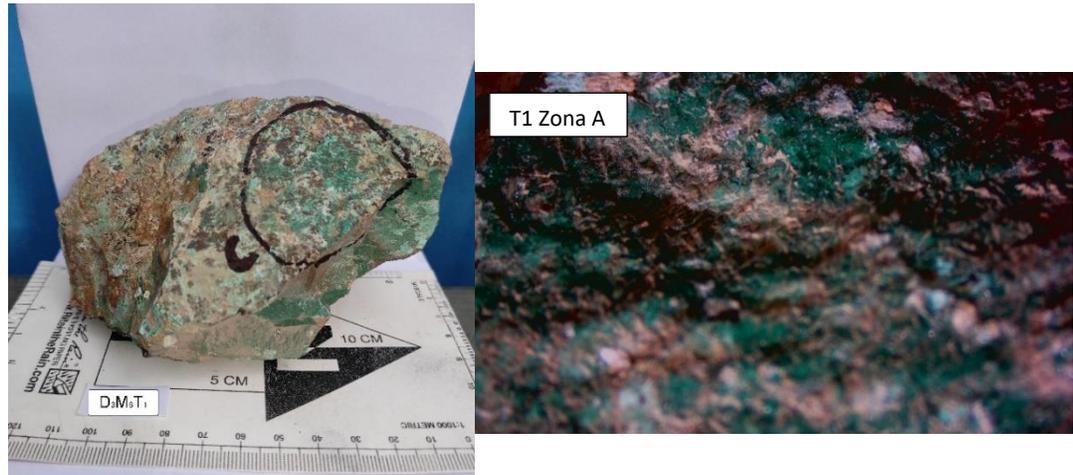


Figura 56: Muestra D3M6, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.

D6M2T1: Muestras obtenidas de Unidad Vsa zona oxidada, brecha volcánica con de matriz andesítica, clastos levemente cloritizados, presenta vetillas de calcita y óx. de Fe, hematita y jarosita, magnetismo medio; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Ti, Y, Sn, Ba y Pb (2510, 10, 110, 330 y 40 ppm respectivamente) (Fig. 57).



Figura 57: Muestra D6M2, trozo 1 foto de muestra y lupa trinocular.

D7MIT1 y T2: Areniscas calcáreas de grano medio-gruesos, asociada a la zona de óxidos, óxidos de hierro y óx. de Mn subordinados, principalmente hematita, jarosita y goethita subordinada, reconocible en muestra de mano obtenida en la unidad Smt; el análisis XRF arroja concentraciones traza de Ti, Co, Y y Pb (5140, 20, 20 y 50 ppm respectivamente) (Fig. 58).

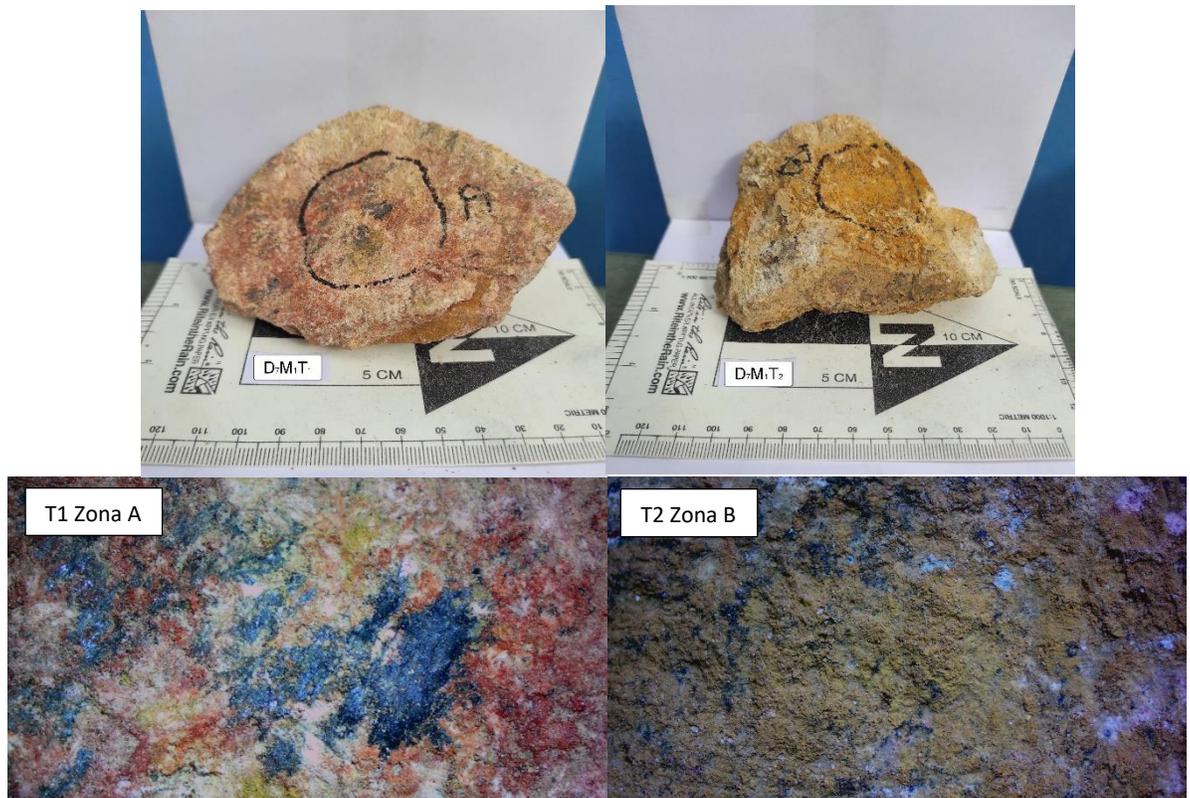


Figura 58: Muestra D7M1, trozo 1 y 2 foto de muestra de mano y lupa trinocular.

3. MAPA GEOLÓGICO MINA LA CHILENA.