



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELO GEOQUÍMICO Y DEFINICIÓN DEL CONTROL
DE LAS SOLUCIONES MINERALIZADORAS DEL PROYECTO
MARGARITA, INCA DE ORO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

IGNACIO ALEJANDRO OPAZO ORTEGA

Copiapó, Chile, 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELO GEOQUÍMICO Y DEFINICIÓN DEL CONTROL
DE LAS SOLUCIONES MINERALIZADORAS DEL PROYECTO
MARGARITA, INCA DE ORO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

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

Profesor guía Dr. Karl Riveros Jensen

IGNACIO ALEJANDRO OPAZO ORTEGA

Copiapó, Chile, 2022

*Al ponerle fecha a un sueño,
se convierte en meta.
Una meta dividida en pasos,
se convierte en plan.
Y un plan apoyado por acciones,
se convierte en REALIDAD.*

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue realizada gracias a la colaboración del equipo de geología de Torq Resources Chile, quienes fueron un gran apoyo tanto profesional como humano durante todos los meses de trabajo.

Agradezco a don Javier Rojas, quien sin conocerme me dio la oportunidad y la responsabilidad de llevar a cabo este trabajo en esta gran compañía que crece día a día y que me encuentro orgulloso de pertenecer y crecer junto a ella.

Quiero dar las gracias a mi padre Alejandro, por apoyarme, guiarme y acompañarme en cada decisión que he tomado; a mi madre Ana María que desde que tengo memoria me ha inculcado el valor del estudio.

A mis herman@s, abuel@s y toda mi familia que me han acompañado durante este largo viaje y que siempre serán un pilar fundamental en mi vida. A los que ya partieron, Choche y Coquí, estoy seguro de que en este momento están brindando en el oriente eterno llenos de alegría y orgullo.

A mi pareja Catalina, mi fiel compañera y apoyo incondicional durante cinco años y que con solo una sonrisa es capaz de llenarme el alma.

A los que comenzaron como compañer@s y que con el tiempo se fueron convirtiendo en amig@s y futuros colegas, gracias por las incontables horas de estudio y risas a lo largo de estos años, seguramente la geología nos volverá a juntar.

A mi querida Universidad de Atacama y al Área de Actividad Física y Deportes, por permitirme desarrollar mi pasión durante toda mi vida universitaria y poder representar el escudo minero en cuatro campeonatos nacionales universitarios de tenis, sin duda, sin el deporte no sería la persona que soy hoy.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
1.1 Contexto del problema de investigación.....	12
1.2 Ubicación y accesos	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Hipótesis	15
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	16
2.1 Depósitos magmático-hidrotermales.....	16
2.1.1 Componentes del sistema hidrotermal	17
2.1.2 Yacimientos tipo pórfido	17
2.1.3 Yacimientos tipo IOCG	20
2.2 Marco geológico regional	25
2.3 Geoquímica de exploración.....	26
2.4 Métodos de dispersión geoquímica.....	26
2.4.1 Dispersión hipógena o primaria	27
2.4.2 Dispersión supérgena o secundaria.....	27
2.5 Elemento target y elemento pathfinder.....	28
2.5.1 Elementos target.....	28
2.5.2 Elementos pathfinder	28
2.6 Análisis exploratorio de datos.....	29
2.6.1 Estadística univariable.....	31
2.6.2 Definición de background y threshold	34
2.6.3 Estadística multivariable.....	36
2.7 Cartografía geoquímica	41
2.7.1 Aplicación SIG.....	41
2.8 Fluorescencia de rayos X	43
2.8.1 Equipo portátil de fluorescencia de rayos X	45
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	47
3.1 Recopilación bibliográfica	47
3.2 Creación de base y estrategia de muestreo.....	47
3.3 Protocolo de muestreo	48
3.4 Campaña de recolección de muestras.....	49

3.5 Preparación mecánica de muestras	49
3.6 Análisis geoquímicos	50
3.7 Aseguramiento de calidad y control de la calidad (QA/QC).....	51
3.8 Tratamiento de los datos. Software Arcmap y Minitab.....	52
CAPÍTULO 4: RESULTADOS GEOLÓGICOS DEL PROYECTO	
MARGARITA.....	53
4.1 Unidades litológicas	53
4.2 Estructuras tectónicas	69
4.2.1 Estructuras NNW-SSE	70
4.2.2 Fallas normales WNW-ESE.....	71
4.2.3 Estructuras NNE-SSW	71
4.3 Alteración y mineralización	72
4.3.1 Alteración.....	73
CAPÍTULO 5: RESULTADOS GEOQUÍMICOS	77
5.1 Análisis estadístico	77
5.1.1 Estadística univariable.....	77
5.2 Determinación de “background” y “threshold”	79
5.3 Anomalías geoquímicas.....	80
5.3.1 Distribución de las zonas anómalas	80
5.4 Estadística multivariable.....	89
5.4.1 Análisis bivariable	89
5.4.2 Definición de elementos target y pathfinder	92
5.5 Control de las zonas mineralizadas.....	96
5.5.1 Control litológico	96
5.5.2 Control de la alteración sobre la mineralización.....	98
5.5.3 Control estructural sobre la mineralización	101
5.6 Análisis de la calidad y aseguramiento de la calidad (QA/QC).....	103
5.6.1 Duplicados.....	103
5.6.2 Análisis ICP.....	104
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....	108
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
Referencias	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la Región de Atacama con la ubicación del Proyecto Margarita junto con depósitos IOCG de clase mundial (Fuente: www.torqresources.com).....	13
Figura 2: Ruta de acceso Copiapó-Proyecto Margarita.....	14
Figura 3: Diagrama de fase de presión-temperatura del agua en el rango de condiciones de formación de depósitos magmático-hidrotermales. El área sombreada clara muestra el campo de posibles fusiones félsicas. La densidad del agua varía de líquido a alta presión y temperatura relativamente baja a vapor a baja presión. En las condiciones 'A', el agua líquida hervirá y se convertirá en vapor si se reduce la presión. En 'B', el agua líquida no hervirá, pero se volverá cada vez menos densa al disminuir constantemente la presión (Ridley, 2013).....	16
Figura 4: Componentes del sistema hidrotermal (Ridley, 2013).....	17
Figura 5: Distribución de los yacimientos tipo pórfido, depósitos Paleozoicos (sombreado cruzado) y Mesozoico-Cenozoico (sombreado lineal) y sus relaciones con los límites y movimientos de placa (Ridley, 2013).....	18
Figura 6: Ejemplo de coincidencia espacial y temporal entre un cinturón de pórfidos de Cu y una zona de falla intraarco: la parte norte de Chile del Eoceno medio andino central al cinturón de pórfidos de Cu del Oligoceno temprano y el sistema de fallas de Domeyko (Sillitoe y Perelló, 2005).	19
Figura 7: Ubicación de las principales provincias IOCG y óxidos de Fe hidrotermales a escala mundial (Modificado de Williams et al. 2005).	20
Figura 8: Posición del cinturón IOCG central andino del norte de Chile-sur de Perú con respecto al arco magmático Jurásico-Cretácico temprano y una serie de cuencas de trasarco interconectadas a lo largo del borde oriental (Sillitoe, 2003).	21
Figura 9: Zonación vertical de una veta IOCG.....	23
Figura 10: Veta IOCG del Jurásico en el arco de La Negra en el norte de Chile indicando posibles fuentes de fluido mineral (Sillitoe, 2003).....	24
Figura 11: Perfil esquemático del distrito Candelaria-Punta del Cobre (Ridley, 2013).....	24
Figura 12: Ejemplo de dispersión geoquímica primaria debido a actividad hidrotermal, se indica zona de anomalía y halo de alteración.....	27
Figura 13: Representación de dispersión geoquímica secundaria, se observa anomalía de suelos y anomalía transportada por infiltración.....	28
Figura 14: Histograma de frecuencia y curvas de frecuencia para un conjunto de datos con múltiples poblaciones.	30
Figura 15: Histograma, diagrama de densidad, diagrama de dispersión unielemental y box plot representando distribución empírica de Fe en muestras de suelo (Extraído de Carranza, 2009).....	31
Figura 16: Ejemplo de histograma de frecuencia.....	32
Figura 17: Ejemplo de box plot que representa las características de un conjunto de datos univariados (Extraído de Carranza, 2009).....	33
Figura 18: Comparación de box plot de Cu (ppm) de 16 poblaciones de datos (Extraído de Agnew, 1999).....	34
Figura 19: Box plot para concentraciones de potasio (K%) en suelos del área de Kola (Extraído de Reimann et al., 1998).....	35
Figura 20: Diagramas de dispersión unielementales para muestras de suelo del distrito Aroroy (Filipinas) (Extraído de Carranza, 2009).....	37

Figura 21: Dendrograma de elementos geoquímicos obtenidos mediante el algoritmo basado en matriz de variación (Extraído de Liu et al., 2018).....	38
Figura 22: Anomalías integradas de Cu-As-Ni como resultado de PCA de stream sediment en el distrito Aroroy, Filipinas (Extraído de Carranza, 2009).	40
Figura 23: Mapa de puntos y círculos proporcionales de Cu (ppm) en muestras de suelo de Swayze greenstone belt, Ontario, Canada (Extraído de Harris et al., 2001).	42
Figura 24: Mapa de interpolación de Cu (ppm) de sedimentos de la Hoja Pisagua (Extraído de Astudillo et al., 2015).....	43
Figura 25: Radiación primaria y determinación de elemento mediante radiación secundaria (Narváez et al. 2014).....	43
Figura 26: Explicación gráfica del principio de fluorescencia (Thermo scientific, 2021).	45
Figura 27: Demostración de toma de muestra con equipo pXRF.	46
Figura 28: Muestras de suelo de malla 200 x 200 recolectadas en primera campaña de muestreo.	47
Figura 29: Muestras de suelo en malla 100 x 100 m recolectadas en segunda campaña de muestreo.	48
Figura 30: Procedimiento de toma de muestra de suelo.....	49
Figura 31: Recolección y tamizado de muestra.	49
Figura 32: Preparación mecánica y codificación de muestras.....	50
Figura 33: Sellado y análisis de muestras en equipo pXRF.....	50
Figura 34: Interfaz equipo pXRF VANTA con resultados de análisis geoquímicos.	51
Figura 35: Duplicados de campo para análisis pXRF y estándar para análisis ICP-MS.	51
Figura 36: Mapa geológico-estructural del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile	53
Figura 37: (a) Estratificación en la unidad de tobas lítico-cristalinas y (b) textura rica en cristales con menor componente de fragmentos líticos de las tobas.....	54
Figura 38: (a) Relictos pequeños de plagioclasa y porosidades ocupadas por alunita y pomez alteradas. (b) Cristales astillados de plagioclasa y disseminación de piritita-jarositita.	55
Figura 39: Bandas de flujo (a) y texturas fragmentadas incluyendo lapilli acrecionaria (b) en la unidad de domos de lava Krdd.	56
Figura 40: Afloramiento en quebrada de dique félsico intruyendo roca tobácea.	56
Figura 41: (a) Diorita Margarita cloritizada subyacente a las secuencias volcánicas del cerro Remolino. (b) Textura de grano grueso de Diorita Margarita.	57
Figura 42: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasas alterados a una mezcla variable de smectitas con sericita. (b) Forma octogonal de piroxeno alterado a anfíbola.....	57
Figura 43: Diorita cototuda con fenocristales de plagioclasa alterados a sericita ...	58
Figura 44: (a) Pórfido diorítico con fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental afanítica (b) Afloramiento en ladera de roca porfídica diorítica.	59
Figura 45: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasas con macla de penetración y aspecto recrystalizado con formación local de feldespato potásico. (b) Minerales máficos alterados a un cúmulo alargado de rosetas de hidrobiotita con clorita de aspecto disgregado con sobreposición de epidota.	60
Figura 46: Afloramiento de Pórfido cuarzo-diorítico intruyendo tobas líticas.	60

Figura 47: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa alterados a feldespato potásico con sobreposición de smectitas. (b) “Ojo” de cuarzo con rasgos de reabsorción magmática.	61
Figura 48: (a) Pórfido riódacítico con textura levemente afanítica y feldespatos tabulares junto con fenocristales de cuarzo en una masa fundamental silíceo-feldespática. (b) Ojos de cuarzo junto con vetillas subparalelas de cuarzo.	62
Figura 49: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa remplazados por una mezcla de smectitas con rosetas de sericita-illita. Además, se reconoce otro fenocristal de feldespato potásico alterado totalmente a un agregado de caolinita-dickita de muy baja birrifrigencia. (b) Fenocristales de plagioclasa y feldespato alterados, junto a un pequeño “ojo” de cuarzo que presentan márgenes con rasgos de reabsorción magmática.	63
Figura 50: (a) Afloramiento de Feldspar Porphyry con aspecto blanquecino y vetillas de cuarzo-turmalina. (b) Roca con textura porfídica y aspecto brechizado.	63
Figura 51: (a) Textura porfídica con un fenocristal de plagioclasa con efecto de recristalización termal con remplazo por feldespato potásico con sobreposición de epidota. (b) Fenocristal de piroxeno u hornblenda totalmente remplazado por agregados aciculares de actinolita con formación de gránulos de titanita.	64
Figura 52: (a) Porfido cuarzo-feldespático con aspecto brechizado por vetillas de cuarzo-turmalina (b) Afloramiento bajo coluvio inactivo de Pórfido cuarzo-feldespático con ojos de cuarzo.	65
Figura 53: (a) Fragmento dacítico de textura tipo crowded con fenocristales de plagioclasas con maclas polisintéticas con alteración moderada a smectitas. Además, se reconoce un “ojo” de cuarzo con fractura ocupada por piritita. (b) Matriz textura fragmental con trozos de cuarzo y plagioclasa alterada. El cemento es fino y cuarífero.	65
Figura 54: (a) Textura seriada y (b) fragmentada en la unidad de Pórfido Dacítico.	66
Figura 55: (a) Textura porfídica semi-cerrada con fenocristales de plagioclasas alterados smectitas con láminas de sericita. (b) Anfíbola tipo hornblenda que se encuentra totalmente alterada a granos de feldespato potásico con clorita hojosa y cúmulos de rutilo.	67
Figura 56: (a) Intrusión monzodiorítica menor ubicada al sur de la colina Remolino. (b) Texturas vuggy dentro de las monzodioritas afectadas por la alteración argílica avanzada.	67
Figura 57: (a) Estructura mineralizada con silicatos de cobre en Pórfido diorítico. (b) Afloramiento de Pórfido Diorítico con mineralización de silicatos de cobre verde y óxidos negros.	68
Figura 58: Afloramientos de cuerpos subverticales tabulares correspondientes a diques dioríticos intruyendo unidades intrusivas y volcánicas.	69
Figura 59: Mapa de estructuras geológicas del Proyecto Margarita.	70
Se realizó un mapa de alteración y mineralización (Figura 60) en el cual se identificaron una variedad de alteraciones hidrotermales junto con zonas mineralizadas, las cuales se detallan a continuación Figura 60: Mapa de alteración y mineralización del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.	72
Figura 61: (a) Rajo de la Mina Margarita con mineralización de óxidos de cobre verde y negro en pórfido diorítico. (b) Dique diorítico con mineralización de crisocola.	74
Figura 62: (a) Afloramiento de Crackle Breccia de cuarzo turmalina. (b) Se logran identificar clastos angulosos de Pórfido Diorítico.	75

Figura 63: (a) Pique exhibiendo estructura de hematita-especularita-silice. (b) Brecha Riodacítica de Sílice-Hematita, se observan fragmentos angulosos de rocas dioríticas.	75
Figura 64: Estructura brechosa de cuarzo-especularita cortando roca porfídica diorítica.	76
Figura 65: Histograma de frecuencia de datos geoquímicos de cobre en suelos.	78
Figura 66: Gráfico de caja de concentraciones de cobre en suelos.	78
Figura 67: Gráfico de caja de concentraciones de cobre con intervalos de anomalías.	79
Figura 68: Mapa de anomalías geoquímicas de cobre en muestras de suelos obtenido a partir de una malla de muestreo de 200 x 200 m.	81
Figura 69: Mapa de interpolación de concentraciones de cobre en suelos obtenidos a partir de una malla de muestreo de 200 x 200 m.	83
Figura 70: Mapa de anomalías geoquímicas de Cu en sector norte a partir de una malla de muestreo de 100 x 100 m.	84
Figura 71: Mapa litológico y geoquímico del sector norte.	85
Figura 72: Mapa de anomalías geoquímicas de Cu sector cototuda obtenido de una malla de muestreo de 100 x 100 m.	86
Figura 73: Mapa litológico y geoquímico del sector cototuda.	87
Figura 74: Mapa de anomalías geoquímicas de cobre en sector Margarita obtenido de una malla de muestreo de 200 x 200 m.	88
Figura 75: Mapa litológico y geoquímico del sector Margarita.	89
Figura 76: Matriz de correlación de Pearson para los elementos analizados por equipo de fluorescencia de rayos X portátil.	91
Figura 77: Gráfico de dispersión de Cu-Fe, Cu-Co y Fe-Co	92
Figura 78: Dendrograma de datos geoquímicos de suelo del proyecto Margarita.	93
Figura 79: Análisis de componentes principales de datos geoquímicos de suelo del proyecto Margarita	93
Figura 80: (a) Mapa geoquímico de anomalías de Co en suelos (b) Mapa geoquímico de anomalías de Fe en suelos.	95
Figura 81: Gráfico tipo boxplot de concentraciones de cobre en las unidades litológicas.	97
Figura 82: Mapa geológico y geoquímico del proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.	98
Figura 83: Gráfico tipo box plot de concentraciones de cobre en unidades de alteración.	99
Figura 84: Mapa de alteración y geoquímico del proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.	100
Figura 85: Mapa geoquímico de concentraciones de Cu en estructuras mineralizadas.	102
Figura 86: Análisis de correlación de muestras regulares y duplicados.	103
Figura 87: Análisis de correlación de elementos en muestras regulares y duplicados.	104
Figura 88: Análisis de correlación entre muestras analizadas por pXRF e ICP en distintas granulometrías.	105
Figura 89: Análisis de correlación de cada elemento medido por pXRF e ICP en muestras de tamiz #30.	106

Figura 90: Análisis de correlación de cada elemento medido por pXRF e ICP en muestras de tamiz #30.....	107
Figura 91: Sección esquemática de depósito IOCG Andino con secuencias hidrotermales de alteración mineralización (Skirrow, 2021).....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Elementos con afinidad geoquímica y elementos pathfinder asociados usados en exploración de depósitos (Modificado de Hurtado, 2002).	29
Tabla 2: Coeficientes de correlación de datos transformados (log _e) de muestras de suelo del distrito Aroroy (Filipinas) (Extraído de Carranza, 2009)	37
Tabla 3: Componentes principales de subconjuntos de datos transformados a log _e en el distrito Aroroy, Filipinas (Extraído de Carranza, 2009).....	39
Tabla 4: Estadística descriptiva de concentraciones de cobre en suelos.....	77
Tabla 5: Rangos de anomalías geoquímicas de cobre en suelos.....	80
Tabla 6: Estadística descriptiva de concentraciones de cobre en unidades litológicas.	96
Tabla 7: Estadística descriptiva de concentraciones de Cu en unidades de alteración.	99

RESUMEN

El proyecto Margarita se ubica en la localidad de Inca de Oro, Chile, 65 kilómetros al norte de la ciudad de Copiapó. El proyecto corresponde a un complejo intrusivo diorítico a cuarzo diorítico que se encuentra atravesando una secuencia volcánica compuesta por tobas, brechas y lavas dacíticas a riódacíticas. El muestreo geoquímico sistemático de suelos en toda la propiedad en una malla predefinida y su posterior análisis a través de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (pXRF) arrojó como resultado tres zonas de anomalías geoquímicas de cobre. La anomalía de la zona sur, denominada Cototuda, tiene una extensión de 1,5 km por 0,5 km donde la mineralización de cobre se encuentra alojada en intrusivos dioríticos y brechas riódacíticas además de estar controlada fuertemente por sistemas estructurales NNW y NNE. La anomalía Margarita se caracteriza por la presencia de óxidos de cobre negros y verdes dominados por estructuras con tendencia NNW. Por otro lado, la anomalía de la zona norte tiene una extensión de 0,7 km por 0,5 km y se caracteriza por presentar una clara tendencia NNW la cual presenta valores máximos sobre 9000 ppm de cobre y se encuentra alojada en intrusivos dioríticos y cuarzo-dioríticos. Las zonas de anomalías geoquímicas de cobre exponen zonas potenciales de prospección, Además, se presentan alteraciones potásica, sericítica, hematítica y argílica, evidenciando una intensa circulación de fluidos hidrotermales. El análisis bivariado y multivariado indica que el cobre tiene altos grados de correlación con hierro y cobalto, por lo que estos tres elementos presentan una asociación genética y espacial, la cual es comprobada a la vez por la presencia de anomalías geoquímicas de estos tres elementos en los mismos sectores del área de estudio. El equipo pXRF presenta valores confiables y similares a los entregados por análisis ICP siempre y cuando el muestreo y la preparación mecánica de la muestra se lleven a cabo a través de un flujo de trabajo riguroso que acompañado de un análisis estadístico de los datos permite la toma de decisiones de manera rápida y efectiva.

ABSTRACT

The Margarita project is located in the town of Inca de Oro, Chile, 65 kilometers to the north of the city of Copiapó in the Atacama region of north of Chile. The project present a dioritic to quartz dioritic intrusive complex that is intruding a volcanic sequence composed of tuffs, breccias, and dacitic to rhyodacitic lava domes. Systematic geochemical soil sampling around the entire mining property and subsequent analysis using portable X-Ray fluorescence (pXRF) equipment evidence three zones of copper geochemical anomalies. The anomaly in the southern zone, called Cototuda, has an extension of 1.5 km by 0.5 km where the copper mineralization is hosted in dioritic intrusives and rhyodacitic breccias, in addition to being strongly controlled by NNW and NNE structural systems. The Margarita anomaly is characterized by the presence of black and green copper oxides dominated by NNW trending structures. On the other hand, the northern zone anomaly has an extension of 0.7 km by 0.5 km and is characterized by presenting a clear NNW trend which presents maximum values above 9000 ppm of copper and is located in dioritic to quartz-diorites intrusive rocks. The zones of copper geochemical anomalies expose potential prospecting zones. In addition, there are pottasic, sericitic, hematitic and argillic alterations, evidencing an intense circulation of hydrothermal fluids. The bivariate and multivariate analysis indicates that copper has high correlation with iron and cobalt, so that these three elements present a genetic and spatial association, which is confirmed at the same time by the presence of geochemical anomalies of these three elements in the same sectors of the study area. It is worth emphasizing the pXRF equipment presents reliable values similar to those delivered by ICP analysis as long as the sampling and mechanical preparation of the sample are carried out through a rigorous workflow that, accompanied by a statistical analysis of the data, allows the taking decisions quickly and effectively.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto del problema de investigación

El distrito minero Inca de oro es probablemente uno de los distritos históricos más llamativos y activos en los últimos tiempos en la pequeña minería. Desde hace siglos se explotan vetas ricas en oro y es mundialmente conocido su potencial de prospección de Au-Cu (Matthews et al., 2006).

La geología del sector de Inca de oro de manera general se asocia a una secuencia estratigráfica con registro desde el Jurásico hasta el Cretácico inferior. Esta se compone de dos unidades principalmente volcánicas: la Formación La Negra, intruida por plutones de edad jurásica superior, cubierta concordantemente por la Formación Punta del Cobre (Jurásico superior-Valanginiano inferior) y una secuencia carbonatada marina del Neocomiano, asignada al Grupo Chañarcillo (Valanginiano inferior alto-Aptiano), cubierta discordantemente por la Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano) de origen continental. A partir del Cretácico superior se registra actividad sedimentaria y volcánica en ambiente continental (Matthews et al. 2006).

En este sector coinciden una notable concentración de pequeños yacimientos vetiformes y mantiformes con mineralización de oro, cobre y plata, localizados, principalmente, en el dominio occidental. Estudios realizados por CODELCO han reportado la presencia de un complejo intrusivo portador de mineralización de tipo pórfido cuprífero (Cu-Au-Mo), de mediano tamaño, bajo una zona cubierta de gravas no consolidadas entre 30 a 100 m de espesor, inmediatamente al este del pueblo de Inca de Oro cuya mineralización se asocia a un núcleo de alteración potásica preservado (Rivera et al., 2006). Este consiste en un denso 'stockwork' de cuarzo con calcopirita-magnetita, acompañada de anhidrita y feldespatos potásicos, desarrollada en el pórfido tonalítico temprano y en las rocas volcánicas encajantes, asignadas a la Formación Punta del Cobre, seguido de intrusivos intermineral, que aportan principalmente pirita, con una proporción menor de calcopirita y molibdenita (Rivera et al., 2006).

Sin embargo, la mayor concentración de pequeños yacimientos se asocia a vetas de pequeño a mediano tamaño (Díaz et al., 1999) emplazadas a lo largo de fallas de alto ángulo, con rumbo NE. Las vetas están emplazadas tanto en la Formación La Negra, Formación Punta del Cobre y las calizas neocomianas, como también en los

plutones del Jurásico superior (Jg) y Cretácico superior-inferior (Ksg). Según Díaz et al. (1999) presentan mineralización tipo Au-Cu y Au-Cu-Ag.

Este trabajo se desarrolla en el marco de una campaña de exploración ejecutada por la empresa Torq Resources, cuya finalidad es descubrir un depósito económicamente viable y medioambientalmente sostenible en una zona no explorada previamente, ubicada en una franja metalogénica de clase mundial.

1.2 Ubicación y accesos

El área de estudio, denominada Proyecto Margarita, se ubica en la comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama a 65 km al norte de la ciudad de Copiapó (Figura 1) y comprende aproximadamente 1045 hectáreas.

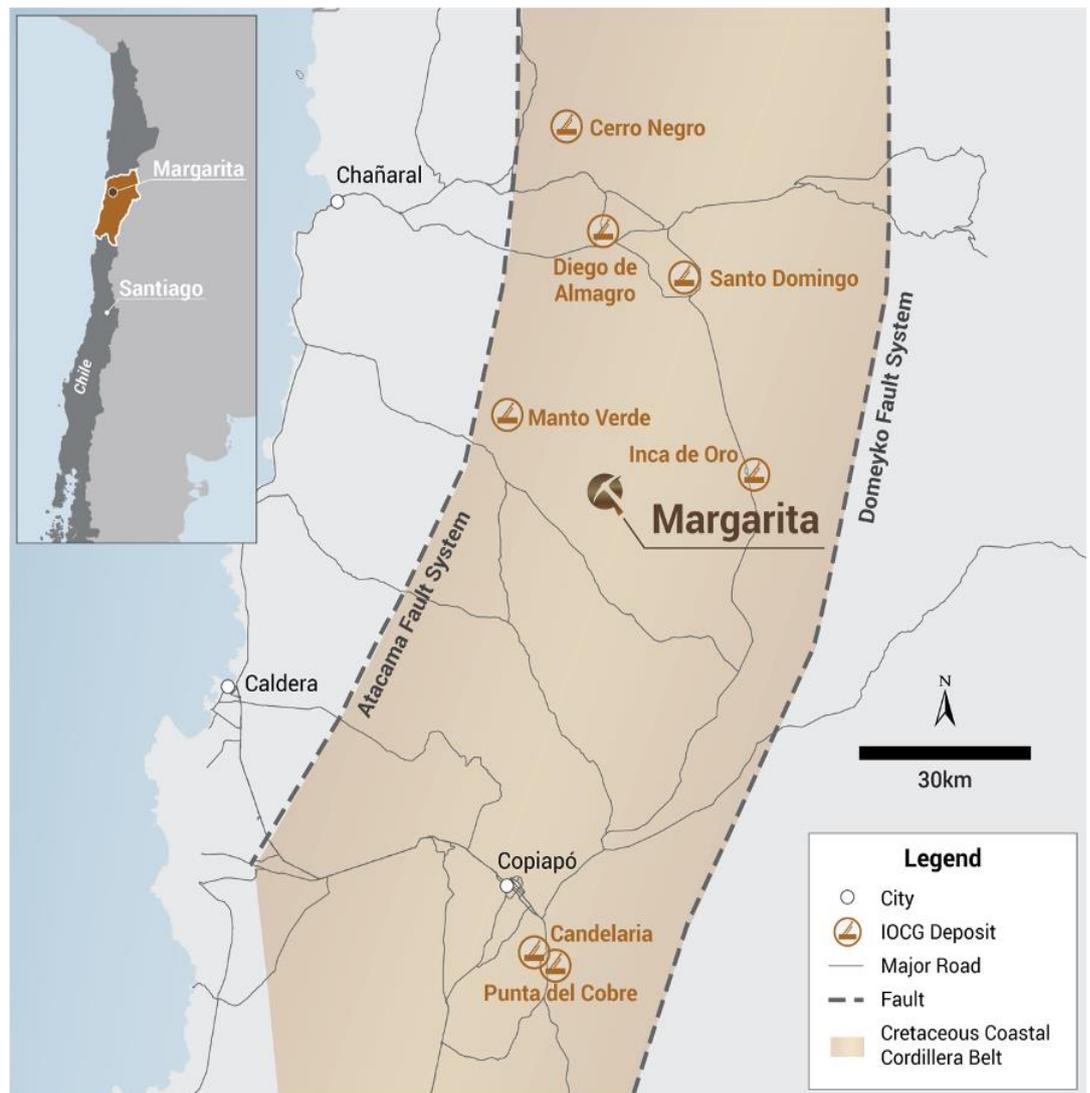


Figura 1: Mapa de la Región de Atacama con la ubicación del Proyecto Margarita junto con depósitos IOCG de clase mundial (Fuente: www.torqresources.com).

Para acceder al Proyecto Margarita desde la ciudad de Copiapó (Figura 2), se deberá avanzar por Avenida Copayapu hasta el sector Paipote. Desde ahí se continúa por la ruta C-17 hasta la localidad de Inca de Oro (100 km). Posteriormente se dirige en dirección oeste por la ruta C-273 (40 km) y luego se dobla a la derecha en un camino de servidumbre donde se tiene que avanzar 8 km para llegar al área de estudio.



Figura 2: Ruta de acceso Copiapó-Proyecto Margarita.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Definir el modelo geoquímico y determinar los controles de alimentación y migración de las soluciones mineralizadoras del proyecto Margarita.

1.3.2 Objetivos específicos

Definir los valores de background y threshold para las concentraciones de cobre en muestras de suelo.

Identificar y caracterizar las anomalías geoquímicas presentes y su relación con la geología del sector.

Determinar los elementos pathfinder asociados al cobre a través del análisis estadístico multivariable e identificar los controles de alimentación y migración de los fluidos mineralizadores.

Definir la exactitud y precisión de los distintos elementos analizados por el equipo portátil de fluorescencia de rayos X.

1.4 Hipótesis

Mediante el análisis geoquímico de una malla predefinida de muestras de suelo a en toda la propiedad minera es posible definir zonas de anomalías de cobre y de interés prospectivo junto con los elementos pathfinder asociados al cobre, además, determinar los controles de las soluciones mineralizadoras del proyecto Margarita. Debido a las características geológicas del área de estudio se espera encontrar una firma geoquímica asociada a depósitos tipo IOCG (por las siglas en inglés *Iron Oxide Copper and Gold*) o pórfido.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Depósitos magmático-hidrotermales

Los depósitos magmáticos-hidrotermales son los que se forman debido a la actividad hidrotermal asociada a cuerpos ígneos emplazados en niveles elevados de la corteza terrestre (Edwards, 1986). Los fluidos hidrotermales derivados del magma junto con las aguas meteóricas circundantes han desempeñado un papel fundamental en la génesis de estos depósitos, a la vez que la tectónica, la mineralogía y las características de la alteración son claves para la exploración de estos tipos de yacimientos (Edwards, 1986).

Un depósito magmático-hidrotermal es aquel donde los minerales precipitaron a partir de soluciones a altas temperaturas y a diversas condiciones de presión (Figura 3), las cuales pueden presentar diversas salinidades y rangos de temperaturas, las cuales pueden variar desde 100° C hasta temperaturas magmáticas de alrededor de 800° C (Ridley, 2013).

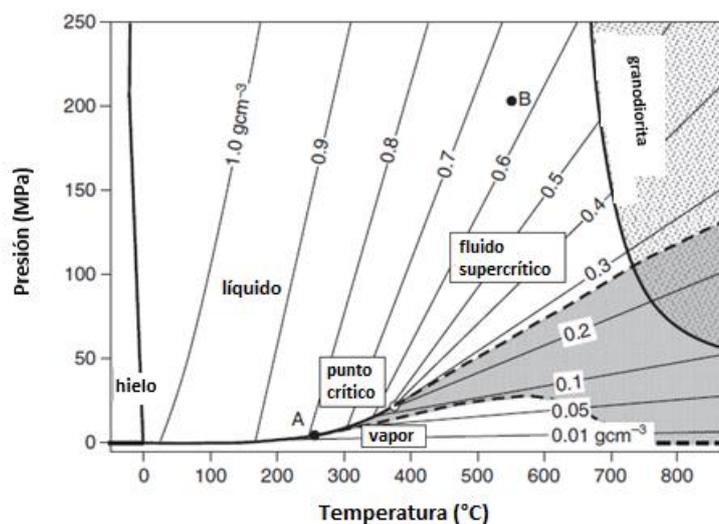


Figura 3: Diagrama de fase de presión-temperatura del agua en el rango de condiciones de formación de depósitos magmático-hidrotermales. El área sombreada clara muestra el campo de posibles fusiones félsicas. La densidad del agua varía de líquido a alta presión y temperatura relativamente baja a vapor a baja presión. En las condiciones 'A', el agua líquida hervirá y se convertirá en vapor si se reduce la presión. En 'B', el agua líquida no hervirá, pero se volverá cada vez menos densa al disminuir constantemente la presión (Ridley, 2013).

Los depósitos magmático-hidrotermales tienen las mayores concentraciones de metales de interés económico a nivel global (Cu, Au, Zn, Pb, U, Ag, Sn y Mo) (Edwards, 1986).

2.1.1 Componentes del sistema hidrotermal

Se pueden distinguir cinco componentes de un sistema hidrotermal mineralizador (Figura 4; Ridley, 2013):

- Fuente y control de la composición del fluido
- Fuente de los elementos y minerales disueltos: los elementos y los metales se disuelven en el fluido en la fuente y durante la trayectoria por reacción química de la roca por la cual circula el fluido.
- Vía de migración de fluidos: Puede ser por los poros de la roca o en el caso de rocas cristalinas es más probable que el fluido migre por discontinuidades, es decir, fracturas, fallas, zonas de contacto. Por lo tanto, las vías de los fluidos son generalmente estructuras.
- Fuente de energía térmica o mecánica para impulsar la migración de fluidos
- Condiciones químicas necesarias para la precipitación de fluidos. En general, la precipitación es el resultado de cambios en la solubilidad del mineral y, por lo tanto, uno o más de temperatura, presión o composición fluida cambiantes.

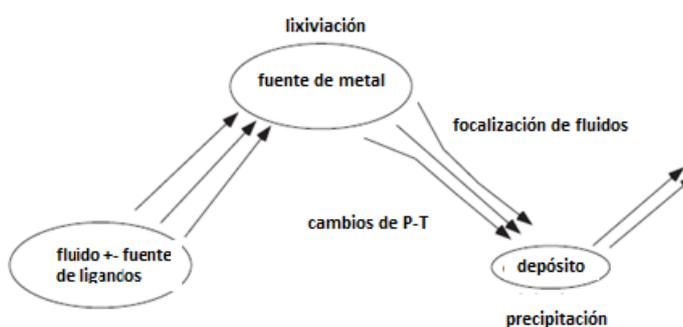


Figura 4: Componentes del sistema hidrotermal (Ridley, 2013)

2.1.2 Yacimientos tipo pórfido

Los yacimientos tipo pórfido son la representación del escape de fluidos desde grandes intrusiones al interior de la corteza terrestre; los commodities más importantes de este tipo de depósitos son Cu, Mo, Au y como subproducto Ag y Re (Ridley, 2013). De manera general, los pórfidos son grandes depósitos entre 1Mt y 10 Gt de mineral en rocas muy alteradas donde los minerales de mena se presentan de manera diseminada o en vetillas en leyes relativamente bajas, en el caso del Cu suelen ser

inferiores a 1%, alrededor de 1 ppm en Au y 0,1% en pórfidos de molibdeno (Ridley, 2013).

La mayoría de los depósitos tipo pórfido se forman dentro de arcos volcánicos (Figura 5), tanto en arcos continentales (p. ej., la Cordillera del oeste de América del Norte y del Sur) como en arcos insulares intraoceánicos (p. ej., los arcos del 'Pacífico sudoccidental' de Papua Nueva Guinea, Islas Salomón, etc.) (Ridley, 2013).

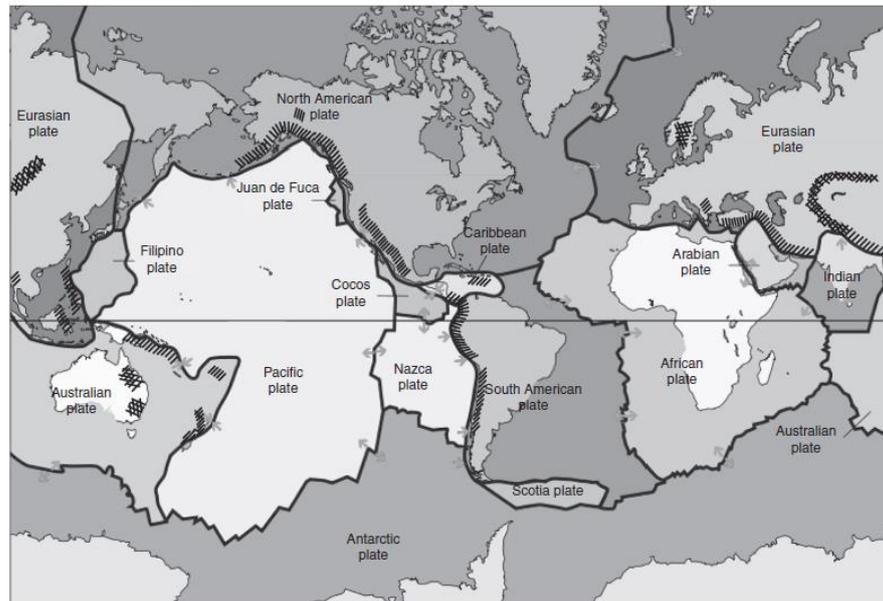


Figura 5: Distribución de los yacimientos tipo pórfido, depósitos Paleozoicos (sombreado cruzado) y Mesozoico-Cenozoico (sombreado lineal) y sus relaciones con los límites y movimientos de placa (Ridley, 2013).

Los sistemas tipo pórfido se definen como grandes volúmenes (10→100 km³) de roca alterada hidrotermalmente centrada en stocks. Junto con los batolitos calcoalcalinos y las cadenas volcánicas, son los sellos distintivos de los arcos magmáticos construidos sobre zonas de subducción activa en los márgenes de placas convergentes (Sillitoe, 1972; Richards, 2003).

Los yacimientos porfídicos más comunes son aquellos en donde el Cu es el elemento más importante (pórfidos de Cu), que además presentan concentraciones de Mo de hasta 0,03% y/o Au hasta 1 ppm, pudiendo constituir una parte secundaria del depósito (pórfidos de Cu-Mo o Cu-Au; Ridley, 2013).

Los pórfidos de Cu típicos se encuentran asociados a intrusiones dioríticas a granodioríticas en los múltiples yacimientos en Chile y los países adyacentes en la cordillera andina (p. ej. El Salvador, Gustafson and Hunt, 1975; Bajo de la Alumbrera, Ulrich and Heinrich, 2002; Proffett, 2003; Harris et al. 2005), en el suroeste de USA (p. ej. Tittley, 1982), entre otros.

Los sistemas de pórfido de Cu muestran una marcada tendencia a ocurrir en cinturones lineales, típicamente paralelos a orógenos, que van desde unas pocas decenas hasta cientos e incluso miles de kilómetros de largo, como lo ejemplifica la zona oeste de los Andes de Sudamérica (Sillitoe y Perelló, 2005; Figura 6).

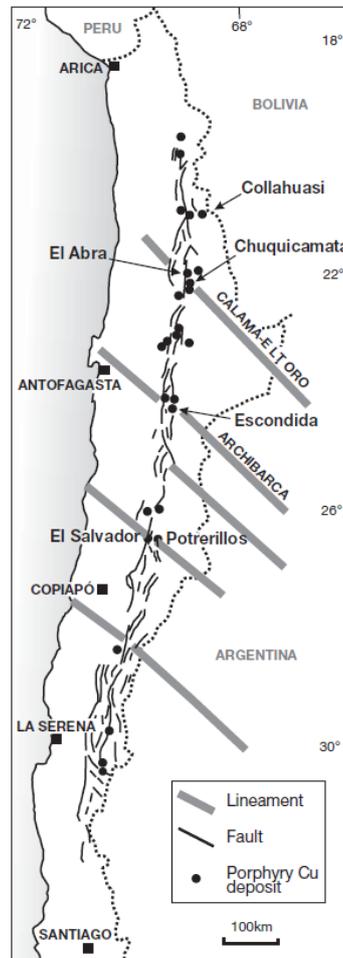


Figura 6: Ejemplo de coincidencia espacial y temporal entre un cinturón de pórfidos de Cu y una zona de falla intraarco: la parte norte de Chile del Eoceno medio andino central al cinturón de pórfidos de Cu del Oligoceno temprano y el sistema de fallas de Domeyko (Sillitoe y Perelló, 2005).

Las principales características de los yacimientos tipo pórfido son (Ridley, 2013):

- La roca de caja de la mineralización puede ser de distintos tipos, pero siempre está relacionada temporalmente con intrusiones de variado volumen, en su mayoría félsica (52-77 wt% de SiO₂).
- En el centro de grandes volúmenes (> 10 km³) de roca alterada hidrotermalmente se encuentran los grandes depósitos. Un mineral típico de estos depósitos es la pirita, lo que indica una gran cantidad de sulfuros que han

aportado los sistemas hidrotermales a las rocas de la corteza además de los minerales de metálicos.

- La roca se caracteriza por presentar vetas y vetillas estrechamente espaciadas donde la roca de caja se altera de manera penetrante. Puede haber vetas y vetillas de distinta temporalidad, las cuales marcan el camino y los cambios del fluido hidrotermal en el tiempo.
- Los minerales de mena se encuentran en vetas o de forma diseminada en la roca de caja. Los minerales más importantes son sulfuros de Cu y Cu-Fe (calcopirita, bornita, calcosina) y de Mo (molibdenita), Au nativo y óxidos de W y Sn.
- Las intrusiones menores y las rocas volcánicas asociadas son calcoalcalinas a alcalinas y se encuentran relacionadas al ambiente tectónico.

2.1.3 Yacimientos tipo IOCG

Los yacimientos tipo IOCG (por las siglas en inglés de *Iron oxide Copper and Gold*) se encuentran distribuidos globalmente a través del espacio y tiempo geológico con edades que van desde el Arcaico al Fanerozoico y además se encuentran representados en todos los continentes excepto en la Antártica (Barton, 2014; Figura 7).

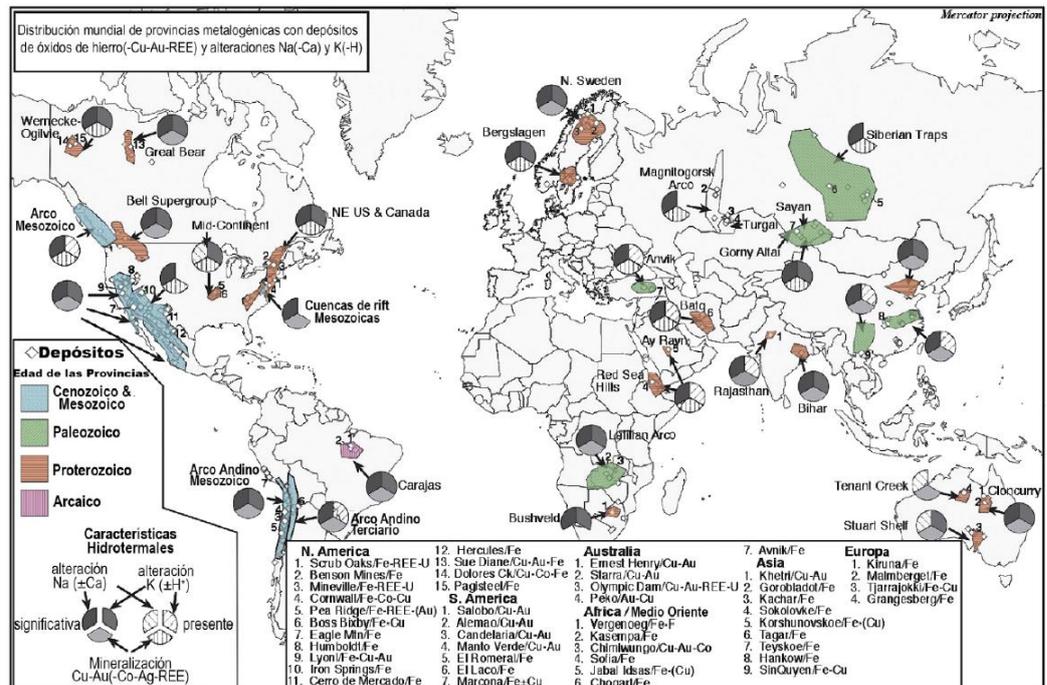


Figura 7: Ubicación de las principales provincias IOCG y óxidos de Fe hidrotermales a escala mundial (Modificado de Williams et al. 2005).

El modelo IOCG más que un modelo geológico estrictamente definido, alude a la mineralización de cobre, representada por calcopirita y bornita, oro y óxidos de hierro como hematita y magnetita, además de contenidos de cobalto, uranio, tierras raras, molibdeno, zinc y plata (Ray and Lefebure, 2000).

Una de las provincias IOCG mejor desarrolladas se encuentra en la cordillera de la costa de Sudamérica en el norte de Chile y sur de Perú (Figura 8), donde se encuentra estrechamente relacionado a batolitos mesozoicos y los principales sistemas de fallas paralelos al arco (Sillitoe, 2003).

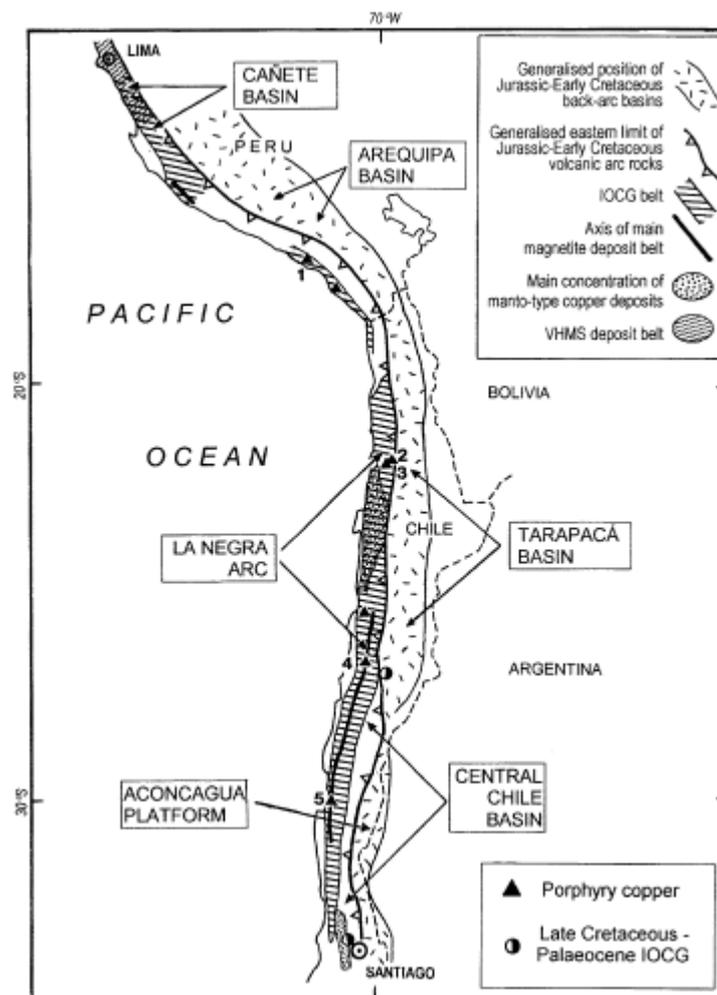


Figura 8: Posición del cinturón IOCG central andino del norte de Chile-sur de Perú con respecto al arco magmático Jurásico-Cretácico temprano y una serie de cuencas de trasarco interconectadas a lo largo del borde oriental (Sillitoe, 2003).

Este cinturón incluye depósitos con variada geometría como yacimientos vetiformes, mantos, brechas y stockworks que pueden estar alojados en secuencias de rocas volcánicas andesíticas-dacíticas alteradas hidrotermalmente (Ridley, 2013).

Muchos de estos depósitos IOCG se encuentran dentro de volúmenes de roca extensos afectados por alteración hidrotermal del tipo sódica o sódica-cálcica cuya diferencia entre estas dos facies de alteración puede estar relacionada con la roca de caja y que además presenta hasta un 10% de minerales de Fe como magnetita o diseminaciones de hematita, otorgándole un tono rojizo a la roca (Ridley, 2013).

La alteración sódica se caracteriza por la presencia de albita-escapolita generalmente en rocas félsicas y la alteración sódica-cálcica está marcada por albita-actinolita, diópsido o raramente granate y epidota en rocas máficas. Otro tipo de alteración asociada a depósitos IOCG es del tipo cálcico, representada por actinolita, diópsido, hornblenda, grunerita y granate (Ridley, 2013). La alteración dentro de los cuerpos minerales se denomina potásica con feldespato potásico en rocas félsicas, biotita en rocas máficas o sericita.

La zonación vertical de los minerales de alteración en unos pocos cientos de metros a través y alrededor de un cuerpo mineralizado es característica, por ejemplo, con actinolita en profundidad y clorita en niveles poco profundos, o zonación a través de biotita, sericita y zonas de alteración argílica. Los conjuntos de clorita, sericita-calcita o dolomita-cuarzo y hematitas en niveles poco profundos se denominan facies de alteración 'hidrolítica'. El mineral de óxido de hierro en el mineral es magnetita o hematita de forma variable, y en varios depósitos se registra una zonificación vertical, con hematita a poca profundidad dando paso a magnetita a mayor profundidad (Figura 9).

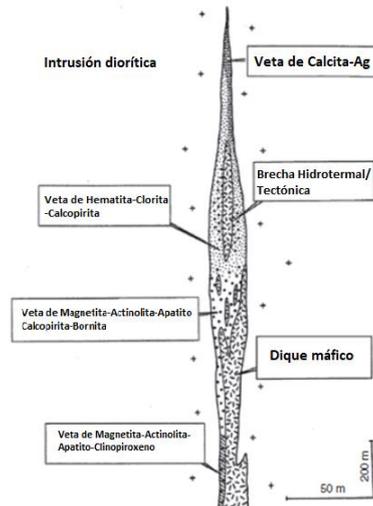


Figura 9: Zonación vertical de una veta IOCG.

Los depósitos están controlados principalmente por fallas frágiles, aunque la deformación dúctil se superpuso localmente con las primeras etapas de mineralización. Las voluminosas intrusiones toleíticas a calco-alcálinas que albergan u ocurren en las proximidades de los depósitos de IOCG poseen una fuente de manto predominante, carecen de contaminación de la corteza apreciable y están oxidadas, en común con sus secuencias de rocas hospedantes densamente dominadas por los volcanes.

En el norte de Chile, principalmente entre las latitudes 22° y 31° S, la mayoría de los depósitos IOCG están alojados por las rocas volcánicas de la Fm. La Negra y sus equivalentes estratigráficos más al sur, así como por los plutones del Jurásico tardío y Cretácico temprano que los intruyen (Figura 10).

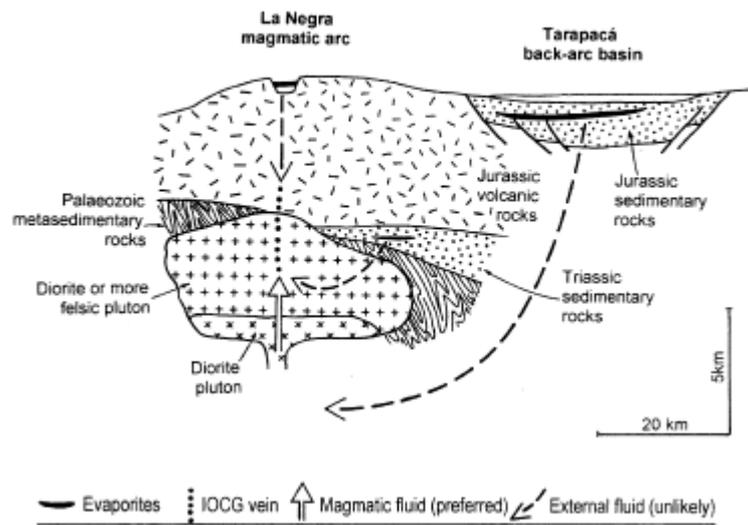


Figura 10: Veta IOCG del Jurásico en el arco de La Negra en el norte de Chile indicando posibles fuentes de fluido mineral (Sillitoe, 2003).

Sin embargo, algunos depósitos como Candelaria y Punta del Cobre se generaron cerca de plutones del Cretácico Inferior emplazados cerca del contacto entre las secuencias volcánicas del Jurásico tardío-Cretácico inferior (Grupo Punta del Cobre) y las secuencias de carbonáticas marinas del Neocomiano (Sillitoe, 2003; Figura 11).

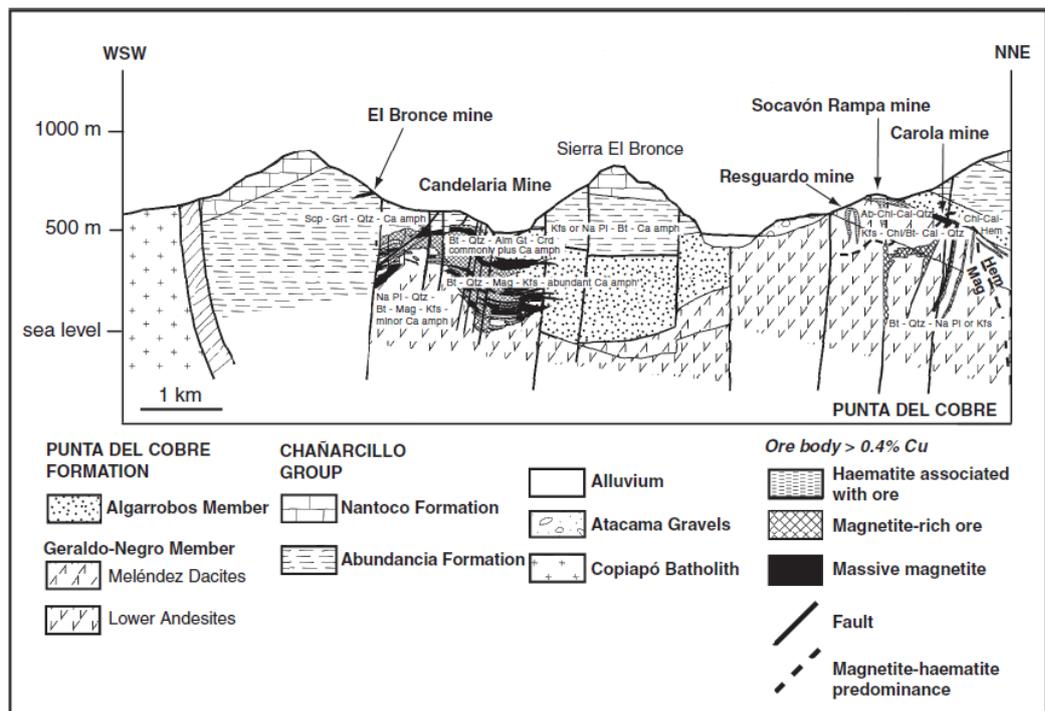


Figura 11: Perfil esquemático del distrito Candelaria-Punta del Cobre (Ridley, 2013).

El origen de los depósitos de IOCG se ha convertido recientemente en un tema de considerable debate, ya que tanto la salmuera magmática portadora de metales (Hitzman et al. 1992; Pollard 2000) como la salmuera “basinal” externa calentada por intrusiones (Barton y Johnson 1996; Hitzman 2000) son propuestos como fluidos formadores de minerales viables.

La mayoría de los depósitos de IOCG se generaron durante el desarrollo temprano del orógeno andino, cuando la corteza se extendía y atenuaba de manera variable e inusualmente caliente, y el magmatismo era relativamente primitivo además de desarrollarse en regímenes tectónicos tanto extensionales como transtensionales (Sillitoe, 2003).

2.2 Marco geológico regional

El Proyecto Margarita está ubicado cerca del límite oriental de la Cordillera Costera de la región de Atacama en el límite con la Depresión Central. En esta región, la secuencia de flujos de lava volcánica del Jurásico medio a superior (Formación La Negra; García, 1967) está cubierta por una gruesa pila de rocas volcánicas del Cretácico Inferior a Medio intermedio a ácido (Formación Punta del Cobre; Segerstrom y Ruiz, 1962). Las secuencias se presentan afectadas por una serie de intrusiones de composición básica a ácida.

Las estructuras compresionales del Cretácico temprano-tardío (Mpodozis y Allmendinger, 1992) dominan la geometría estructural del límite Cordillera Costera / Depresión Central en la mayor parte de su extensión (150 km). Aparecen a lo largo y a través de este cinturón y en una amplia gama de escalas, geometría y regímenes. Los sistemas estructurales de compresión como Paipote y Chivato Fold and Thrust Systems (Arévalo et al., 2006; Godoy et al. 1997) se ubican al sur y norte de Margarita, respectivamente, donde aparecen reactivando o plegando características extensionales del Cretácico temprano.

El sector incluye una potente secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas, de composición ácida, de la Formación Punta del Cobre, que se apilan formando los cerros Remolino y Remolino Chico, el rasgo topográfico más destacado de la región. La secuencia está intruida por dioritas y aplitas de diversas escalas (Arévalo, 2021).

2.3 Geoquímica de exploración

La geoquímica es una poderosa herramienta de exploración empírica utilizada por la gran mayoría de los programas de exploración (Agnew, 1999). La exploración geoquímica apunta a elementos anómalos, cuyas propiedades químicas controlan su dispersión geoquímica primaria, la zonificación de metales y su posterior precipitación simultánea (Levinson, 1980).

La práctica común en exploración geoquímica es identificar primero un área de interés basado en criterios geológicos y/o geofísicos y luego obtener datos geoquímicos en un área mucho más pequeña donde es probable que los parámetros sean más consistentes (Agnew, 1999).

Las anomalías geoquímicas son características geoquímicas diferentes de lo que se considera normal, las cuales pueden ser el resultado de procesos inusuales que concentran elementos particulares, acumulación o concentración de elementos mediante procesos comunes que actúan durante períodos prolongados, contaminación artificial de sitios o muestras y ruido o error analítico durante el muestreo (McQueen, 2008). Tradicionalmente en exploración geoquímica los valores bajos no son considerados tan importantes como los valores altos; esto es incorrecto, ya que los valores bajos pueden ser importantes en geoquímica de exploración porque pueden indicar zonas de alteración (agotamiento de ciertos elementos) relacionadas con acumulaciones minerales cercanas (Reimann et al. 2005).

Los principios básicos de la exploración geoquímica indican que diferentes medios de muestreo, protocolos de muestreo y técnicas analíticas dan como resultado diferentes valores de fondo, respuestas a la mineralización y la variación litológica (Agnew, 1999). Por lo tanto, la selección de un método adecuado para discriminar el background y los valores anómalos es el primer paso y el más importante en la exploración geoquímica minera (Yusta et al. 1998).

2.4 Métodos de dispersión geoquímica

Debido a la existencia de agentes movilizantes o de transporte tales como soluciones acuosas o agentes volátiles es que se produce la dispersión de los elementos. Estos encuentran la posibilidad de transportar los elementos dentro de un ambiente de movilización hasta un ambiente de dispersión donde por diversas causas físico-químicas se deposita total o parcialmente el elemento movilizado (Zapana, 2012).

2.4.1 Dispersión hipógena o primaria

Se produce en ambientes de altas presiones y altas temperaturas y cuyos productos generalmente quedan conservados en rocas ígneas y metamórficas y en algunos casos en la actividad hidrotermal (Figura 12; Flores, 2021).

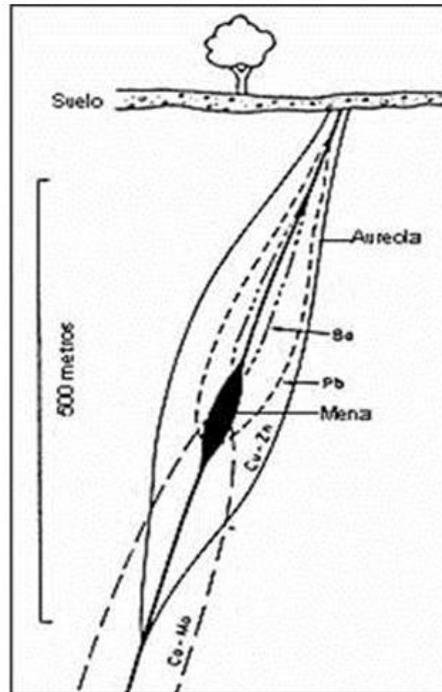


Figura 12: Ejemplo de dispersión geoquímica primaria debido a actividad hidrotermal, se indica zona de anomalía y halo de alteración.

2.4.2 Dispersión supérgena o secundaria

Ocurre en zonas de bajas presiones y temperaturas, comúnmente en o cerca de la superficie terrestre (Figura 13), los productos de esta dispersión pueden alcanzar grandes distancias desde su punto de origen (Flores, 2021).

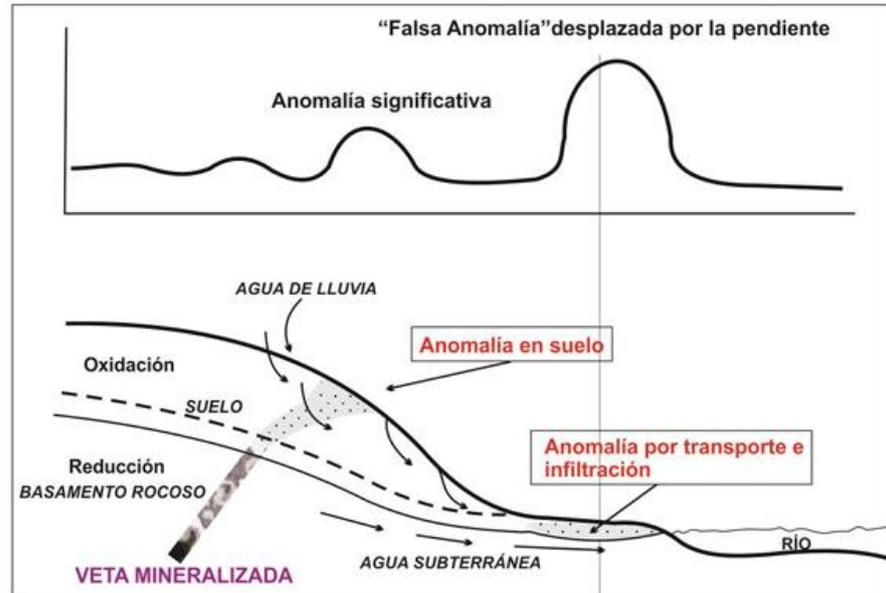


Figura 13: Representación de dispersión geoquímica secundaria, se observa anomalía de suelos y anomalía transportada por infiltración.

2.5 Elemento target y elemento pathfinder

Los elementos químicos son los principales constituyentes de los minerales y algunos grupos o pares de elementos tienden a asociarse indiferentemente a su ambiente de formación. El conocimiento de estas asociaciones lleva al concepto de elementos target y elementos pathfinder (Sacsi, 2016).

2.5.1 Elementos target

El elemento target, también denominado indicador, indicador directo o elemento blanco se refiere a uno de los elementos principales del depósito mineral, que se espera encontrar. Ej: Cu en yacimientos tipo pórfido (Cueva, 2017).

2.5.2 Elementos pathfinder

Los elementos pathfinder son guías indicadores en la búsqueda de yacimientos metálicos cubiertos, los cuales pueden ser detectados más fácilmente que los otros elementos del yacimiento (Tabla 1). También pueden ser los componentes principales o los componentes accesorios y que pueden ocurrir en la ganga y/o en la mena (Cueva, 2017).

Categoría de depósito	Componentes mayores	Elementos asociados
Depósitos Magmáticos		
Depósitos de Cromita (Bushveld)	Cr	Ni, Fe, Mg
Magnetita en Estratos (Bushveld)	Fe	V, Ti, P
Sulfuros de Cu-Ni inmiscibles	Cu, Ni, S	PGE, Co, As, Au
Óxidos de Fe-Ti inmiscibles (Lago Allard)	Fe, Ti	P
PGE-Ni-Cu en intrusiones estratificadas	PGE, Ni, Cu	Sr, Co, S
Carbonatitas con Nb-Ta (Oka)	Nb, Ta	Na, Zr, P
Pegmatitas con REE	Be, Li, Cs, Rb	B, U, Th, REE
Depósitos Hidrotermales:		
Pórfidos Cupríferos (Bingham)	Cu, S	Mo, Au, Ag, Cu, Zn
Pórfidos Molibdeníferos (Climax)	Mo, S	W, Sn, F, Cu
Skarn con Magnetita (Iron Springs)	Fe	Cu, Co, S
Skarn con Cu (Yerington)	Cu, Fe, S	Au, Ag
Skarn con Pb-Zn (Hanover)	Pb, Zn, S	Cu, Co
Skarn con W, Sn y Mo (Bishop)	W, Mo, Sn	F, S, Cu, Be, Bi
Venas con metales base	Pb, Zn, Cu, S	Ag, Au, As, Sb, Mn
Greisens con Sn - W	Sn, W	Cu, Mo, Bi, Li, F, B
Venas con Sulfuros de Sn	Sn, S	Cu, Pb, Zn, Ag, Sb
Venas con Co, Ni y Ag (Cobalt)	Co, Ni, Ag, S	As, Sb, Bi, U
Metales Preciosos Epitermales	Au, Ag	Sb, As, Hg, S, Cu
Metales Preciosos en rocas sedimentarias (Carlin)	Ag, Ag	As, Sb, Hg, W
Venas con Au (Archaen)	Au	As, Sb, W
Mercurio	Hg, S	Sb, As
Venas con U en Granitos	U	Mo, Pb, F
Uranio asociado a Disconformidades	U	Ni, Se, Au, Pd, As
Cobre en Basaltos (Tipo Lago Superior)	Cu	Ag, As, S
Sulfuros Masivos con Cu asociados a Vulcanitas	Cu, S	Zn, Au
Sulfuros Masivos con Zn-Cu-Pb asociado a Vulcanitas	Zn, Pb, Cu, S	Ag, Ba, Au, As
Formaciones de Fe con Au - As	Au, As, S	Sb
Valle del Misisipi con Pb-Zn	Zn, Pb, S	Ba, F, Cd, Cu, Ni
Uranio en Areniscas	F	Ba, Pb, Zn
Cobre en Capas Rojas	U	Se, Mo, V, Cu, Pb
Valle del Misisipi con Fluorita	Cu, S	Ag, Pb
Depósitos Tipos Sedimentarios:		
Cobre en Arcillas (Kuperschiefer)	Cu, S	Ag, Zn, Pb, Cd, Ni
Cobre en Areniscas	Cu, S	Ag, Co, Ni
Uranio en Calcáreos	U	V

Tabla 1: Elementos con afinidad geoquímica y elementos pathfinder asociados usados en exploración de depósitos (Modificado de Hurtado, 2002).

2.6 Análisis exploratorio de datos

En todos los estudios de datos geoquímicos es valioso realizar una evaluación inicial de la naturaleza de la distribución de valores, la presencia de valores atípicos y las correlaciones de elementos (McQueen, 2008). El análisis exploratorio de datos (EDA) no es un método, sino una filosofía o un enfoque para el análisis de datos robusto (Tukey, 1977) el cual consiste en una colección de herramientas estadísticas descriptivas y, en su mayoría, gráficas destinadas a obtener el máximo conocimiento de un conjunto de datos, descubrir la estructura de los datos, definir variables significativas en los datos, determinar valores atípicos y anomalías, sugerir y probar hipótesis, desarrollar modelos prudentes, e identificar el mejor tratamiento e interpretación posibles de los datos (Carranza, 2009) y su objetivo es reconocer patrones de datos "potencialmente explicables" (Good, 1983).

Para seleccionar los métodos más adecuados para el tratamiento de datos geoquímicos es necesario comprender lo siguiente (Reimann, 2005):

- Los datos son espacialmente dependientes (cuanto más cerca estén dos sitios de muestra, mayor será la probabilidad de que las muestras muestren resultados analíticos comparables; sin embargo, todas las pruebas estadísticas clásicas asumen muestras independientes).
- En cada sitio de muestreo, una multitud de procesos diferentes influirán en el valor analítico medido, por lo tanto, para la mayoría de las pruebas estadísticas es necesario que las muestras provengan de la misma distribución.
- Los datos geoquímicos, como muchos de los datos de las ciencias naturales, son imprecisos, contienen incertidumbre que se introduce inevitablemente en el momento del muestreo, la preparación de muestras y los análisis.

Por otro lado, los supuestos en el análisis de datos estadísticos clásicos son rigurosos y requieren que los datos se hayan recopilado en condiciones bastante controladas (Carranza, 2009).

En el pasado, una forma sencilla de definir estadísticamente una anomalía en una sola población de datos distribuidos normalmente ha sido considerar los valores fuera de 2 desviaciones estándar de la media (promedio estadístico) como anómalos (Hawkes y Webb, 1962), no obstante, los conjuntos de datos geoquímicos rara vez poseen una sola población (Figura 14) o representan una distribución normal (McQueen, 2008).

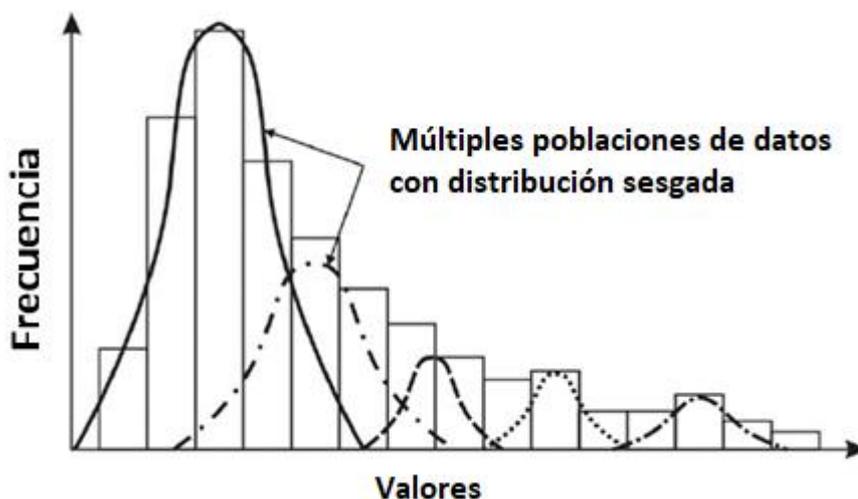


Figura 14: Histograma de frecuencia y curvas de frecuencia para un conjunto de datos con múltiples poblaciones.

2.6.1 Estadística univariable

En las etapas iniciales del modelado de anomalías geoquímicas, se debe realizar una observación de cada conjunto de datos para obtener impresiones sobre la estructura de datos, el comportamiento, las densidades locales, gaps y, por supuesto, los valores atípicos. El estudio cuidadoso de las distribuciones de densidad empírica de conjuntos de datos unielementales es muy importante en el análisis y modelado de anomalías geoquímicas (Carranza, 2009).

Los métodos de estadísticas univariable se pueden utilizar para organizar y extraer información de un conjunto de datos de valores para un solo elemento (McQueen, 2008). Las estadísticas descriptivas y los gráficos estadísticos son herramientas útiles para "observar" las distribuciones de densidad empírica de conjuntos de datos unielementales (Carranza, 2009).

Entre los varios tipos de herramientas gráficas del EDA, el diagrama de densidad, el diagrama de dispersión unidimensional y los boxplot (Figura 15) se utilizan con mayor frecuencia en el análisis de datos geoquímicos unielementales (Howarth & Turner, 1987). La combinación de estos tres gráficos utilizados en el análisis exploratorio (EDA) con un histograma proporciona una mejor comprensión del comportamiento y la estructura de los datos univariados que únicamente con un histograma (Carranza, 2009).

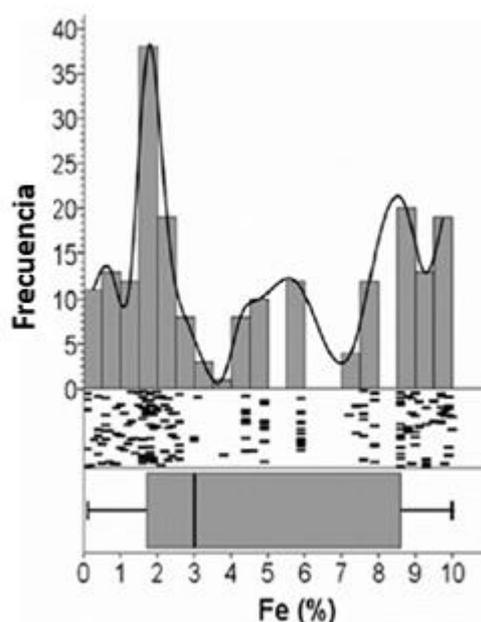


Figura 15: Histograma, diagrama de densidad, diagrama de dispersión unielemental y box plot representando distribución empírica de Fe en muestras de suelo (Extraído de Carranza, 2009).

- Histograma

Es una gráfica de la distribución de un conjunto de datos que muestra la acumulación o tendencia, la variabilidad o dispersión y la forma de la distribución. Un histograma (Figura 16) es una gráfica adecuada para representar variables continuas, aunque también se puede usar para variables discretas. Es decir, mediante un histograma se puede mostrar gráficamente la distribución de una variable cuantitativa o numérica.

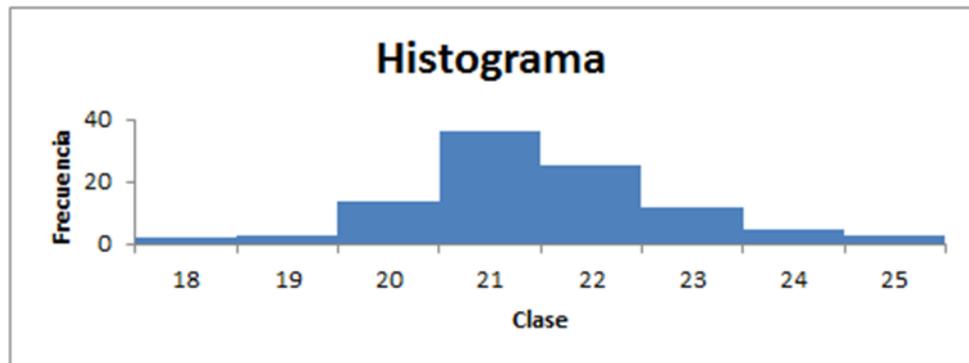


Figura 16: Ejemplo de histograma de frecuencia

- Box plot

Los box plot muestran la mediana (valor medio o percentil 50), una caja con límites superior e inferior definidos por los valores de los percentiles 75 y 25 respectivamente (es decir, valores de los cuartiles superior e inferior), un límite interior definido como 1,5 el rango intercuartil (IQR) extendiéndose hacia los valores máximos y mínimos y los bigotes extendiéndose a los valores máximos y mínimos (Figura 17) (Tukey, 1977).

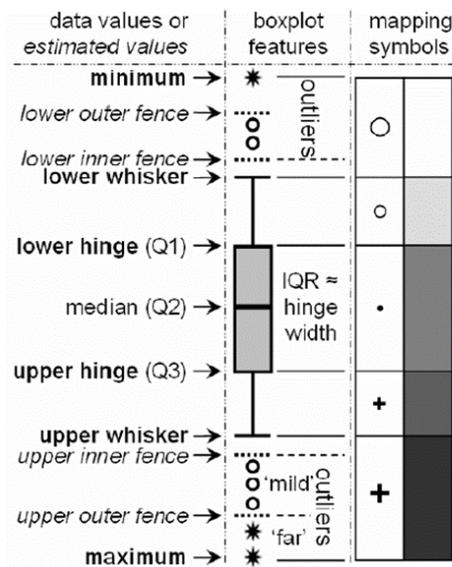


Figura 17: Ejemplo de box plot que representa las características de un conjunto de datos univariados (Extraído de Carranza, 2009).

Un *box plot* se crea ordenando primero los valores de datos del mínimo al máximo y determinando la mediana, quedando así los datos divididos en dos partes iguales. Luego contando hasta la mitad desde el mínimo hasta la mediana y desde el máximo hasta la mediana, se determinan el *lower hinge* (LH) y el *upper hinge* (UH) respectivamente, dividiendo los datos en cuatro partes iguales. La diferencia absoluta entre el *lower hinge* y el *upper hinge* define el rango intercuartil (IQR) (ecuación 1).

$$IQR = |\text{lower hinge} - \text{upper hinge}| \quad \text{ec. 1}$$

Así, un *box plot* resume la estadística en 5 números (mínimo, *lower hinge*, mediana, *upper hinge* y máximo) y describe las características más importantes de un conjunto de datos univariados (Tukey, 1997).

Los valores *lower inner fence* (LIF) (ecuación 2) y *lower outer fence* (LOF) (ecuación 3) se determinan algebraicamente de la siguiente manera:

$$LIF = LH - (1,5 \times IQR) \quad \text{ec. 2}$$

$$LOF = LH - (3 \times IQR) \quad \text{ec. 3}$$

Los valores *upper inner fence* (UIF) (ecuación 4) y *upper outer fence* (UOF) (ecuación 5) se determinan algebraicamente de la siguiente manera:

$$UIF = LH + (1,5 \times IQR) \quad \text{ec. 4}$$

$$UOF = LH + (3 \times IQR) \quad \text{ec. 5}$$

Los conjuntos de datos geoquímicos rara vez representan una sola población o distribución, suelen ser espacialmente dependientes y en cada sitio de muestreo se evidencian una variedad de procesos diferentes que han influido en la abundancia de elemento (McQueen, 2008). Una vez que se han identificado los parámetros que se relacionan con cambios significativos en el *background*, estos se pueden usar para dividir los datos geoquímicos en subconjuntos. Los *box plot* de cada uno de estos subconjuntos (Figura 18) proporcionan un enfoque visual útil para cuantificar el grado en que los niveles de percentiles varían entre cada grupo (Agnew, 1999).

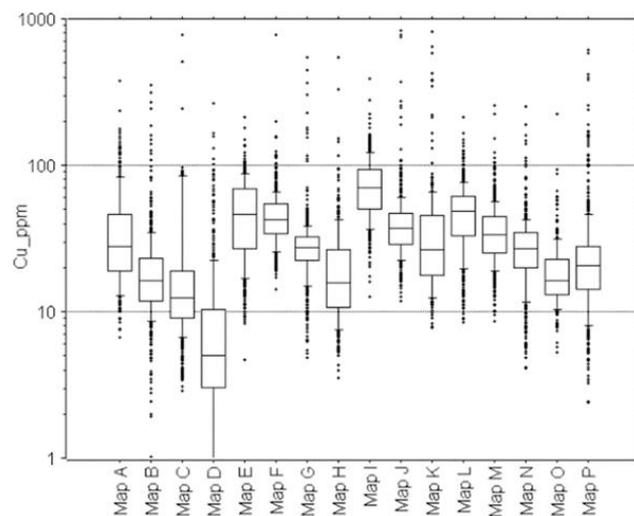


Figura 18: Comparación de box plot de Cu (ppm) de 16 poblaciones de datos (Extraído de Agnew, 1999)

Hay varios factores incontrolables que influyen en los valores y variaciones del contenido de elementos en la superficie y dentro de la Tierra (Carranza, 2009) y en algunos casos, las diferencias observadas entre los subconjuntos pueden estar realmente relacionadas por la geología del sector, por lo que se enfatiza que la comparación de subconjuntos de datos no debe basarse únicamente en cambios de percentiles (Agnew, 1999).

2.6.2 Definición de background y threshold

La detección de datos atípicos y comportamiento inusual de los datos es una de las principales tareas en el análisis estadístico de datos geoquímicos (Reimann et al. 2005).

En la Conferencia Internacional de Sydney en 1976, el threshold se definió como un valor determinado por los analistas geoquímicos de acuerdo con algunos análisis y resultados de ensayos de muestreo y posteriormente se propuso una

definición general señalando que el threshold es el valor que puede distinguir entre datos normales y anormales y su determinación está directamente relacionada con la identificación de información sobre la mineralización (Chen et al., 2019). Existen diferentes procesos y métodos para determinar valores anómalos en datos geoquímicos, el más clásico es la estimación del background como la media ± 2 la desviación estándar de un conjunto de datos la cual se basa en estadística clásica determinando valores arbitrarios (Carranza, 2009). Por otro lado, otros métodos como el box plot y la media ± 2 MAD (median absolute deviation) son más adecuados para la estimación del background y threshold de datos geoquímicos (Reimann et al., 2005).

En la práctica, el uso del box plot para la estimación de background y threshold y mostrar la estructura de datos espaciales en un mapa ha demostrado ser una herramienta poderosa para identificar los procesos geoquímicos clave detrás de una distribución de datos (Reimann et al., 2005).

Basándose en el box plot (Figura 9) un conjunto de datos geoquímicos para exploración puede separarse en cinco clases: (1) mínimo – LW; (2) LW – LH; (3) LH – UH; (4) UH – UW; y (5) UW- máximo (Carranza, 2009).

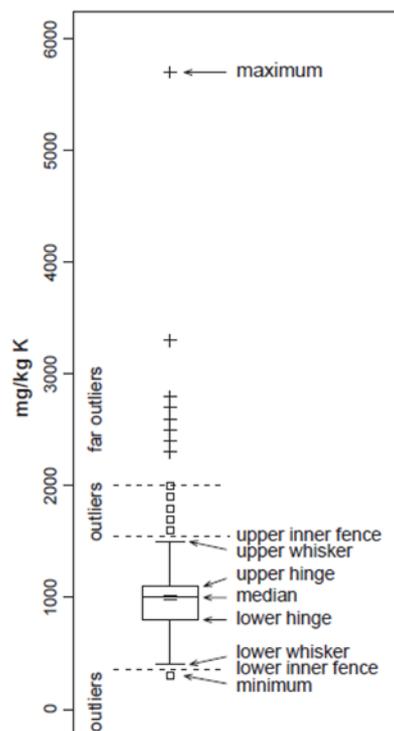


Figura 19: Box plot para concentraciones de potasio (K%) en suelos del área de Kola (Extraído de Reimann et al., 1998).

El UIF generalmente se considera como threshold que separa el background y las anomalías (Bounessah y Atkin, 2003; Reimann et al., 2005), aunque el UOF

también se puede utilizar como threshold (Yusta et al., 1998). Los datos sobre los inner fences se consideran valores atípicos, los datos entre los inner fences y outer fences se consideran valores atípicos "leves", mientras que los datos sobre los outer fences se consideran valores atípicos "lejanos" o extremos (Figura 19), es decir, valores muy inusuales (Kotz & Johnson, 1985). Sin embargo, un valor estimado que representa el UIF puede no ser realmente parte de un conjunto de datos geoquímicos de exploración, por lo que los valores atípicos más allá del UW representarían las anomalías. Por lo tanto, los valores de datos en la clase UH-UW (como máximo el 25% de un conjunto de datos) se pueden considerar high background, los valores de datos en la clase LH-UH (como máximo el 50% de un conjunto de datos) son normal background, los valores de datos en las clases LW-LH (como máximo el 25% de un conjunto de datos) se consideran low background y los valores de datos en la clase LW-mínimo son extreme low background.

2.6.3 Estadística multivariable

Las anomalías geoquímicas se expresan comúnmente en más de un elemento, lo cual se debe a que la fuente o proceso que ha generado la anomalía se encuentra relacionada a una asociación determinada de elementos (McQueen, 2008), por lo tanto, la combinación del análisis estadístico univariable y multivariable con los controles geológicos y estructurales de la mineralización proveen una base fundamental para la exploración de nuevos depósitos (Nejadhaddad et al., 2017).

Se puede utilizar una variedad de métodos estadísticos multivariados para evaluar las relaciones dentro de conjuntos de datos de múltiples elementos, entre los cuales se destacan (McQueen, 2008):

1. *Scatter plot*: Gráficos bivariados que comparan pares de elementos.
 2. Matriz de correlación: Determinación de correlación de pares de elementos a través de regresiones lineales.
 3. *Cluster analysis*: Agrupación jerárquica de elementos en un conjunto de datos con diferentes grados de correlación de su abundancia.
 4. Análisis de componentes principales (PCA): Utilizado para agrupar elementos en asociaciones.
- Scatter plot

Los *scatter plot* o diagramas de dispersión (Figura 20) son útiles para la exploración visual de las relaciones entre elementos y sus datos deben ser

transformados y no deben presentar valores censurados para evitar la interpretación errónea de resultados (Carranza, 2009).

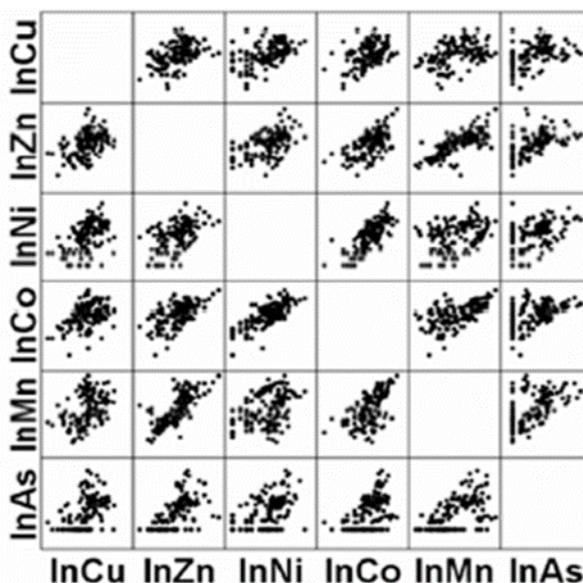


Figura 20: Diagramas de dispersión unielementales para muestras de suelo del distrito Aroroy (Filipinas) (Extraído de Carranza, 2009).

- Matriz de correlación

La interpretación visual de un diagrama de dispersión se puede ayudar mediante la estimación de los coeficientes de correlación (Tabla 2) y de los valores de covarianza entre conjuntos de datos unielementales para obtener impresiones sobre la relación de los valores de los datos y la variabilidad mutua de los valores. Las estimaciones de los coeficientes de correlación y los valores de covarianza se ven afectados por la presencia de valores censurados, valores atípicos y poblaciones múltiples, por lo tanto, es necesario hacer una transformación de los datos antes de realizar la matriz de correlación (Carranza, 2009).

	Cu	Zn	Ni	Co	Mn
Zn	0.342				
Ni	0.560	0.537			
Co	0.396	0.589	0.754		
Mn	0.268	0.730	0.440	0.661	
As	0.341	0.414	0.496	0.391	0.462

Tabla 2: Coeficientes de correlación de datos transformados (loge) de muestras de suelo del distrito Aroroy (Filipinas) (Extraído de Carranza, 2009)

Para un par de variables, el valor r_{x-y} puede tomar cualquier valor entre -1 y +1. El coeficiente es positivo si existe relación directa entre las variables y negativo si la relación es inversa. Un valor de ± 1 indica una correlación lineal perfecta entre las variables, mientras un valor 0, refleja que no existe relación lineal entre ellas. El

- Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA es uno de los métodos de análisis multivariable más comunes utilizados para determinar las asociaciones de elementos (Howarth & Sinding-Larsen, 1983) y su objetivo principal es la reducción de datos para determinar nuevas variables más eficientes a través del análisis de las correlaciones o covarianzas para identificar las relaciones entre los distintos elementos (Nejadhaddad et al., 2017).

Los datos geoquímicos suelen formar parte de una composición total (ej: ppm, porcentaje en peso) y están sujetos a diversos problemas en el análisis estadístico multivariado como la influencia de los valores atípicos o las diversas distribuciones de datos que pueden presentarse (Filzmoser et al., 2009). Por lo tanto, para disminuir la asimetría de los datos, es necesaria la transformación de los datos a una relación logarítmica antes de poder realizar el PCA (Grunsky et al., 2014)

Este método comienza con la transformación o estandarización de los datos para posteriormente determinar la matriz de correlación o matriz de covarianza de datos para un número (n) de variables y los componentes principales (PC) se determinan sin ningún supuesto estadístico (Carranza, 2009).

Por lo tanto, el PCA está orientado a la varianza y da como resultado un número de PC no correlacionados (iguales a “n” variables de entrada) que en conjunto representan la varianza total de todas las variables de entrada (Tabla 3). El primer PC representa la proporción más alta de la varianza total (y por lo tanto representa la varianza 'más común') de los datos multivariados, mientras que el n-ésimo (o último) PC representa la menor proporción de la varianza total (y por lo tanto representa la varianza 'más específica') de los datos multivariados (Carranza, 2009).

	Cu	Zn	Ni	Co	Mn	As	% of Variance	Cum. % of variance
PC1	0.528	0.767	0.846	0.853	0.743	0.551	52.763	52.763
PC2	0.621	-0.403	0.275	-0.136	-0.488	0.413	17.528	70.292
PC3	-0.470	-0.120	-0.060	-0.074	0.086	0.707	12.515	82.806
PC4	0.319	0.184	-0.336	-0.370	0.286	0.141	8.114	90.920
PC5	0.104	-0.433	-0.168	0.249	0.301	-0.030	6.329	97.249
PC6	0.049	0.113	-0.254	0.223	-0.173	0.074	2.751	100.000

Tabla 3: Componentes principales de subconjuntos de datos transformados a \log_e en el distrito Aroroy, Filipinas (Extraído de Carranza, 2009)

El PCA es favorable en los casos de análisis de datos geoquímicos en el que la gama de elementos que representan la varianza 'más común' a la 'más específica' variación en los conjuntos multielementales es de interés para permitir el

reconocimiento de variaciones entre elementos que reflejan los diversos procesos geoquímicos en un área de estudio (Reimann et al., 2005).

Los dos primeros PC (PC1 y PC2) juntos explican la varianza "más común" en los datos multivariados (Tabla 2) y, por lo tanto, representan asociaciones de elementos múltiples que reflejan los principales procesos geoquímicos en el área de estudio y cada uno de los últimos PC explica las variaciones específicas en los datos multivariados (Tabla 3) y representa asociaciones de elementos múltiples que reflejan los procesos geoquímicos menores (o sutiles) en el área de estudio o errores en los datos multivariados (Carranza, 2009).

Finalmente, se debe combinar el PCA con la paragénesis mineral (Figura 22) para investigar las relaciones multielementales de los datos (Jolliffe, 2002).

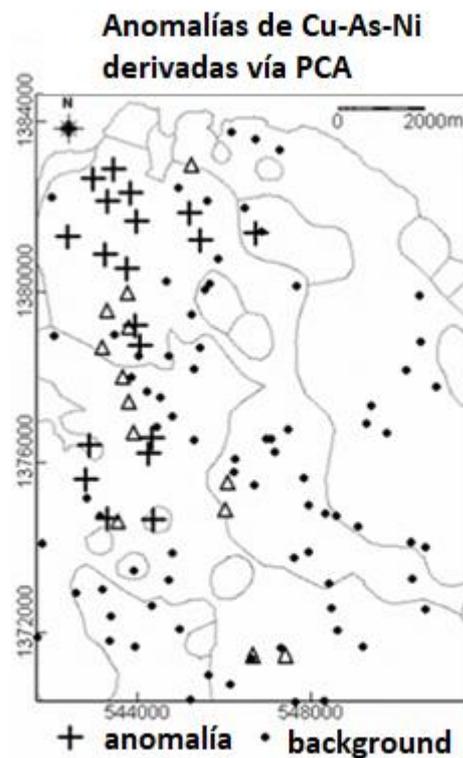


Figura 22: Anomalías integradas de Cu-As-Ni como resultado de PCA de stream sediment en el distrito Aroroy, Filipinas (Extraído de Carranza, 2009).

2.7 Cartografía geoquímica

2.7.1 Aplicación SIG

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten a los geólogos una serie de significativas ventajas para archivar, visualizar, manipular, integrar y presentar datos geoquímicos pudiendo ser utilizados para la exploración geoquímica y además permitiendo el análisis y comparación visual de grandes volúmenes de datos (Harris et al., 2001).

Las muestras geoquímicas tienen una ubicación específica y un número de atributos que la describen, pudiendo ser almacenados en la base de datos del SIG (Harris et al., 2001)

La cartografía geoquímica es una herramienta invaluable tanto para la identificación inicial de cambios significativos en el background como para el reconocimiento de patrones de anomalías, enriquecimiento y empobrecimiento en todas las escalas (Agnew, 1999).

Los SIG en cartografía geoquímica se utilizan para (Harris et al., 2001):

1. Visualizar datos geoquímicos
2. Separar concentraciones geoquímicas en poblaciones anómalas y normales
3. Identificación de firmas litológicas en zonas superficiales
4. Identificar e interpretar las anomalías producidas por los procesos de alteración y mineralización
 - Mapas de puntos y círculos proporcionales

Los mapas de puntos y círculos proporcionales (Figura 23), en los cuales el tamaño del símbolo es proporcional a la concentración del elemento son una excelente herramienta para visualizar e interpretar la variación espacial de las concentraciones de los elementos target o pathfinder (Harris et al., 2001).

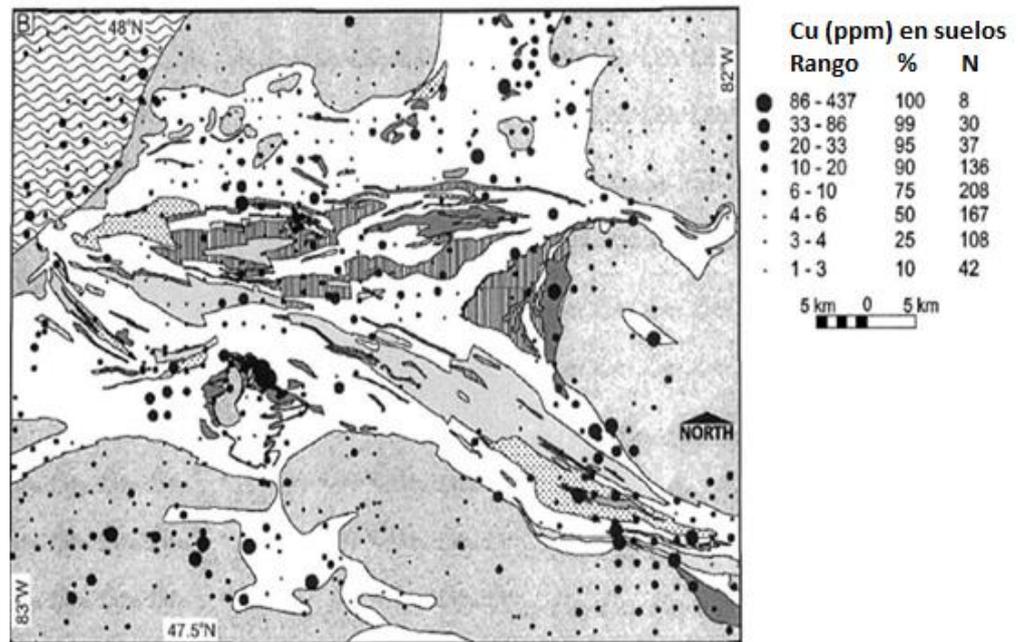


Figura 23: Mapa de puntos y círculos proporcionales de Cu (ppm) en muestras de suelo de Swayze greenstone belt, Ontario, Canada (Extraído de Harris et al., 2001).

- Mapas de interpolación

Los datos geoquímicos pueden ser interpolados luego de responder las siguientes preguntas (Harris et al., 2001):

1. ¿Los datos puntuales se comportan como una variable aleatoria continua donde el valor medio es estacionario en toda el área de interés?
2. ¿Los datos se comportan de manera isotrópica o anisotrópica?
3. ¿Es el muestreo puntual lo suficientemente denso como para garantizar una interpolación efectiva?

Luego de responder estas preguntas se pueden realizar los mapas de interpolación (Figura 24), los cuales establecen una zona de influencia determinada geoestadísticamente utilizando variogramas alrededor de las muestras geoquímicas, siendo una gran ventaja para la visualización de los datos (Harris et al., 1999).

El comportamiento espacial de los datos se puede determinar mediante el análisis de un variograma. Los variogramas son extremadamente útiles, ya que proporcionan información como el radio máximo de influencia alrededor de cada punto, que se puede utilizar para establecer el radio de búsqueda (zona de influencia) para varios algoritmos de interpolación (Harris et al., 2001).

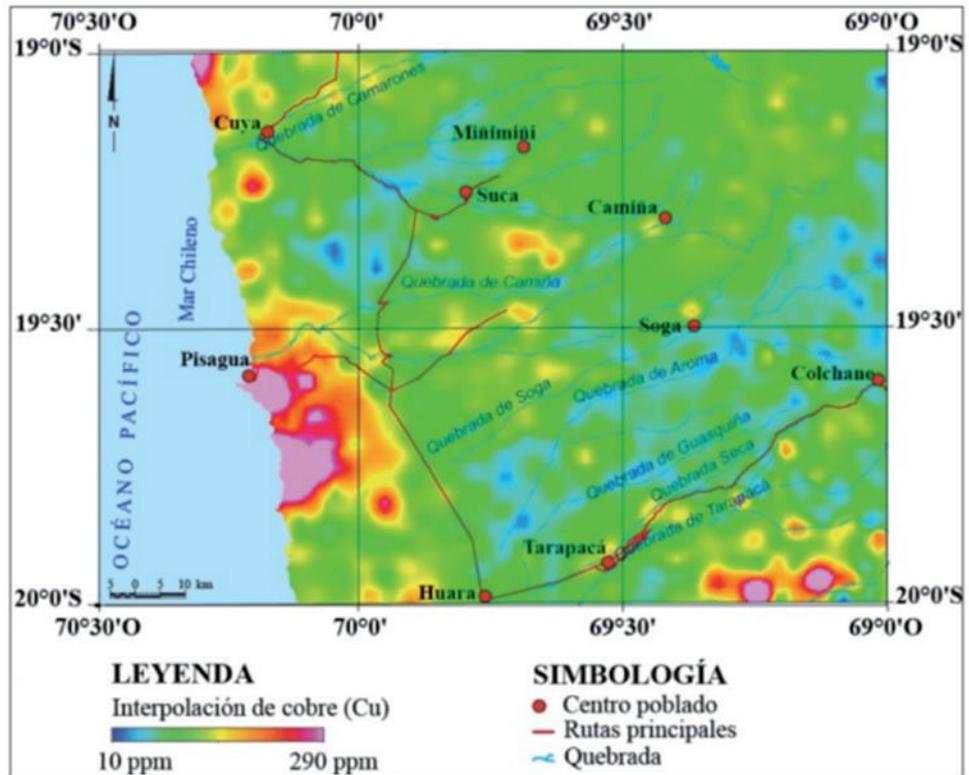


Figura 24: Mapa de interpolación de Cu (ppm) de sedimentos de la Hoja Pisagua (Extraído de Astudillo et al., 2015)

2.8 Fluorescencia de rayos X

Es una técnica analítica no destructiva utilizada para determinar la composición química de los materiales. La XRF ocurre cuando se emite una radiografía fluorescente (o secundaria) de una muestra que está siendo excitada por una fuente de rayos X primaria. Debido a que esta fluorescencia es exclusiva de la composición elemental de la muestra (Figura 25), XRF es una tecnología excelente para el análisis cualitativo y cuantitativo de la composición del material (Narváz et al. 2014).

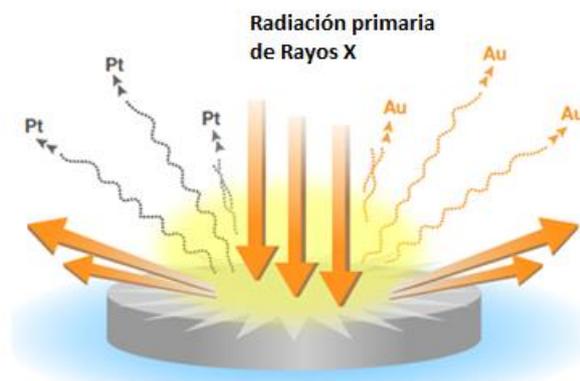


Figura 25: Radiación primaria y determinación de elemento mediante radiación secundaria (Narváz et al. 2014).

Cada uno de los elementos presentes en una muestra produce un conjunto único de rayos X característicos que es una "huella digital" para ese elemento específico.

La técnica analítica por fluorescencia de rayos X, por su rapidez y por evitar el tratamiento químico preliminar de las muestras, presenta características excepcionales para ser aplicada a los casos más complejos, difíciles de resolver por otras técnicas analíticas convencionales (Polonio et al. 1960).

a) Limitaciones:

El análisis de elementos livianos con XRF portátil puede ser un desafío porque los rayos X fluorescentes de estos elementos ($Z < 18$) son menos energéticos y se atenúan en gran medida a medida que los rayos X atraviesan el aire, por lo que se recomienda encarecidamente la preparación de las muestras (Thermo scientific, 2021).

b) Efectos de mejora:

Algunos rayos X fluorescentes tienen más energía que la energía de enlace de otros elementos presentes en la muestra, por lo que su energía excitará esos otros elementos. Estos elementos darán un mayor retorno de señal al detector, es decir, "mejorando" la lectura (Polonio et al. 1960).

c) Efectos de absorción:

La radiografía fluorescente no llega al detector ya que es dispersada o absorbida por otros elementos presentes en la muestra, por lo que la señal es más débil (Polonio et al. 1960).

d) Efectos de muestra:

La superficie del material que se analiza no es representativa de toda la muestra (tamaño de partícula, falta de homogeneidad, contaminación de la superficie, etc.) La XRF es una técnica de análisis de superficie, por lo que la falta de homogeneidad o contaminación sesgará los resultados (Polonio et al. 1960).

e) Calibración:

Para medir muestras de composición química desconocida en las que las concentraciones de elementos ligeros y pesados pueden variar desde partes por millón (ppm) hasta niveles porcentuales altos, el análisis de parámetros fundamentales (FP) se utiliza para compensar simultáneamente una amplia variedad de efectos geométricos (incluidos pequeños y muestras de formas extrañas), además de efectos de mejora y absorción de rayos X, así como superposiciones espectrales. FP es la herramienta de análisis preferida para minería y exploración, análisis de plásticos,

análisis de metales preciosos y todas las aplicaciones de prueba de aleaciones de metales (Thermo scientific, 2021).

2.8.1 Equipo portátil de fluorescencia de rayos X

El atractivo del análisis in situ, rápido y no destructivo de materiales geológicos utilizando instrumentos portátiles que funcionan con baterías, combinado con límites de detección en el rango bajo de ppm para muchos elementos, ha dado como resultado la adopción generalizada de fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) en la industria de exploración minera en los últimos años (Hall et al. 2015).

Una muestra se irradia con rayos X de alta energía desde un tubo de rayos X controlado (Figura 26). La energía hace que se expulsen electrones de la capa interna. Los electrones de la capa exterior llenan las vacantes y se emiten rayos X fluorescentes (Thermo scientific, 2021).

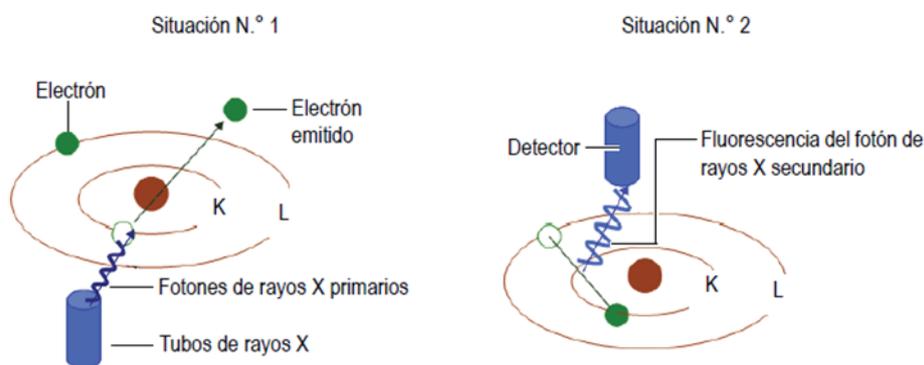


Figura 26: Explicación gráfica del principio de fluorescencia (Thermo scientific, 2021).

Los rayos X fluorescentes entran en el detector y envían pulsos electrónicos al amplificador. El preamplificador amplifica las señales y las envía al Procesador de señales digitales (DSP) para recopilar y digitalizar los eventos de rayos X en canales de energía. A continuación, los "recuentos" de cada canal (datos espectrales) se envían a la CPU principal para su procesamiento (Thermo scientific, 2021).

Mediante algoritmos, la unidad central de procesamiento (CPU) analiza los datos espectrales y determina la concentración de cada elemento presente (Figura 27). Los datos de composición y el grado de aleación identificado se muestran en tiempo real y se almacenan en la memoria para su posterior recuperación o descarga a una PC externa (Thermo scientific, 2021).

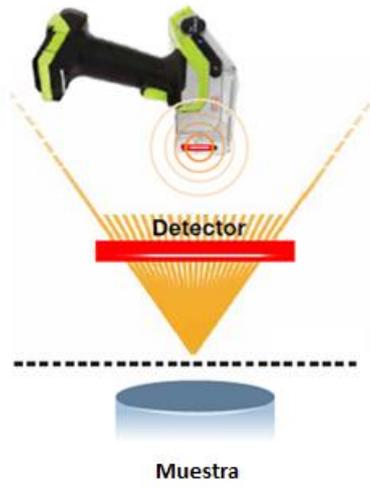


Figura 27: Demostración de toma de muestra con equipo pXRF.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Con el objetivo de cumplir los objetivos de la presente tesis, se llevaron a cabo recopilaciones bibliográficas, protocolos de muestreo, campañas de terreno, muestreo de suelos y análisis geoquímicos (pXRF), los cuales se detallan a continuación.

3.1 Recopilación bibliográfica

En esta etapa se realizó una recopilación acerca de la geología regional del área de estudio y tipos de yacimientos con el objetivo de conocer de manera general la geología del proyecto.

3.2 Creación de base y estrategia de muestreo

En una primera etapa se recolectaron a lo largo de todo el proyecto 251 muestras regulares de suelo a partir de una malla predefinida de 200 metros con forma romboidal (Figura 28).

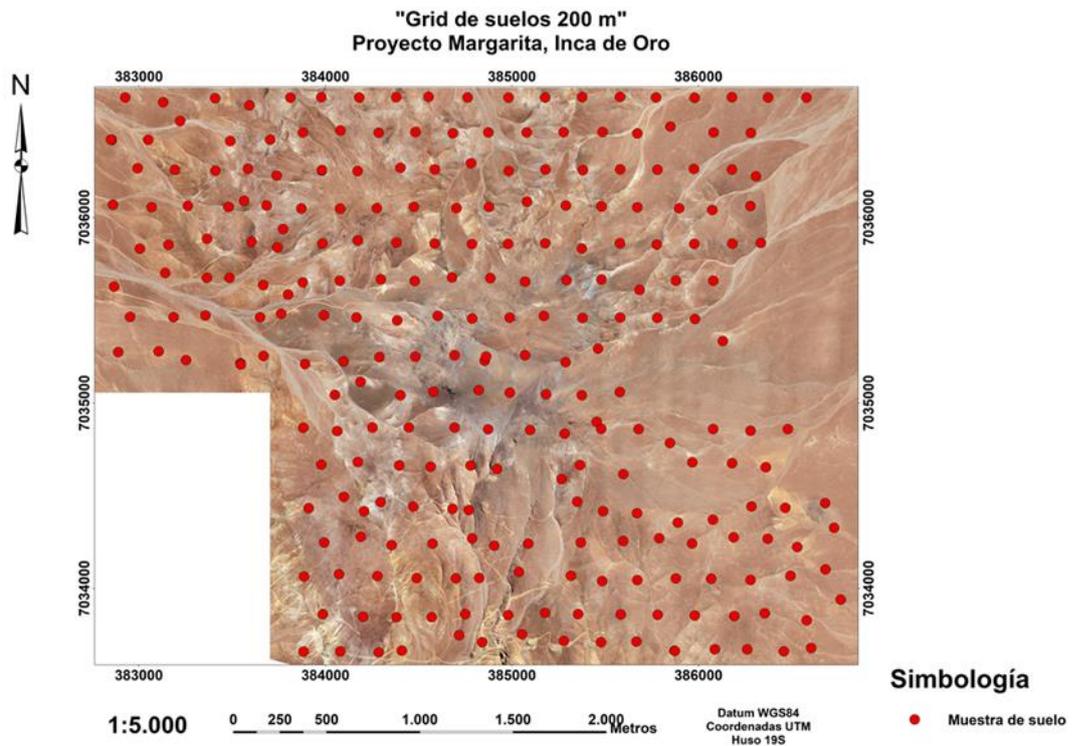


Figura 28: Muestras de suelo de malla 200 x 200 recolectadas en primera campaña de muestreo.

Posteriormente en base a los resultados geoquímicos y a la base geológica se definieron dos zonas objetivo en las cuales se realizó una segunda campaña de muestreo cada 100 metros (Figura 29) en la cual se recolectaron 94 muestras en el sector de Cototuda y 39 muestras en el sector Norte del área de estudio.

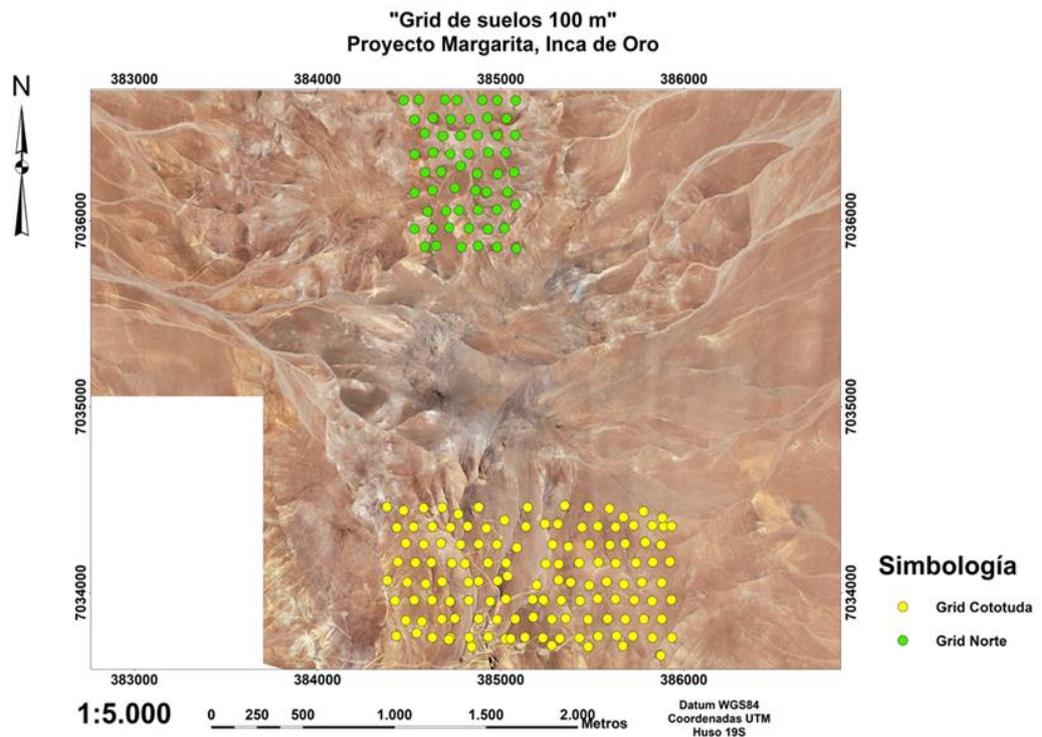


Figura 29: Muestras de suelo en malla 100 x 100 m recolectadas en segunda campaña de muestreo.

3.3 Protocolo de muestreo

Al definir la ubicación de la muestra, se excavó un hoyo en la superficie hasta visualizar el horizonte B o *bedrock* del suelo aproximadamente a 30 cm de profundidad (Figura 30).

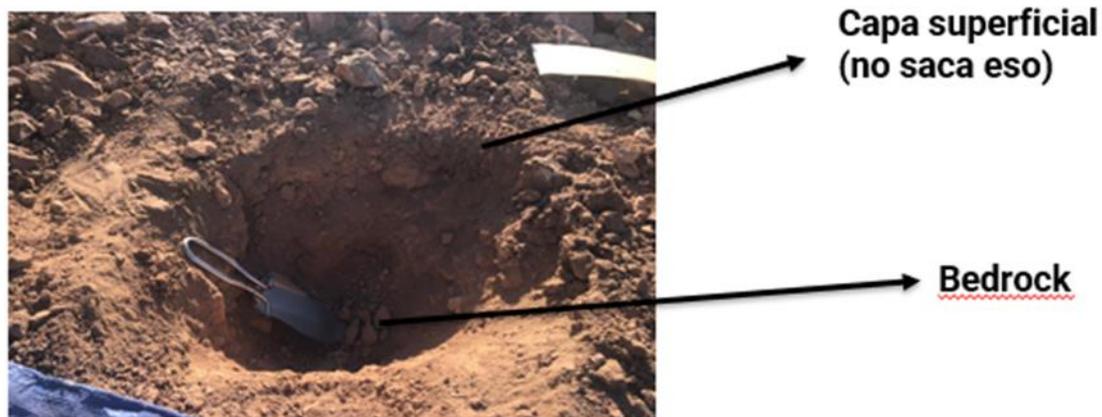


Figura 30: Procedimiento de toma de muestra de suelo.

El material recolectado se tamizó en malla #30 (Figura 31) para recoger aproximadamente 200 g, los cuales pasan por un proceso de cuarteo previo a su almacenamiento en bolsas marcadas con el código de muestra. Además, en el sitio de cada muestra se describe la litología, alteración y mineralización junto con una breve descripción del sector lo cual se digitaliza en una tablet con la aplicación FULCRUM que a la vez determina la ubicación exacta del punto de muestreo.



Figura 31: Recolección y tamizado de muestra.

3.4 Campaña de recolección de muestras

La campaña de muestreo se realizó en los meses de junio, julio y agosto de 2021 la cual consistió en el muestreo de suelos además del reconocimiento geológico del área de estudio.

3.5 Preparación mecánica de muestras

En laboratorio, el material recolectado se colocó en una copa porta muestra (Figura 32) procurando que se compacte y luego fue sellado con una lámina de propileno y etiquetada con la identificación de la muestra.



Figura 32: Preparación mecánica y codificación de muestras.

3.6 Análisis geoquímicos

Se tomaron lecturas geoquímicas directas con el equipo de fluorescencia de rayos X marca VANTA modelo SERIES M mediante el método de 3 haces, siendo 50 segundos los dos primeros y 10 segundos el último, logrando cuantificar elementos mayores y trazas. La lectura se realizó en la sección transversal de la membrana de propileno de la copa (Figura 33), tratando de que se acerque lo más posible la muestra con la ventana de medición del instrumento.



Figura 33: Sellado y análisis de muestras en equipo pXRF.

Luego de la medición el instrumento mostrará las concentraciones de elementos detectados en la muestra (Figura 34).



Figura 34: Interfaz equipo pXRF VANTA con resultados de análisis geoquímicos.

3.7 Aseguramiento de calidad y control de la calidad (QA/QC)

El aseguramiento y control de calidad en los análisis geoquímicos consistió en la recolección de duplicados de campo (Figura 35) para medir la precisión del equipo pXRF y muestras estándar (Figura 35) que se enviaron a laboratorio de ALS para análisis ICP 4 ácidos con el objetivo medir la exactitud del método. La recolección se definió cada 20 puntos comenzando en la muestra A104009 para los duplicados de campo y en la muestra A104021 para los estándares.

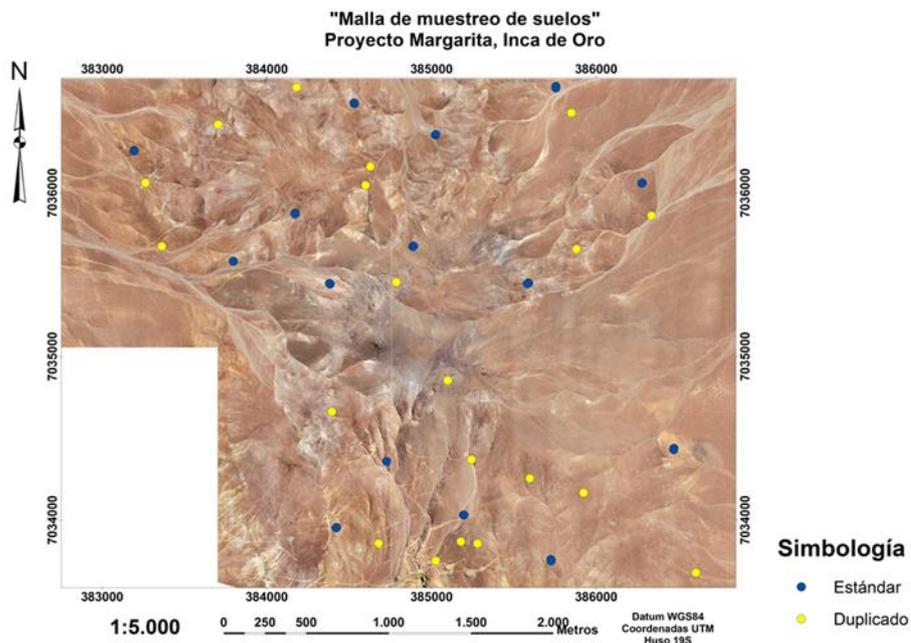


Figura 35: Duplicados de campo para análisis pXRF y estándar para análisis ICP-MS.

3.8 Tratamiento de los datos. Software Arcmap y Minitab

Los datos geoquímicos fueron almacenados en un archivo Excel donde se registró el código de la muestra, norte, este, altitud, litología, alteración, mineralización y la concentración de los elementos medidos. Posteriormente fueron procesados en el software Minitab para obtener los parámetros estadísticos univariados y multivariados; luego en el software ArcMap 10.8.1 se representó visualmente la información recolectada.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS GEOLÓGICOS DEL PROYECTO MARGARITA

4.1 Unidades litológicas

Se levantó un mapa geológico (Figura 36) en el cual se definieron diversas unidades intrusivas, subvolcánicas y volcánicas. Además, se identificaron las estructuras tectónicas presentes en el sector. A continuación, se detallan las unidades:

Mapa geológico-estructural del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile

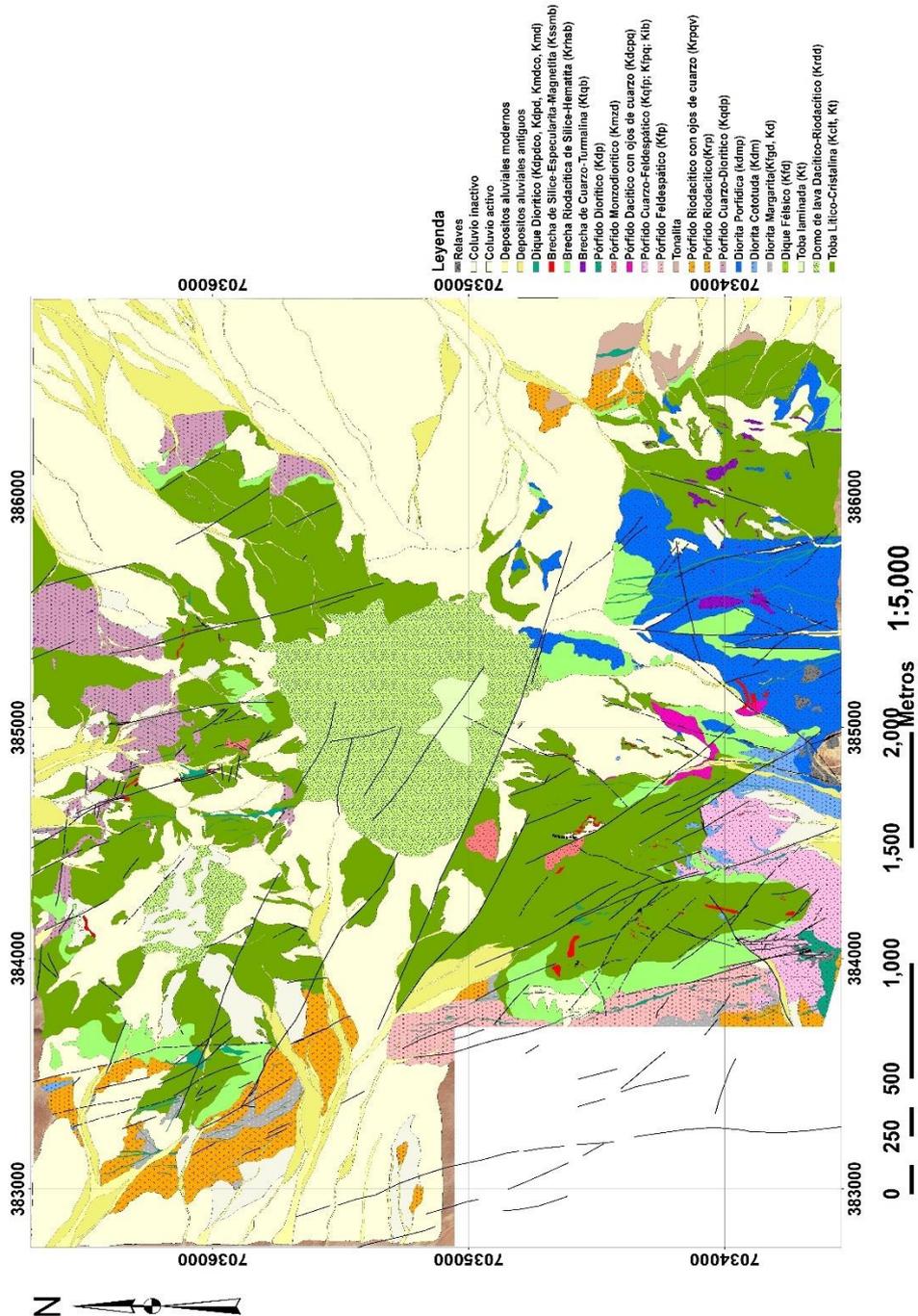


Figura 36: Mapa geológico-estructural del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile

- Tobas lítico-cristalinas:

Esta unidad forma parte del basamento volcánico pre-mineral del Proyecto Margarita donde las rocas afloran formando pendientes suaves en la falda media de los cerros Remolino y Remolino Chico (Figura 37.a). La mayoría de los afloramientos están bien estratificados (Figura 37.a), consisten en tobas ricas en cristales de color rojo a blanco con un componente lítico menor, inmersos en una matriz cinerítica (Figura 37.b). Las rocas presentan claros rasgos piroclásticos finos soldados de composición riolítica a riodacítica, con “astillas” de cuarzo y relictos de biotita además de presencia de líticos y pómez aplastadas

La alteración en esta unidad es intensa, de tipo fílica, la cual se le sobreimpone un evento de alteración argílica avanzada con presencia de alunita fina afectando plagioclasas. Además, se observa una importante cantidad de pirita diseminada no oxidada y “pelillos” tardíos de color anaranjado-ocre, ocupados por mezclas de alunita con jarosita supérgena.



Figura 37: (a) Estratificación en la unidad de tobas lítico-cristalinas y (b) textura rica en cristales con menor componente de fragmentos líticos de las tobas.

Al microscopio, la textura es fragmental con rasgos de flujo soldados. Se reconoce un volumen relativamente importante de pómez aplastada de 4 a 6mm de largo, que contienen relictos pequeños de plagioclasa y porosidades ocupadas por alunita de aspecto sacaroidal que generalmente corresponden a alunita supérgena (Figura 38.a). El material vítreo fibroso de las pómez está alterado a filosilicatos (sericita), impregnada por jarosita. Estos cuerpos presentan también pirita diseminada opaca (0,1-0,4mm) con un margen fino de jarosita. Otros fragmentos de formas

subredondeadas de 2 a 4mm de diámetro, corresponden a trozos líticos silicificados de rocas andesíticas o dacíticas con relictos de titanomagnetita y, también pirita diseminada. Lo más característico de esta toba es la presencia de cristales “astillados” de cuarzo (0,2-1mm), de formas triangulares, junto a fragmentos también pequeños de plagioclasa (0,5-1mm) alterados a alunita fina con arcillas (mezclas oscuras de caolinita con smectitas) (Figura 38.b).

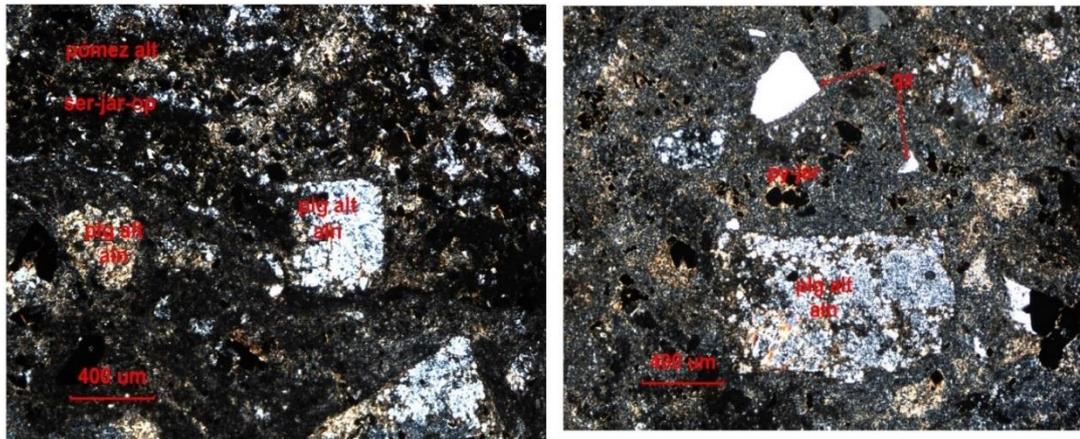


Figura 38: (a) Relictos pequeños de plagioclasa y porosidades ocupadas por alunita y pomez alteradas. (b) Cristales astillados de plagioclasa y diseminación de pirita-jarosita.

- Domos de lava dacíticos a riódacíticos:

Esta unidad constituye parte del basamento pre-mineral subvolcánico del Proyecto Margarita. Estas rocas están expuestas principalmente en la cima de los cerros Remolino y Remolino Chico, los puntos más altos del área de estudio (Figura 39). A la distancia, se presentan como una sucesión compacta de rocas planas resistentes a la erosión. Aunque los cuerpos en Remolino y Remolino Chico parecen ser independientes, pueden haber sido parte de un solo cuerpo cuya conexión fue borrada recientemente por la erosión. La resistencia a la erosión puede explicarse por la composición ácida de estas rocas.

A escala de afloramiento, estas rocas exhiben bandas de flujo, definidas por la presencia o ausencia de fenocristales de feldespato (Figura 39.a); estratificación eutaxítica; y una proporción de fragmentos entre los que se pueden observar lapilli acrecionaria (Figura 39.b).

Las rocas que conforman esta unidad son de composición dacítica a riódacítica, maciza y presentan textura porfídica con feldespatos y fenocristales de cuarzo en una masa fundamental vítrea a afanítica. En el cerro Remolino Chico, un macizo núcleo riolítico-dacítico cambia gradualmente a autobrechas en la periferia.



Figura 39: Bandas de flujo (a) y texturas fragmentadas incluyendo lapilli acrecionaria (b) en la unidad de domos de lava Krdd.

- Dique félsico

Esta unidad corresponde a un conjunto de diques tardíos de composición riolítica y grano fino, que intruyen a las unidades de tobas lítico-cristalinas y domos de lava dacíticos a riodacíticos (Figura 40). Esta unidad mayormente se encuentra alterada por sílice-sericita y en menor cantidad por alteración argílica avanzada.



Figura 40: Afloramiento en quebrada de dique félsico intruyendo roca tobácea.

- Diorita margarita

Corresponde al componente intrusivo del basamento pre-mineral, cuyas rocas afloran netamente en el borde SW del área de estudio (Figura 41.a). Se constituye de rocas intrusivas dioríticas con variaciones texturales desde porfídicas a faneríticas equigranulares. Mineralógicamente se compone de plagioclasa, hornblenda y en menor cantidad piroxeno junto con vetillas finas de magnetita (Figura 41.b). Además,

se presenta una masa fundamental fina de textura intergranular con rasgos de flujo. Adicionalmente, en esta masa fundamental se desarrollan cavidades de cristalización tardimagnética “miarolíticas”, que contienen cuarzo, con diversos tipos de feldespatos.

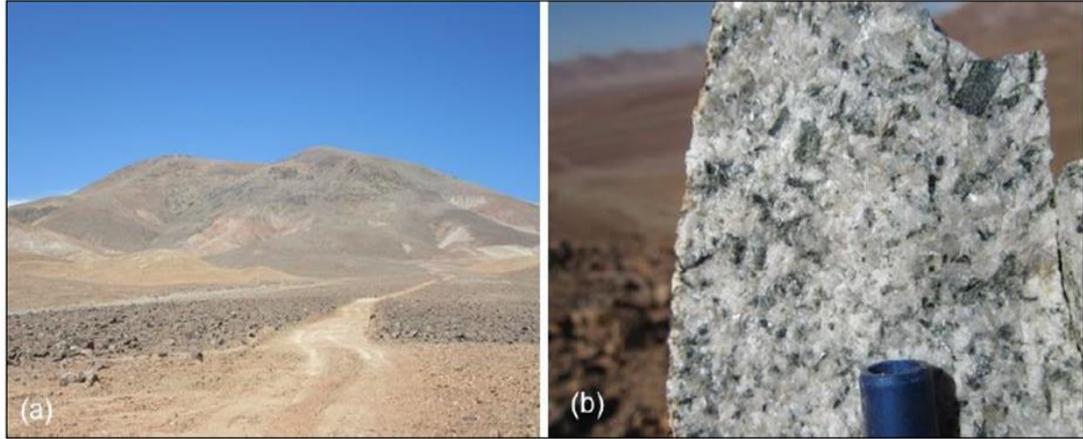


Figura 41: (a) Diorita Margarita cloritizada subyacente a las secuencias volcánicas del cerro Remolino. (b) Textura de grano grueso de Diorita Margarita.

Al microscopio, se observan fenocristales y glomerocristales de plagioclasa (2-4mm) (25-30%) con maclas polisintéticas curvadas y un aspecto variable de alteración a una mezcla fina de smectitas con sericita (Figura 42.a). A través de estos cristales alterados, se propagan pelillos con actinolita, epidota y clorita. Los minerales máficos corresponden a relictos prismáticos o de secciones octogonales o subcuadradas de piroxeno (1-3mm) (10%) que presentan reemplazo pseudomorfo total por anfíbola fibrosa tipo uralita (Figura 42.b).

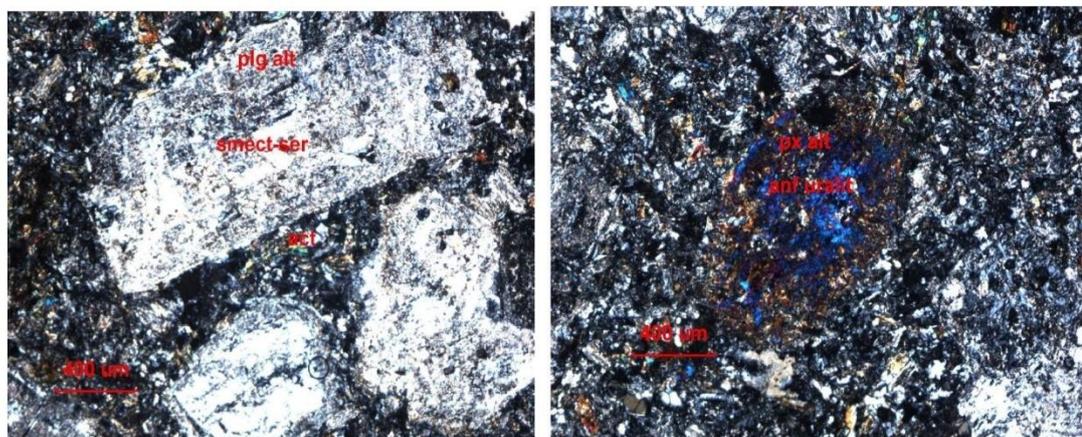


Figura 42: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasas alterados a una mezcla variable de smectitas con sericita. (b) Forma octogonal de piroxeno alterado a anfíbola.

- Diorita cototuda:

Esta unidad aflora en la zona sur del área de estudio presenta textura fanerítica de grano medio, su composición es diorítica y mineralógicamente se compone de feldespatos alterados a sericita y hornblenda alterada a clorita-biotita (Figura 43). En algunos sectores se encuentra brechizada por vetillas de cuarzo-turmalina y cuarzo-especularita y en menor caso por óxidos de cobre.



Figura 43: Diorita cototuda con fenocristales de plagioclasa alterados a sericita

- Diorita pórfidica

Aflora en gran extensión en la zona sur del área de estudio intruyendo a la unidad Diorita cototuda y a las unidades volcánicas. Presenta una composición diorítica y una masa fundamental oscura afanítica con fenocristales de plagioclasa (Figura 44). Se observan zonas con óxidos de cobre negro (tenorita?) además de presentar alteración a clorita-sericita y potásica (biotita secundaria).



Figura 44: (a) Pórfido diorítico con fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental afanítica (b) Afloramiento en ladera de roca porfídica diorítica.

Al microscopio, la textura es porfídica a glomeroporfídica, con fenocristales aislados (1-3mm) y glomerocristales de plagioclasa (4 a 5mm de diámetro) (35%), con maclas de acoplamiento y también, polisintéticas en varias direcciones (Figura 45.a). Los cristales tienen aspecto recristalizado con extinción ondulosa y formación local de feldespato potásico (0.2-0.3mm) con gránulos de titanita y, también, propagación de algunos pelillos de albita “tableada” (0.1-0.3mm), asociados a epidota más tardía. La roca no contiene “ojos” de cuarzo y los relictos de minerales máficos son prácticamente imperceptibles, correspondiente a unos cúmulos alargados (1-3mm) (6-8%) reemplazados por rosetas de hidrobiotita con clorita de aspecto muy disgregado (Figura 45.b), entrecrecida con gránulos de titanita (0.1-0.3mm) y presencia de algunos óxidos de cobre supérgeno. En otros casos, solo se reconoce clorita y epidota.

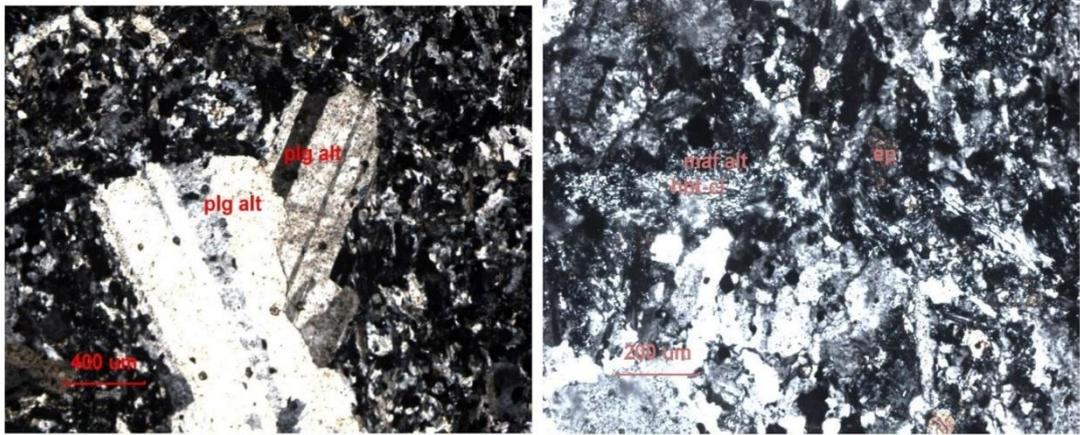


Figura 45: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasas con macla de penetración y aspecto recrystalizado con formación local de feldespato potásico. (b) Minerales máficos alterados a un cúmulo alargado de rosetas de hidrobiotita con clorita de aspecto disgregado con sobreposición de epidota.

- Pórfido cuarzo-diorítico:

Corresponde a un conjunto de cuerpos intrusivos ubicados en la zona sur del área de estudio con superficies que abarcan hasta 500x x 250 m. Se encuentra intruyendo a la unidad de tobas lítico-cristalinas (Figura 46). La roca presenta una coloración gris verdosa y tiene textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo inmersos en una masa fundamental crecida alterada a clorita que otorga el tono verdoso. Los relictos de minerales máficos corresponden a anfíbola y biotita que se encuentran alteradas a clorita-epidota.



Figura 46: Afloramiento de Pórfido cuarzo-diorítico intruyendo tobas líticas.

Al microscopio, estas rocas presentan textura porfídica con cierta orientación magmática de los cristales y alto contraste granulométrico (1:40) entre el tamaño de

los fenocristales y las fases intersticiales. Está compuesta principalmente por fenocristales aislados de plagioclasa (1-3mm) (25%) (Figura 47.a). La masa fundamental es oscura alterada a parches de feldespato potásico cubierto de smectitas, con sobreposición de clorita, epidota y granos pequeños de titanomagnetita. Los márgenes de los fenocristales son irregulares y están sobrecrecidos por feldespato potásico. El pórfido contiene “ojos” de cuarzo relativamente abundantes, de 0,5 a 2mm de diámetro (6%), con rasgos de reabsorción magmática y transformación a subgranos, con propagación de “pelillos” con clorita y epidota (Figura 47.b).

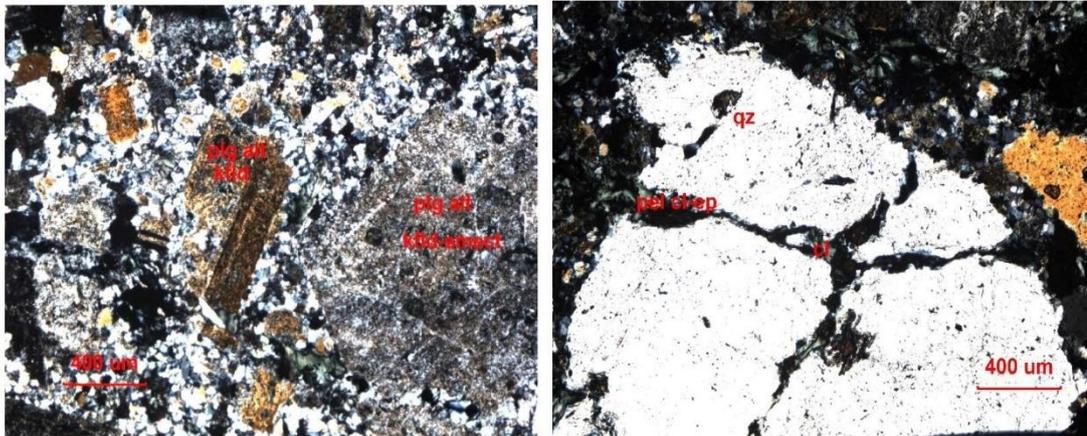


Figura 47: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa alterados a feldespato potásico con sobreposición de smectitas. (b) “Ojo” de cuarzo con rasgos de reabsorción magmática.

- Pórfido riodacítico:

Serie de cuerpos intrusivos menores, de 70 a 500 m de ancho, de color blanco a rosa claro que describen un anillo complejo de intrusiones al cerro Remolino. Texturalmente estas rocas son afaníticas a levemente porfídicas, presentan feldespatos tabulares y fenocristales de cuarzo dentro de una masa fundamental silíceo-feldespática (Figura 48.a). Presenta un tono “blanqueado” por efecto de alteración argílica avanzada, con arcillas aluminosas bien cristalizadas, ya sea caolinita o dickita, además, se observan venillas oscuras subparalelas de cuarzo que podrían representar un *sheeted veins* (Figura 48.b).



Figura 48: (a) Pórfido riodacítico con textura levemente afanítica y feldespatos tabulares junto con fenocristales de cuarzo en una masa fundamental silíceo-feldespática. (b) Ojos de cuarzo junto con vetillas subparalelas de cuarzo.

Al microscopio, la textura relicta es porfídica abierta, con siluetas tabulares subcuadradas oscuras de plagioclasa (1-2 mm) (15%) (Figura 49.a), reemplazadas por una mezcla oscura de smectitas, con rosetitas de remanentes de sericita-illita (0.05 a 0.1 mm) de birrefringencia moderada. La roca también presenta cristales de feldespato potásico (8%) de secciones subcuadradas de 0,5 a 1,5mm, que están selectivamente alterados a agregados hojosos gruesos de caolinita con dickita (0,2-0,3 mm). Los “ojos” de cuarzo (6%) son bastante abundantes (Figura 49.b), de formas redondeadas con rasgos de reabsorción magmática de 0.5-2 mm de diámetro, que se encuentran microfracturados con relleno de arcillas aluminosas.

La masa fundamental (50-60%) del pórfido presenta una textura relicta microgranular cuarzo-feldespática (0,05 a 0,3mm) de granulometría contrastante con los fenocristales de mayor tamaño. Está compuesta por un agregado de cuarzo con feldespato potásico moderadamente preservado (0,1-0,3mm) y relictos tabulares de plagioclasa (0,2-0,5mm) entre una red intersticial de arcillas aluminosas que corresponden principalmente a dickita (0,1-0,3mm) en rosetas muy bien cristalizadas.

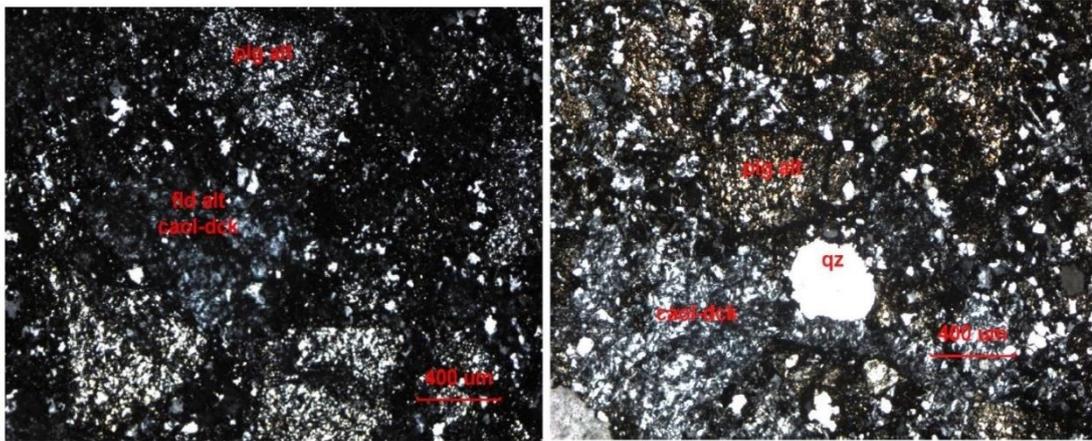


Figura 49: (a) Textura porfídica con fenocristales de plagioclasa remplazados por una mezcla de smectitas con rosetas de sericita-illita. Además, se reconoce otro fenocristal de feldespato potásico alterado totalmente a un agregado de caolinita-dickita de muy baja birrifrigencia. (b) Fenocristales de plagioclasa y feldespato alterados, junto a un pequeño “ojo” de cuarzo que presentan márgenes con rasgos de reabsorción magmática.

- Pórfido feldespático:

Esta unidad intrusiva aflora en el borde SW del área de estudio. Su composición es monzonítica y presenta textura porfídica con fenocristales de plagioclasa mayormente alterados a sericita y arcillas, además, está desmagnetizada y presenta cierto aspecto “albítico” con tonalidades blanquecinas o rosadas sobre feldespatos o en las fases intersticiales. Se destaca como roca de caja de la mineralización de óxidos de cobre verdes (crisocola) y negros (tenorita). Se observa gran cantidad de vetillas de cuarzo-turmalina (Figura 50) que le otorgan un aspecto brechizado a la roca.



Figura 50: (a) Afloramiento de Feldspar Porphyry con aspecto blanquecino y vetillas de cuarzo-turmalina. (b) Roca con textura porfídica y aspecto brechizado.

Al microscopio, la textura es porfídica a glomeroporfídica, con cristales mayores orientados de plagioclasas cálcicas (2-4mm) (25%) con maclas polisintéticas deformadas (arqueadas), que generalmente reflejan efecto de recristalización termal (Figura 51.a). En este caso, reemplazada por feldespato potásico oscuro cubierto de smectitas, (20 a 40 micrones) y óxidos de cobre supérgeno (sin expresión cristalina mayor). Los minerales máficos (10-12%) parecen corresponder a fenocristales de piroxeno (1-3mm de largo) y posiblemente hornblenda, que están totalmente reemplazados por agregados aciculares de actinolita verde (0,2-0,8mm) con formación de gránulos oscuros de titanita (0,2-0,4mm) y también, epidota (Figura 51.b).

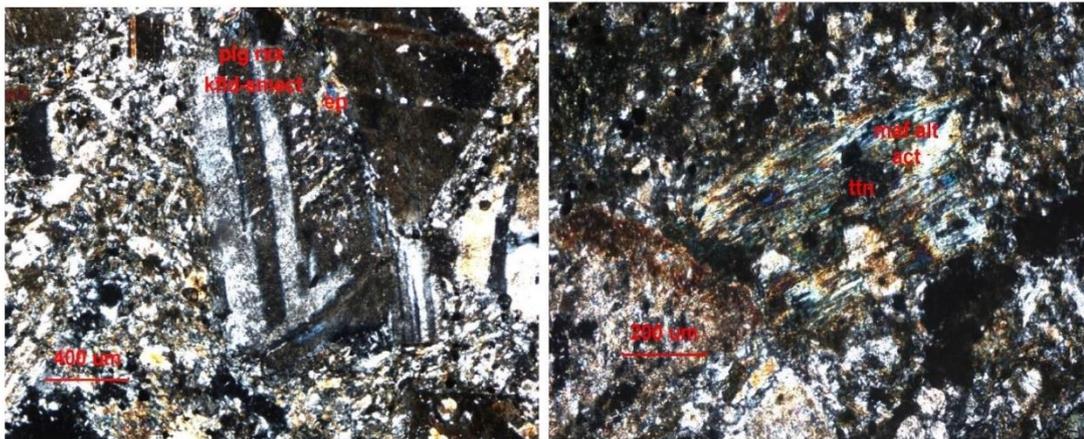


Figura 51: (a) Textura porfídica con un fenocristal de plagioclasa con efecto de recristalización termal con remplazo por feldespato potásico con sobreposición de epidota. (b) Fenocristal de piroxeno u hornblenda totalmente remplazado por agregados aciculares de actinolita con formación de gránulos de titanita.

- Pórfido cuarzo-feldespático:

Esta unidad aflora en la zona sur del Proyecto Margarita intruyendo a las rocas de la unidad de Tobas Lítico-Cristalinas (Figura 52.a). Su composición es dacítica y se observan fenocristales de plagioclasa alterados a sericita junto con ojos de cuarzo en una masa fundamental afanítica además de vetillas de cuarzo-turmalina que le otorgan un aspecto brechizado (Figura 52.b) junto con “boxwork” de sulfuros. Se destaca la presencia de mineralización de silicatos de cobre verde (crisocola) y óxidos negros (tenorita) presente en fracturas.



Figura 52: (a) Porfido cuarzo-feldespático con aspecto brechizado por vetillas de cuarzo-turmalina (b) Afloramiento bajo coluvio inactivo de Pórfido cuarzo-feldespático con ojos de cuarzo.

Al microscopio, la roca presenta un aspecto brechizado con fragmentos que presentan contornos redondeados irregulares de composición dacítica (Figura 53.a). Los fragmentos contienen fenocristales de plagioclasa (2-4 mm) alterados a smectitas con pelillos de illita-sericita, también presentan ojos de cuarzo redondeados (0,5-1,5 mm). La masa fundamental (Figura 53.b) es feldespática con plagioclasas pequeñas entrelazadas (0,1-0,3mm), sobre un agregado de cuarzo con feldespato potásico (0,05mm) y una importante diseminación de pirita granular (0,05 a 0,2mm).

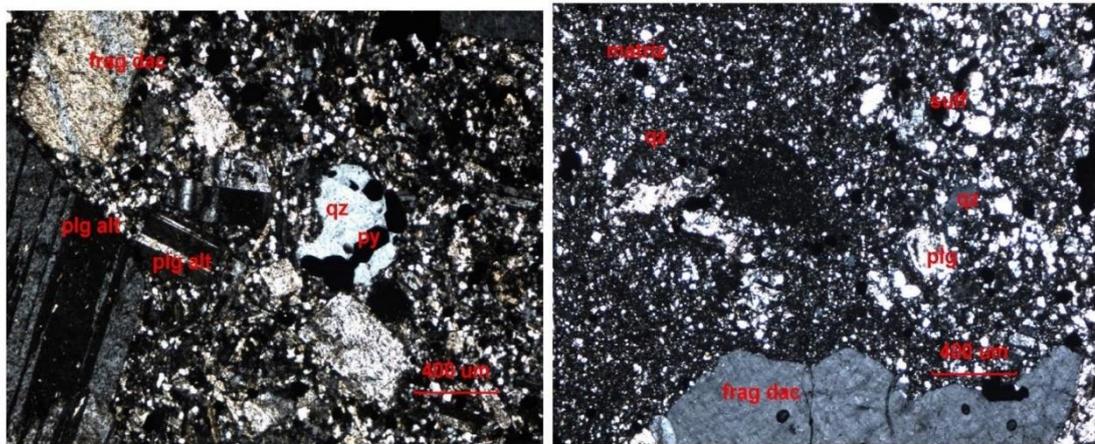


Figura 53: (a) Fragmento dacítico de textura tipo crowded con fenocristales de plagioclasas con maclas polisintéticas con alteración moderada a smectitas. Además, se reconoce un “ojo” de cuarzo con fractura ocupada por pirita. (b) Matriz textura fragmental con trozos de cuarzo y plagioclasa alterada. El cemento es fino y cuarcífero.

- Pórfido dacítico:

Se compone de pequeños afloramientos ubicados en la zona sur del sector de estudio, se define como un intrusivo tipo “sill” inter-mineral. Su composición es

dacítica con textura porfídica fina (Figura 54.a), presenta fenocristales de plagioclasa con textura “crowded” en una matriz silíceo junto con ojos de cuarzo. La roca se presenta intensamente alterada a sílice y feldespato potásico además de presentar vetillas de cuarzo-turmalina y cuarzo-especularita que le dan a la roca un aspecto brechizado (Figura 54.b) además de una gran cantidad de pirita diseminada con “rim” de calcosina.



Figura 54: (a) Textura seriada y (b) fragmentada en la unidad de Pórfido Dacítico.

Al microscopio, la textura es porfídica semi-cerrada con abundantes fenocristales de plagioclasa (1-3 mm de largo) (andesina) (25%), con maclas polisintéticas, rasgos de zonación y una alteración moderada a smectitas, seguida de pelillos con clorita, sericita (Figura 55.a) y, localmente, formación de epidota a lo largo de fracturas, clivajes o sobre los anillos de zonación. También se reconocen algunos “ojos” de cuarzo (3-4%) de secciones redondeadas de 1 a 2mm de diámetro, con rasgos de reabsorción magmática y un margen irregular en contacto con feldespato potásico y clorita. La presencia de minerales máficos también es importante y corresponden a cristales prismáticos mayores de anfíbola tipo hornblenda (2-4 mm de largo) (8%), que muestran rasgos de reabsorción magmática con texturas esqueléticas e inclusiones de plagioclasa. Estas anfíbolas están totalmente alteradas a granos de feldespato potásico con clorita hojosa de color verde, asociada a cúmulos oscuros de rutilo y a smectitas (Figura 55.b).

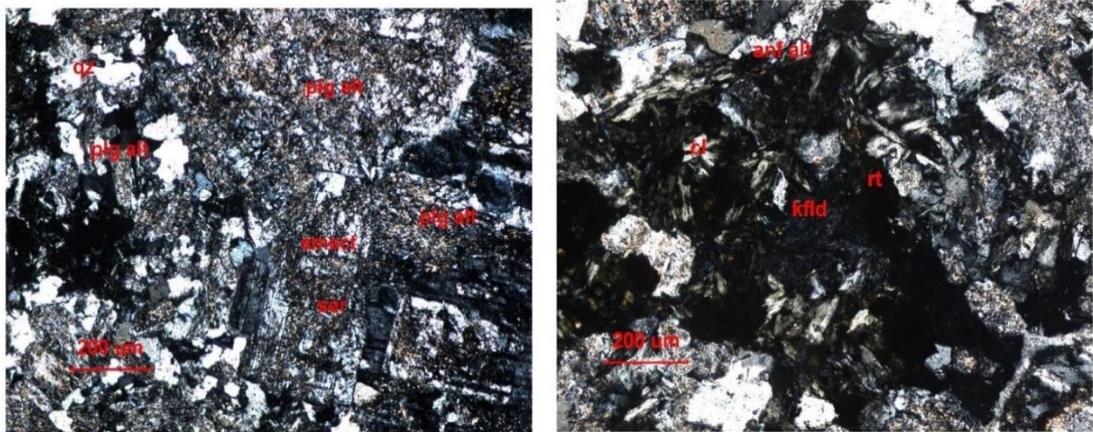


Figura 55: (a) Textura porfídica semi-cerrada con fenocristales de plagioclasas alterados smectitas con láminas de sericita. (b) Anfíbola tipo hornblenda que se encuentra totalmente alterada a granos de feldespato potásico con clorita hojosa y cúmulos de rutilo.

- Pórfido monzodiorítico:

Corresponden a una serie de cuerpos monzodioríticos menores (de 20 m a 200 m de ancho) con contornos redondeados emplazados dentro de las tobas y cerca del contacto con la unidad de domos de lava en las proximidades de la cima del cerro Remolino (Figura 56.a).

Petrográficamente, son de grano fino, equigranulares a porfídicos y en su mayoría contienen cristales de feldespato y plagioclasa en bloques. Normalmente desarrollan halos de alteración argílica avanzada que afectan a las rocas cercanas y a las propias monzodioritas. Los feldespatos alterados muestran alteración a escamas gruesas de sericita (¿illita?) y núcleos lixiviados rellenos con intercrecimiento de mineral tabular interpretado como alunita hipógena (Figura 56.b).



Figura 56: (a) Intrusión monzodiorítica menor ubicada al sur de la colina Remolino. (b) Texturas vuggy dentro de las monzodioritas afectadas por la alteración argílica avanzada.

- Pórfido diorítico:

Esta unidad se presenta como pequeños afloramientos en el sector SW intruyendo la unidad Diorita Margarita. Presenta textura porfídica junto con fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo además de hornblenda y piroxeno con mineralización de óxidos de cobre negro (tenorita) y verdes (crisocola) en fracturas (Figura 57).



Figura 57: (a) Estructura mineralizada con silicatos de cobre en Pórfido diorítico. (b) Afloramiento de Pórfido Diorítico con mineralización de silicatos de cobre verde y óxidos negros.

- Diques dioríticos

Cuerpos tabulares a irregulares de grosores entre 0,5 a 5 m, andesíticos a microdioríticos que están expuestos en toda la región (Figura 58). La mayoría tiende de N-S a NNW-SSW o NNE-SSW. Teniendo en cuenta que una proporción de ellos ocupan claramente rastros de fallas NNW-SSE, es razonable sugerir que están emplazados en direcciones estructurales. Se han distinguido tres tipos de diques; porfirítico, ubicado principalmente al oeste; afanítico y afanítico mineralizado con óxidos de Cu, cerca de las minas Cototuda y Margarita.



Figura 58: Afloramientos de cuerpos subverticales tabulares correspondientes a diques dioríticos intruyendo unidades intrusivas y volcánicas.

- Depósitos coluviales y aluviales inactivos
Gravas y arenas consolidadas dentro de terrazas muy diseccionadas.
- Depósitos activos coluviales y aluviales
Grava y arenas no consolidadas restringidas a sistemas de drenaje activos y talud de gran pendiente.

4.2 Estructuras tectónicas

Se pueden definir tres sistemas estructurales dominantes en el Proyecto Margarita, (1) fallas con rumbo NNW-SSE y (2) fallas normales WNW-ESE y (3) fallas con rumbo NNE-SSW. En la figura 59 se representan las diversas estructuras tectónicas presentes en el área de estudio.

Mapa estructural del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile

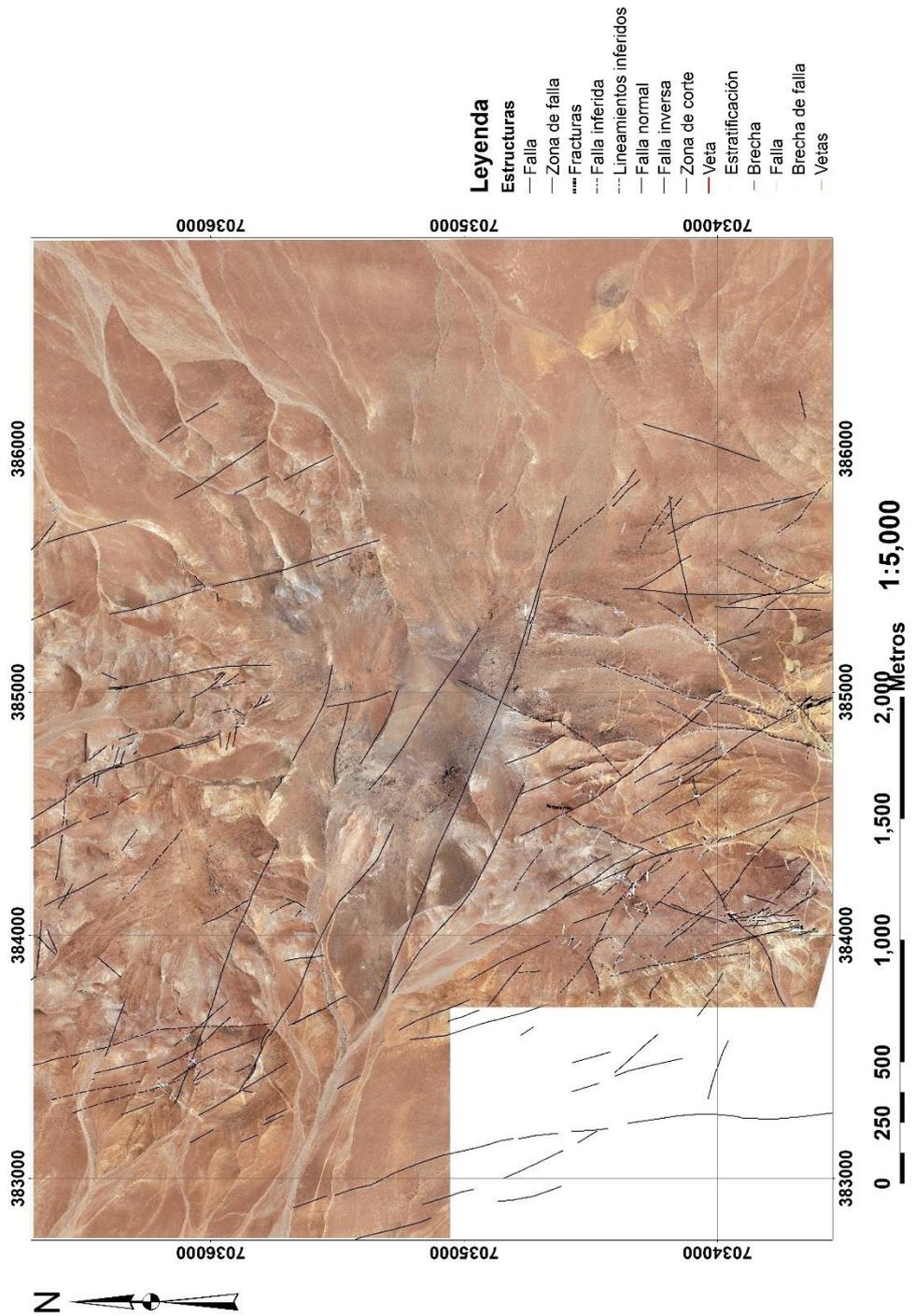


Figura 59: Mapa de estructuras geológicas del Proyecto Margarita.

4.2.1 Estructuras NNW-SSE

Estas estructuras se pueden observar en toda la propiedad, tanto en campo como en imágenes satelitales. Son la característica estructural más importante de la región.

El largo de las fallas varía de 50 m a 1,2 km de longitud, las estructuras más grandes se concentran en tendencias separadas de 340 m a 600 m. Los rumbos varían entre N15° W a N30° W y el manto fluctúa entre 70° y 88° hacia el E.

Las fallas se evidencian por la ocurrencia por valles rectos, alineación de valles cortos o contactos geológicos desplazados. Cuando se dispone de buenas exposiciones, se observan diques dioríticos emplazados a lo largo de trazos de fallas NNW-SSE.

Casi en todos los casos observados, las estructuras desplazan sinistralmente los contactos geológicos y los diques dioríticos. Las estrías contenidas en las trazas de falla se inclinan ligeramente hacia el sur y los indicadores cinemáticos (indican un componente inverso asociado con los desplazamientos laterales).

4.2.2 Fallas normales WNW-ESE

Conjunto de fallas normales que se concentran a lo largo de un corredor estructural WNW-ESE desplazando las unidades geológicas Kd, Krdb, Kt, Krdd y Ktl en el cerro Remolino y su falda occidental. Presentan trazos rectos de 250 m a 1,2 km de largo, tendencia N60 ° W a N70 ° W y buzamiento en ángulos altos (75 ° -85 °) hacia el NE y SW (Figura 59). Otras estructuras similares, aunque no tan frecuentes como en este corredor, se extienden al sur del cerro Remolino.

Las estructuras WNW-ESE desplazan unidades geológicas produciendo separaciones estratigráficas.

4.2.3 Estructuras NNE-SSW

Corresponde a un conjunto de fallas con tendencia N10°-22°E que se inclinan 70°-84° hacia el oeste. Los trazos continuos de fallas varían de 700 m a 1.200 m, los que pueden extenderse generando grandes zonas de fallas cubiertas por sedimentos modernos activos e inactivos (Qac y MPlac).

En las zonas aledañas del Proyecto Margarita, diferentes rastros de fallas del sistema estructural contienen evidencia de óxido de Cu y sulfuros de Cu que han sido explotados en labores artesanales y semiindustriales. Aunque la evidencia de mineralización ocurre en casi todas las trazas, las concentraciones de mineral más importantes están alojadas en trampas estructurales en forma de cuña ubicadas en la unión entre las cadenas de fallas principales.

4.3 Alteración y mineralización

Se realizó un mapa de alteración y mineralización (Figura 60) en el cual se identificaron una variedad de alteraciones hidrotermales junto con zonas mineralizadas, las cuales se detallan a continuación

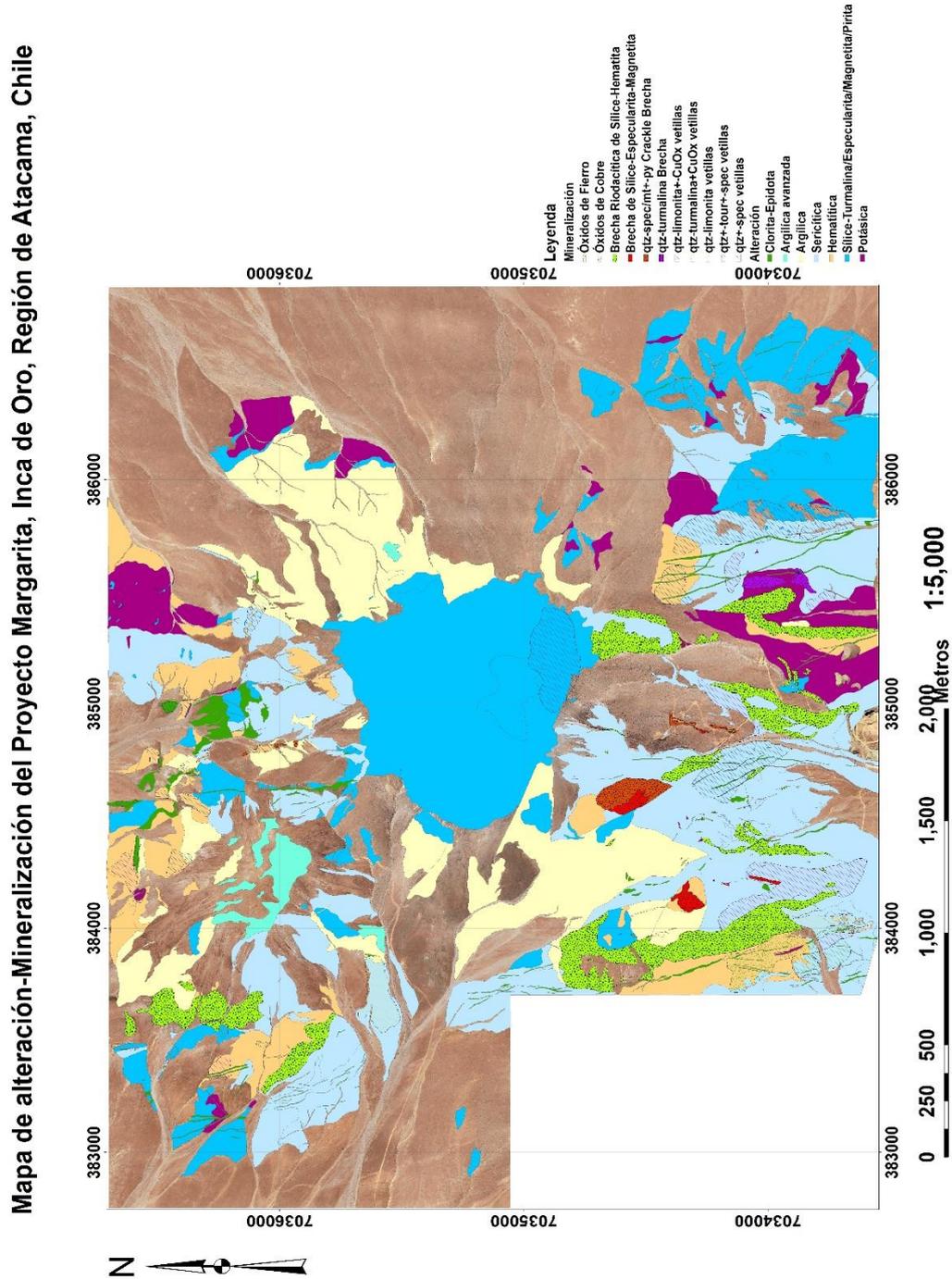


Figura 60: Mapa de alteración y mineralización del Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.

4.3.1 Alteración

- Argílica avanzada:

Afecta preferentemente a las unidades tobáceas de la zona NW del área de estudio en donde se logra identificar los minerales de alteración alunita y dickita afectando a feldespatos.

- Argílica

Abarca una gran superficie en los sectores NE, NW y SW del Proyecto Margarita, afectando a rocas tobáceas donde el ensamblaje mineralógico corresponde a arcillas y arcillas silíceas como caolinita, illita y smectita, la cual en esta zona también se ven acompañadas de especularita.

- Clorita-Epidota

Se concentra de manera acotada en rocas cuarzo-dioríticas del sector sur del área de estudio y la mineralogía corresponde epidota alterando a feldespatos y clorita-pirita alterando a máficos.

- Serícítica

Es la alteración más común del Proyecto Margarita y afecta a una gran variedad de unidades intrusivas y volcánicas. Se observa muscovita de grano fino afectando feldespatos, la cual también puede estar acompañada de cuarzo u otros minerales asociados como pirita, turmalina, especularita o limonitas cuando está afectada por la lixiviación.

- Silícea

Afecta a unidades intrusivas y volcánicas otorgándole una gran dureza a las rocas y un aspecto vítreo, comúnmente se expresa como reemplazamiento de sílice acompañado de magnetita, especularita y/o pirita.

- Hematítica

Afecta principalmente a unidades tobáceas a lo largo de toda la extensión del área de estudio, las cuales se observan con un fuerte tono rojizo y los feldespatos se encuentran fuertemente alterados a óxidos de hierro.

- Potásica

Se compone principalmente de biotita secundaria reemplazando minerales máficos o de forma diseminada, generalmente se encuentra acompañada de clorita y pirita y afecta a unidades dioríticas y cuarzo dioríticas.

4.3.2 Mineralización

- Óxidos de cobre

Se encuentra generalmente en pórfidos dioríticos del sector SW del área de estudio en la Mina Margarita (Figura 61.a) con fuerte control estructural NNW además de estar asociada a la presencia de diques dioríticos (Figura 61.b). La mineralogía corresponde principalmente a silicatos y sulfatos de cobre como crisocola y brochantita respectivamente, junto con óxidos de cobre negro como tenorita.



Figura 61: (a) Rajo de la Mina Margarita con mineralización de óxidos de cobre verde y negro en pórfido diorítico. (b) Dique diorítico con mineralización de crisocola.

- Cuarzo-turmalina

Se destaca la presencia de vetillas de cuarzo-turmalina afectando rocas intrusivas y volcánicas otorgándole en algunos casos un aspecto brechizado a la roca denominándose de manera informal como *Crackle Breccia* de cuarzo-turmalina (Figura 62). En ciertos sectores se encuentra también asociada a óxidos de cobre.



Figura 62: (a) Afloramiento de *Crackle Breccia* de cuarzo turmalina. (b) Se logran identificar clastos angulosos de Pórfido Diorítico.

- Brecha riódacítica de sílice-hematita

Se definen como brechas hidrotermales con un fuerte control estructural o cuyo emplazamiento está controlado por el contacto entre las unidades volcánicas e intrusivas. Se encuentra dominada por la presencia de hematita junto con asociación mineralógica sílice, cuarzo-especularita y magnetita-sulfuros (pirita) (Figura 63).



Figura 63: (a) Pique exhibiendo estructura de hematita-especularita-sílice. (b) Brecha Riodacítica de Sílice-Hematita, se observan fragmentos angulosos de rocas dioríticas.

- Brecha de sílice-especularita-magnetita

Corresponde a brechas hidrotermales dominadas por la alta presencia de sílice y cementadas por magnetita-especularita y leve presencia de sulfuros. Su

emplazamiento responde a un control estructural y de contacto entre las litologías intrusivas y volcánicas. La roca se presenta fuertemente silicificada acompañada de especularita y magnetita.

Las vetas de hematita especular y/o mushketovita se desarrollan preferentemente a lo largo de fallas y fracturas NNW-SSE (Figura 64). Esto implica que estas estructuras controlaron la circulación de fluidos hidrotermales ricos en hierro, así como para el transporte de magma asociado a la formación de diques dioríticos.



Figura 64: Estructura brechosa de cuarzo-especularita cortando roca porfídica diorítica.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS GEOQUÍMICOS

A continuación, se describen estadísticamente los resultados geoquímicos de concentraciones de cobre obtenidos a partir de la recolección de muestras de suelo en una malla predefinida de 200 x 200 m con forma romboidal (Figura 28) a lo largo de toda la propiedad minera del Proyecto Margarita. A partir de estos resultados se definieron dos zonas de anomalías geoquímicas de cobre en las cuales se realizó una segunda campaña de muestreo densificando la malla a una distancia de 100 x 100 m obteniendo además los elementos pathfinder asociados a la mineralización de cobre.

5.1 Análisis estadístico

5.1.1 Estadística univariable

- Estadística descriptiva de cobre:

En el área de estudio el promedio de concentraciones de cobre en suelos es 270,1 ppm con un valor alto de desviación estándar reflejando una alta variabilidad de resultados, lo que también se observa en la alta diferencia entre el valor mínimo y máximo, siendo estos 12 ppm y 2655 ppm respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4: Estadística descriptiva de concentraciones de cobre en suelos.

Elemento	Datos	Media	Desviación estándar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Cu	251	270,1	401,3	12	74	107	256	2655

- Histograma:

Por otra parte, el histograma (Figura 65) muestra que la mayor cantidad de datos (171) presentan concentraciones entre 12-200 ppm, junto a esto se observa una distribución exponencial decreciente por lo que a medida que los valores de concentraciones de cobre aumentan, su frecuencia disminuye. A la vez, se logra observar valores “outliers” (Figura 65), los cuales se destacan debido a que escapan de la tendencia y distribución de los datos.

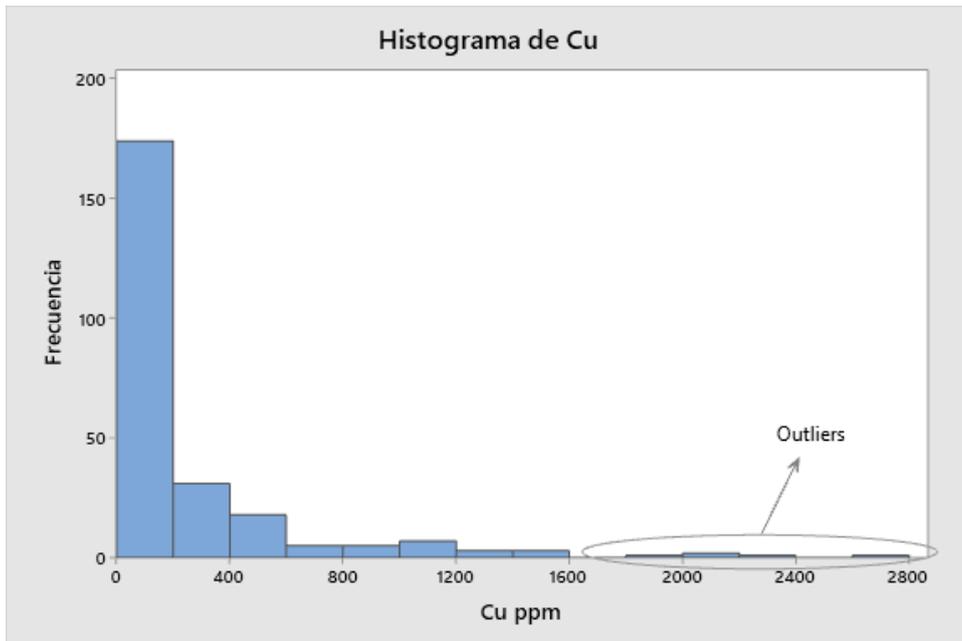


Figura 65: Histograma de frecuencia de datos geoquímicos de cobre en suelos

- Box plot:

El gráfico tipo box plot o gráfico de caja indica que el 50% de los valores se encuentra entre el Q1 y Q3, es decir, entre 74 y 256 ppm de cobre, con un rango intercuartil de 182. La media y la mediana presentan valores de 270,3 y 107 ppm y además ya que la mayor concentración de datos se encuentra bajo la mediana, los datos presentan asimetría positiva (Figura 66).

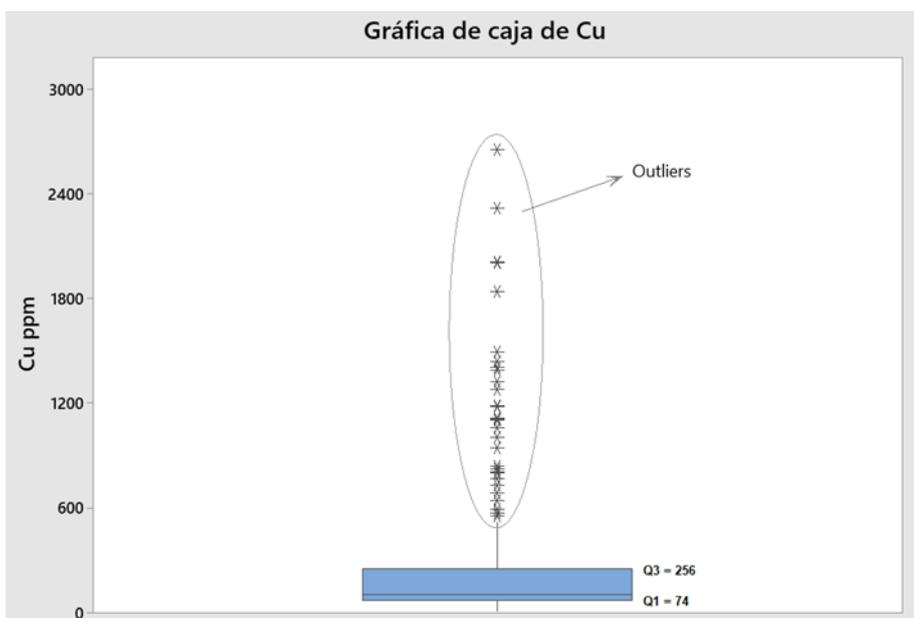


Figura 66: Gráfico de caja de concentraciones de cobre en suelos.

El límite superior o upper whisker corresponde a 520 y el límite inferior o lower whisker corresponde a 12 ppm, coincidiendo con el valor mínimo.

Se consideran outliers o valores atípicos los que se encuentran sobre o bajo el límite superior o inferior, debido a que el límite inferior coincide con el valor mínimo, no existen valores outliers inferiores. Para el caso de valores atípicos sobre el límite superior, se consideran outliers los valores sobre 529 ppm, siendo en este estudio un total de 30 muestras, con un valor máximo de 2655 ppm. Geológicamente los valores atípicos observados se asocian a las zonas de “copper wad” donde existe presencia de óxidos de cobre negros los cuales presentan contenido variable de cobre además de los diques de composición diorítica, en los cuales se observa precipitación de crisocola, elevando así los valores de concentraciones de cobre.

5.2 Determinación de “background” y “threshold”

El valor de “background” y “threshold” de valores de cobre se definió utilizando los parámetros del gráfico de caja o box plot, siendo el “upper hinge” o UH el valor que separa el background de los valores anómalos.

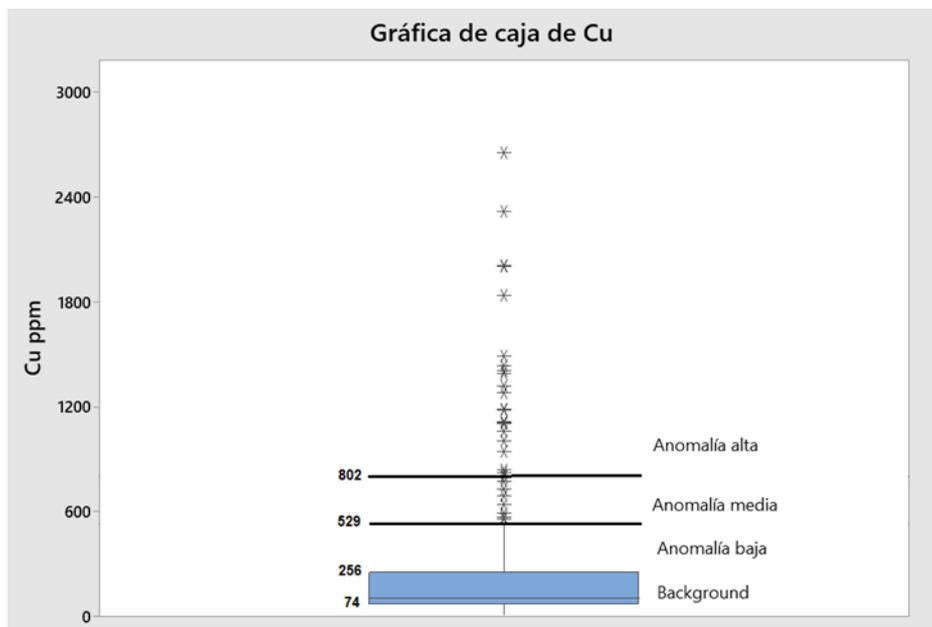


Figura 67: Gráfico de caja de concentraciones de cobre con intervalos de anomalías.

El gráfico tipo boxplot subdivide los valores anómalos en anomalías baja, media y alta (Tabla 5), siendo el “upper inner fence” (UIF) el valor que separa la anomalía baja-media y el “upper outer fence” (UOF) el valor que separa la anomalía media-alta.

Tabla 5: Rangos de anomalías geoquímicas de cobre en suelos.

Background	< 256	Upper hinge
Anomalía baja	256 - 529	Upper inner fence
Anomalía media	529 - 802	Upper outer fence
Anomalía alta	> 802	

5.3 Anomalías geoquímicas

5.3.1 Distribución de las zonas anómalas

- Mapa de puntos y círculos proporcionales

El siguiente mapa muestra la distribución espacial de las muestras recolectadas en el proyecto junto con las concentraciones de cobre identificadas con el análisis pXRF. Los rangos corresponden a los límites de “background” y anomalías definidas previamente con el gráfico tipo boxplot (Figura 68).

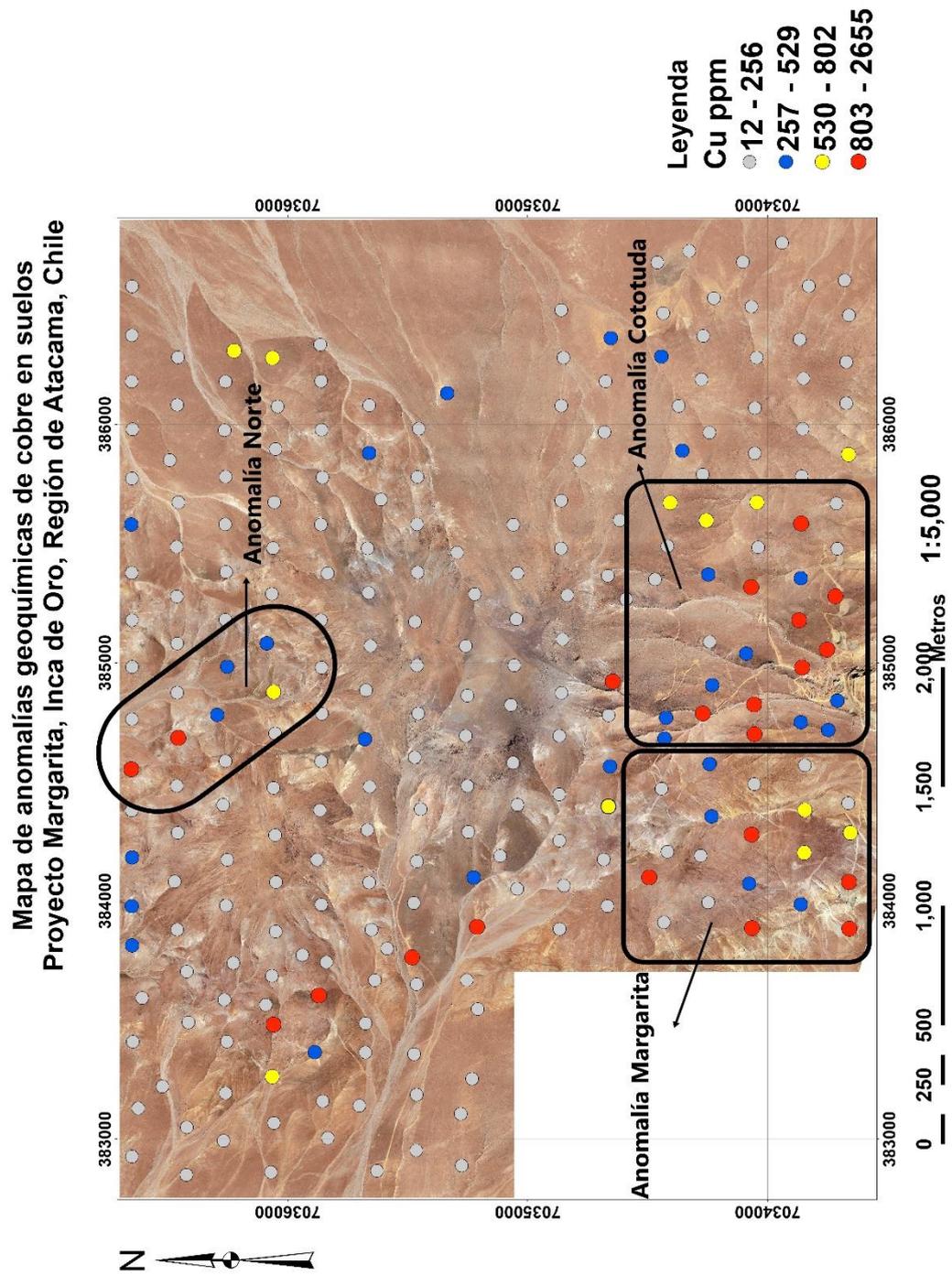


Figura 68: Mapa de anomalías geoquímicas de cobre en muestras de suelos obtenido a partir de una malla de muestreo de 200 x 200 m.

En el mapa se observan tres zonas con valores anómalos de concentraciones de cobre, las cuales se denominaron anomalía Norte, Cototuda y Margarita. Se logra identificar que los valores altos presentan tendencia NNW, coincidiendo con el principal sistema de fallas del área de estudio, además, litológicamente los valores se asocian a cuerpos intrusivos dioríticos o cuarzo-dioríticos junto con diques dioríticos y brechas riódacíticas.

- Mapa de interpolación

La siguiente figura muestra el mapa de interpolación realizado con el método de kriging ordinario.

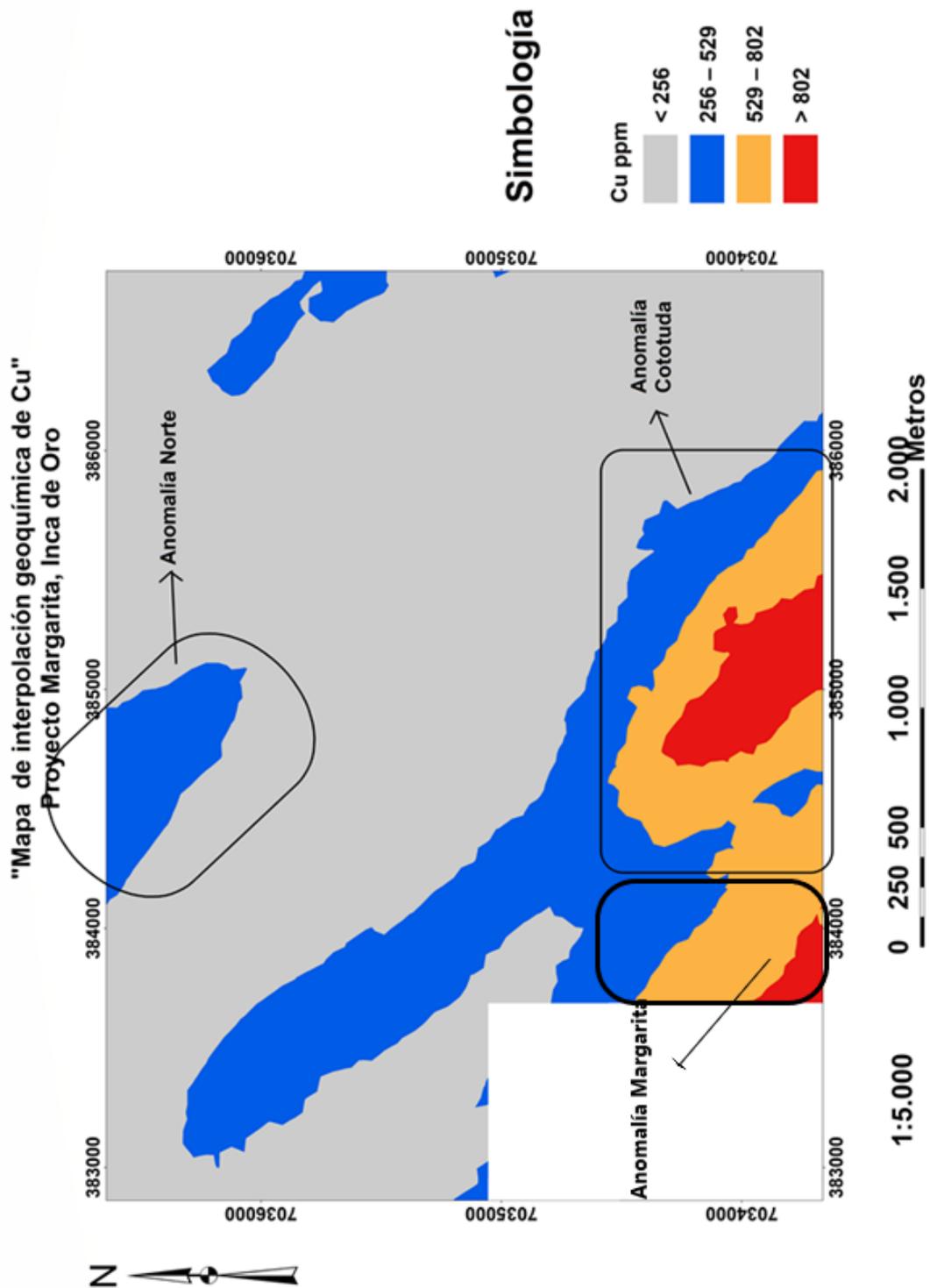


Figura 69: Mapa de interpolación de concentraciones de cobre en suelos obtenida a partir de una malla de muestreo de 200 x 200 m.

En la figura se logra confirmar tres zonas de anomalías descritas previamente y se observa una clara tendencia NNW de los valores anómalos. Estas dos zonas tienen potencial prospectivo debido a los valores de cobre encontrados junto con las características geológicas (Figura 69).

En el sector de cototuda la anomalía presenta una zona central caracterizada por presentar valores por sobre 802 ppm, luego al alejarse de la zona central la anomalía se diluye. En el sector norte la anomalía es más acotada espacialmente y presenta una zona central con tendencia NNW con valores anómalos sobre 256 ppm.

En los sectores Norte y Cototuda se realizó un muestreo acotado de 100 x 100 m, los cuales se detallan a continuación:

- Anomalía Norte

La siguiente figura representa el mapa geoquímico de cobre de la anomalía del sector norte:

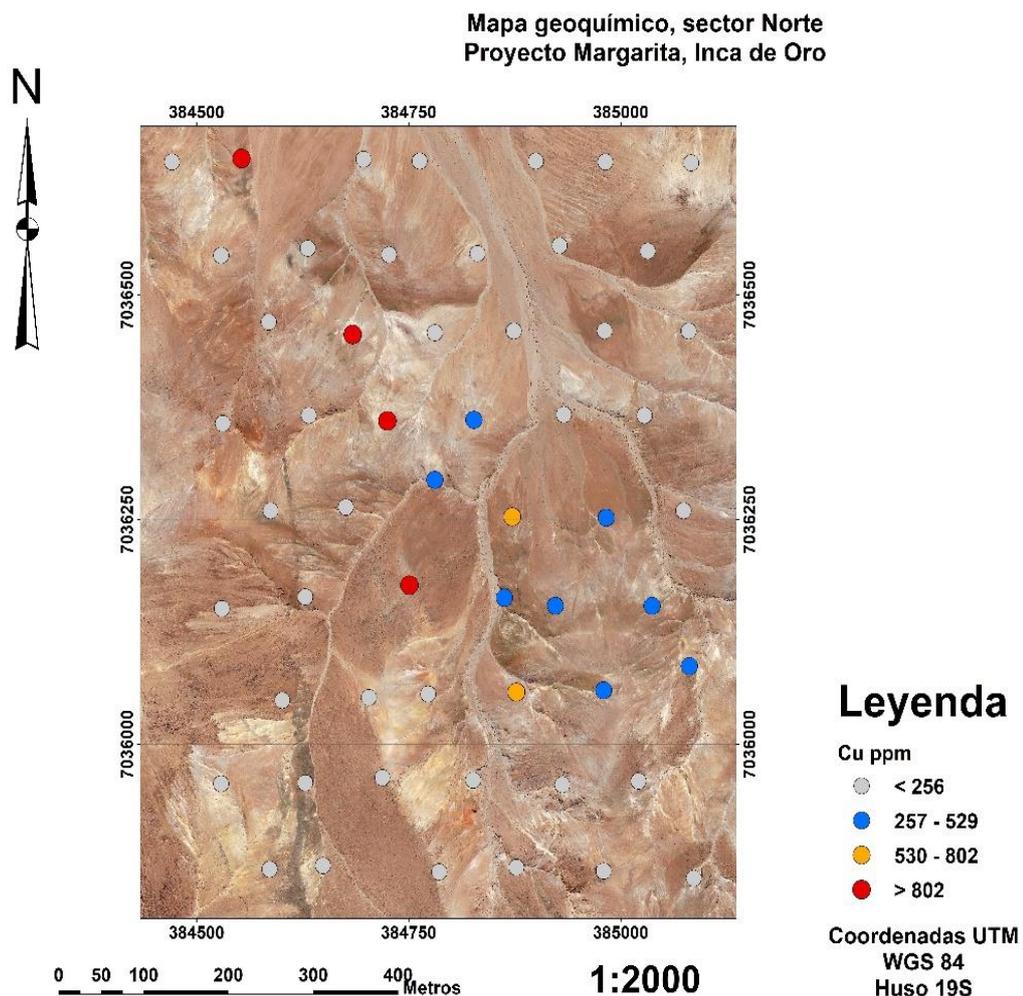


Figura 70: Mapa de anomalías geoquímicas de Cu en sector norte a partir de una malla de muestreo de 100 x 100 m.

Presenta cuatro valores de anomalías altas de cobre (> 802 ppm), destacando un valor máximo de 9660 ppm asociado a rocas cuarzo-dioríticas. La anomalía

presenta una clara tendencia NNW (Figura 70) asociada a un fuerte control estructural de la mineralización, destacando el potencial prospectivo de este sector.

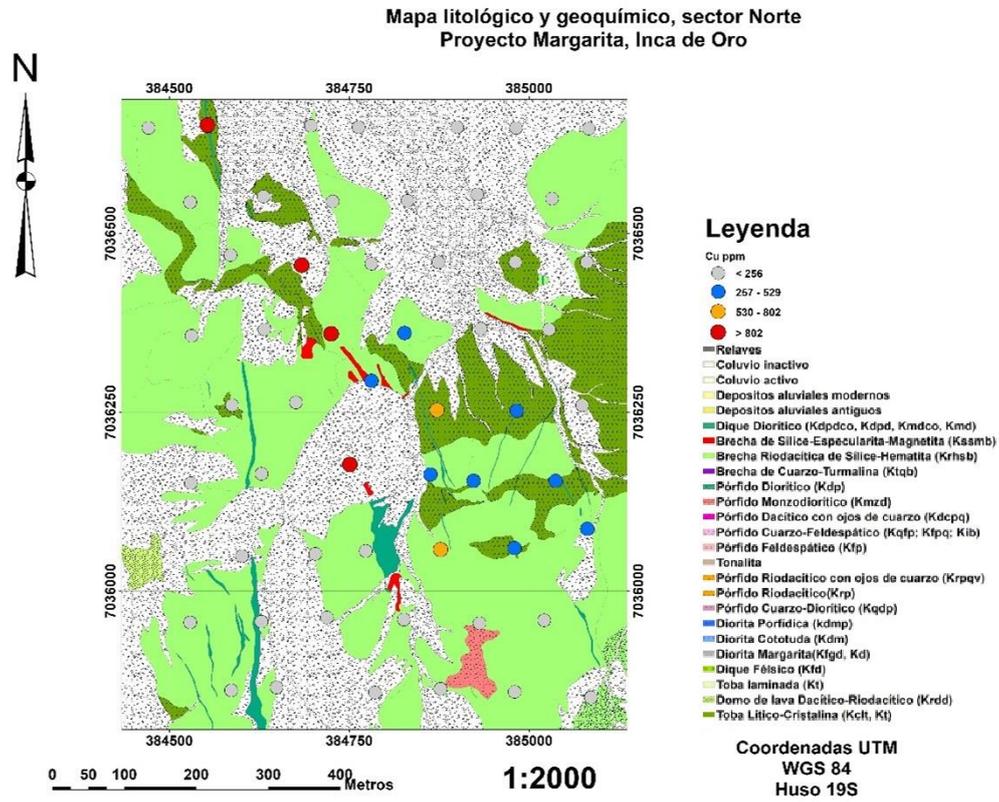


Figura 71: Mapa litológico y geoquímico del sector norte.

- Anomalía Cototuda

La siguiente figura representa el mapa geoquímico de cobre de la anomalía del sector cototuda:

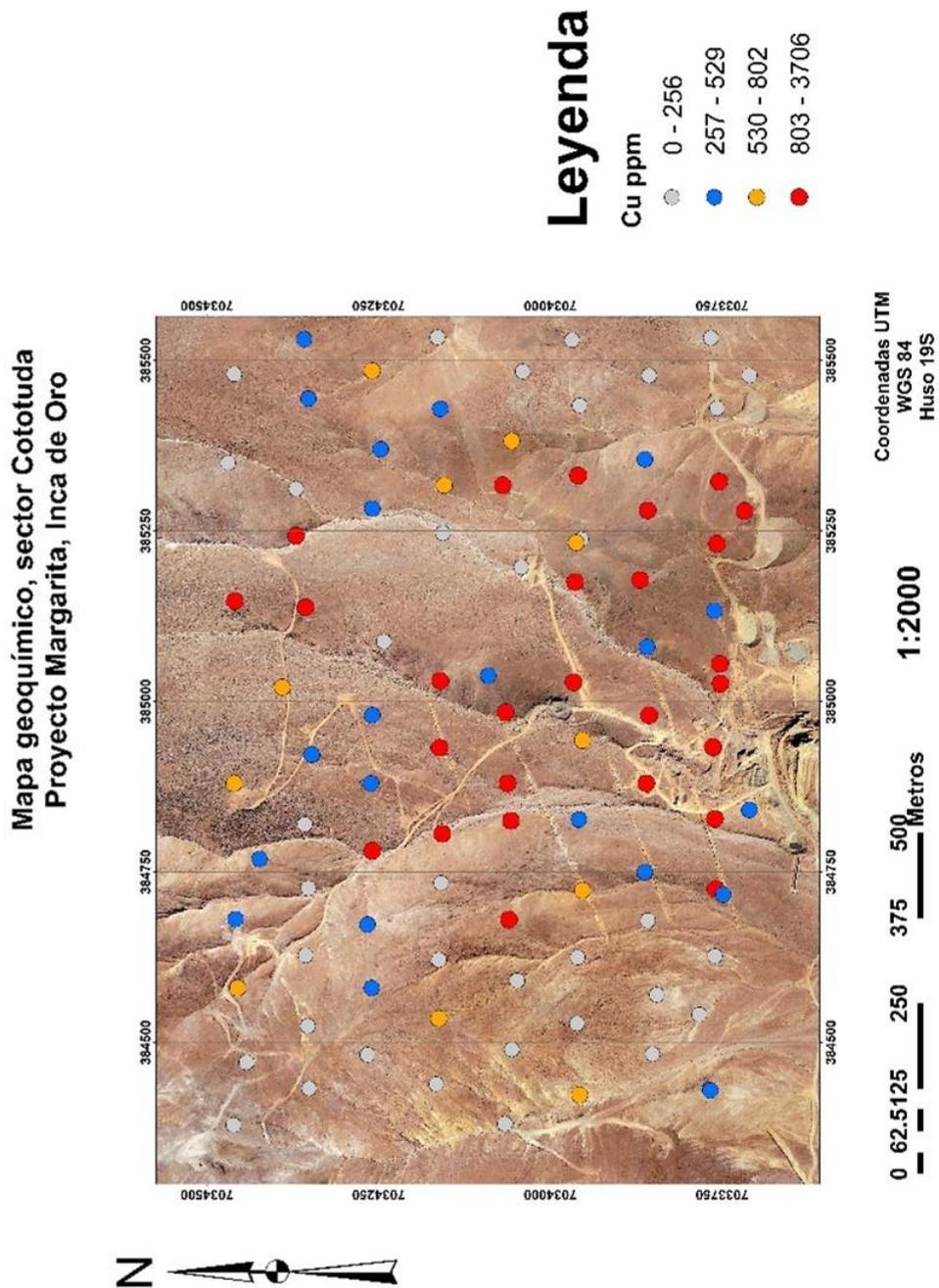
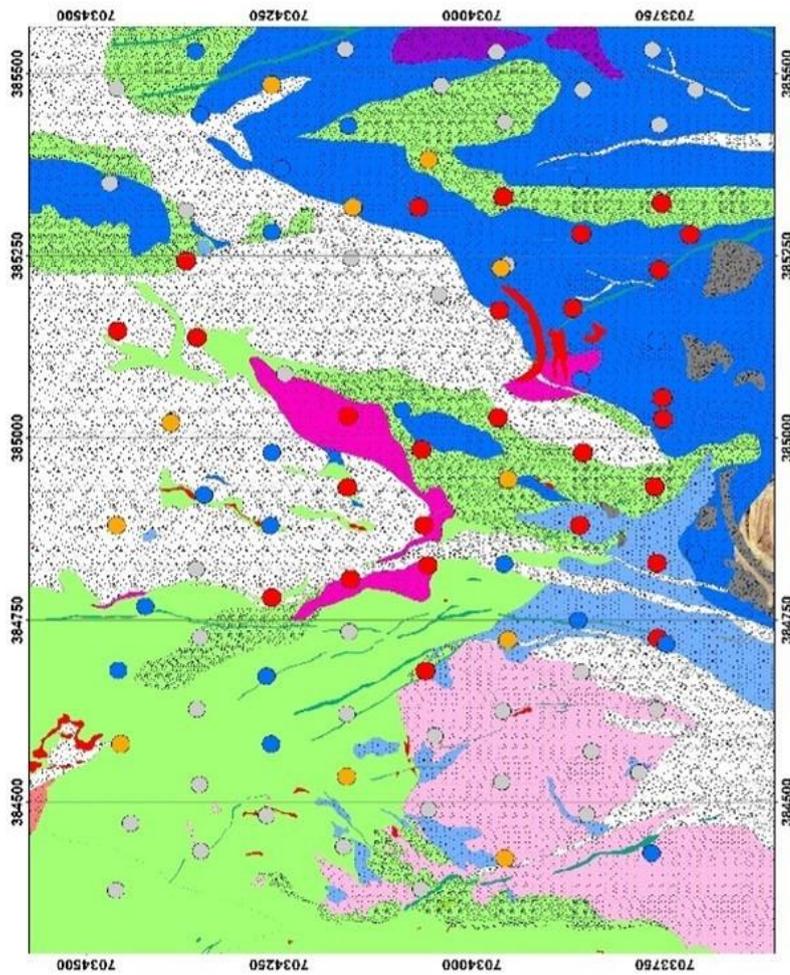


Figura 72: Mapa de anomalías geoquímicas de Cu sector cototuda obtenido de una malla de muestreo de 100 x 100 m.

En este sector se destaca una gran cantidad de valores con anomalías altas de cobre (Figura 72), los cuales se encuentran espacialmente asociados a intrusivos dioríticos y cuarzo-dioríticos junto con diques de textura variable de composición diorítica (Figura 73). Además, se encuentran evidencias de mineralización de óxidos de cobre exóticos con fuerte control estructural, por lo que se destaca el potencial prospectivo de la zona.

**Mapa litológico y geoquímico, sector Cototuda
Proyecto Margarita, Inca de Oro**



Coordenadas UTM
WGS 84
Huso 19S

1:2000

0 62.5 125 250 375 500 Metros

Leyenda

- Cu ppm
- 0 - 256
 - 257 - 529
 - 530 - 802
 - 803 - 3706
- Relaves
- Coluvio inactivo
 - Coluvio activo
 - Depositos aluviales modernos
 - Depositos aluviales antiguos
 - Dique Diorítico (Kdpcdo, Kdpcd, Kmdco, Kmd)
 - Brecha de Silice-Especularita-Magnetita (Ksmb)
 - Brecha Riodacítica de Silice-Hematita (Krhnb)
 - Brecha de Cuarzo-Turmalina (Ktqb)
 - Porfido Diorítico (Kdp)
 - Porfido Monzodiorítico (Kmzd)
 - Porfido Dacítico con ojos de cuarzo (Kdcpq)
 - Porfido Cuarzo-Feldespático (Kqfp; Kfpq; Kib)
 - Porfido Feldespático (Kfp)
 - Tonalita
 - Porfido Riodacítico con ojos de cuarzo (Krpqv)
 - Porfido Riodacítico (Krp)
 - Porfido Cuarzo-Diorítico (Kqdp)
 - Diorita Porfídica (kdmpp)
 - Diorita Cototuda (Kdm)
 - Diorita Margarita (Kfmg, Kd)
 - Dique Félsico (Kfd)
 - Toba laminada (Kt)
 - Domo de lava Dacítico-Riodacítico (Krd)
 - Toba Litico-Cristalina (Kct, Kt)

Figura 73: Mapa litológico y geoquímico del sector cototuda.

- Anomalía Margarita

La siguiente figura representa el mapa geoquímico de concentraciones de cobre en el sector margarita:

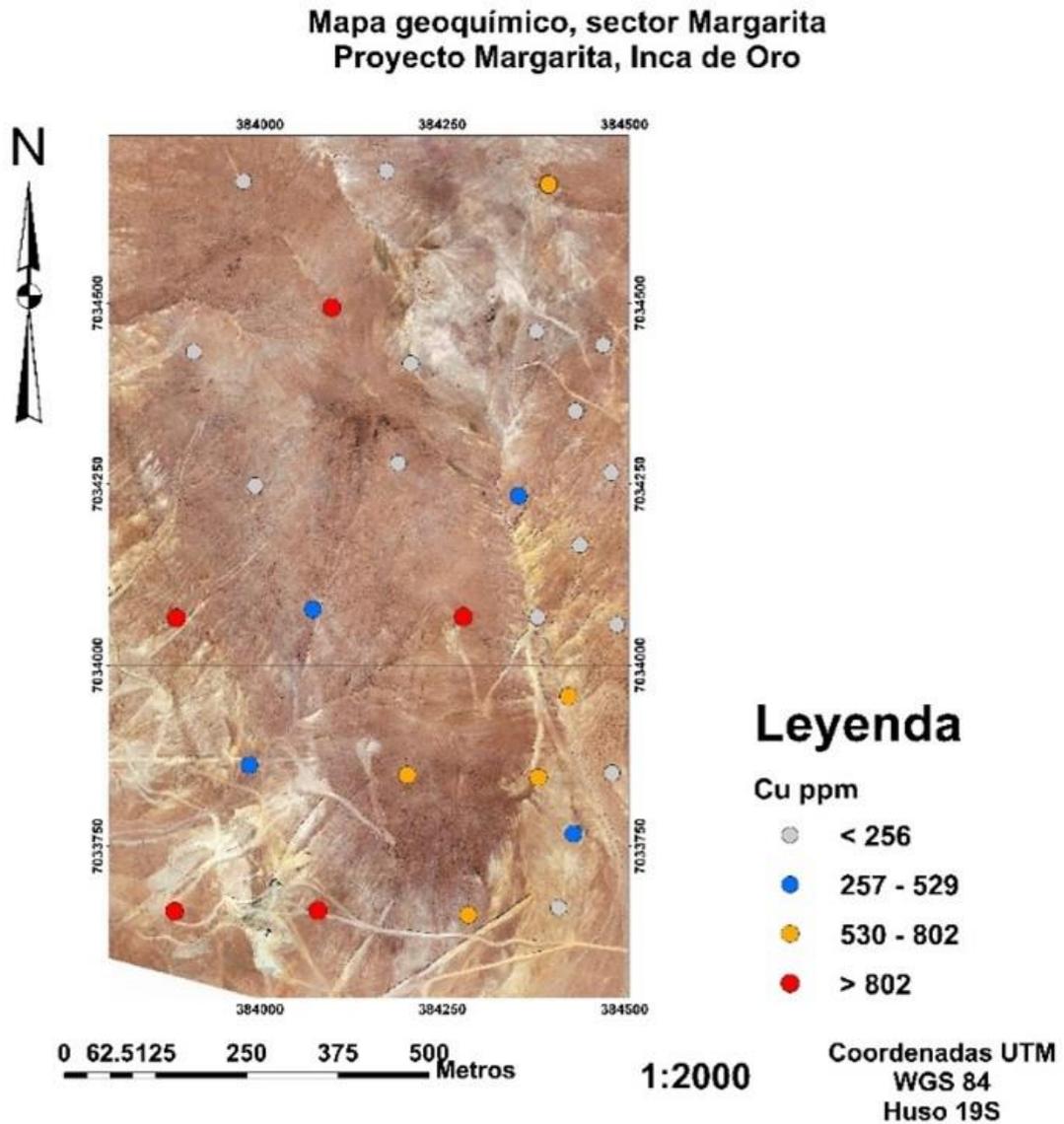


Figura 74: Mapa de anomalías geoquímicas de cobre en sector Margarita obtenido de una malla de muestreo de 200 x 200 m.

En este sector se presentan diversos valores anómalos de concentraciones de cobre, los cuales en terreno se evidencian por óxidos de cobre verde como crisocola junto con cobres negros como tenoritas presentes en fracturas litológicamente asociadas a rocas dioríticas y estructuras brechosas (Figura 75).

**Mapa litológico y geoquímico, sector Margarita
Proyecto Margarita, Inca de Oro**

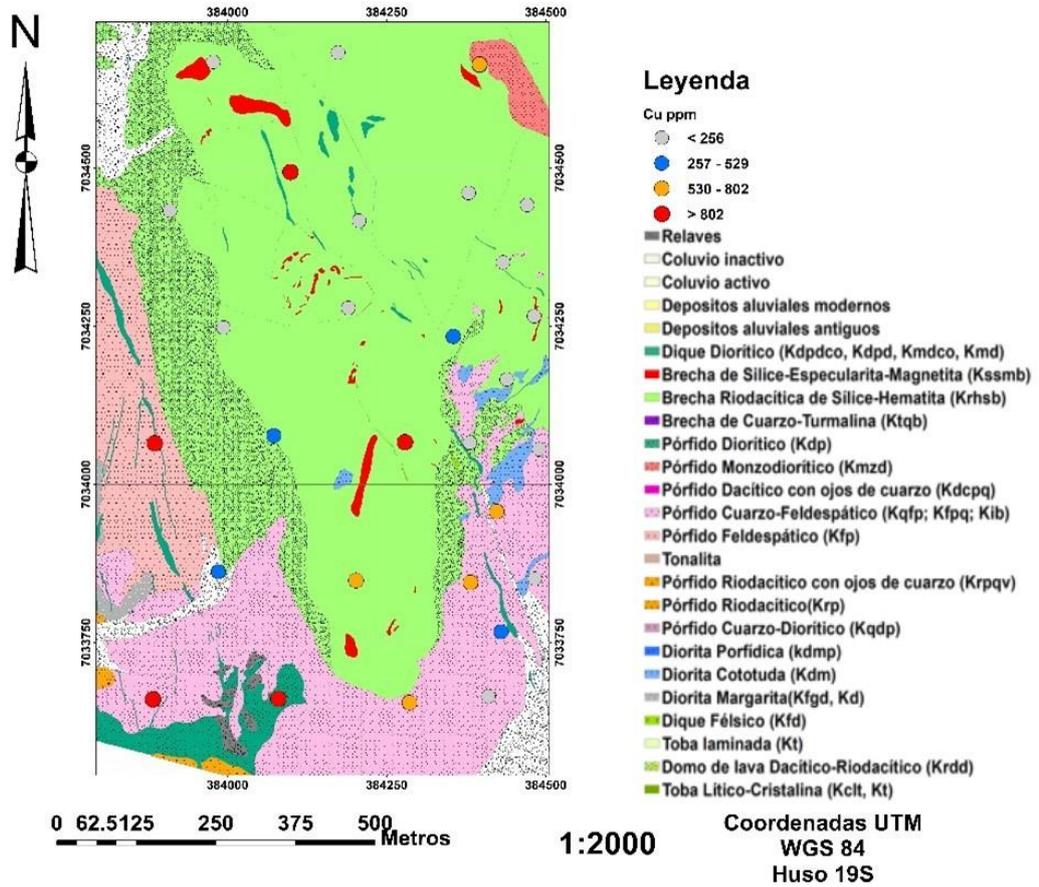


Figura 75: Mapa litológico y geoquímico del sector Margarita.

5.4 Estadística multivariable

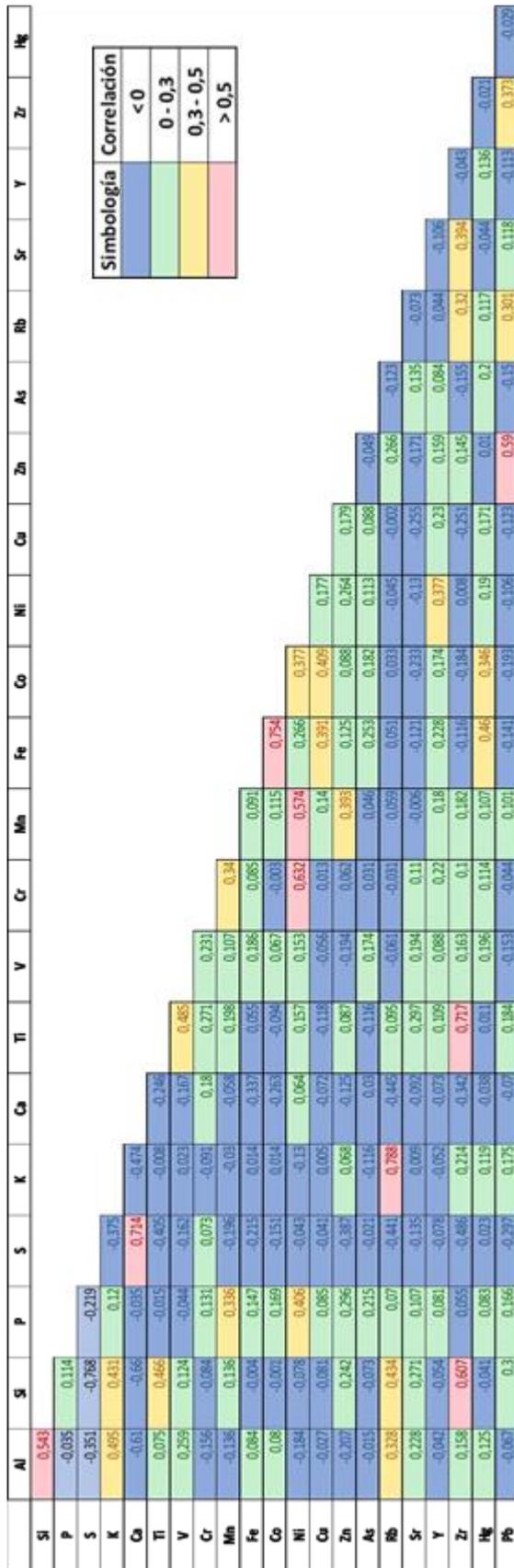
5.4.1 Análisis bivariante

Para efectuar este análisis se toman todos los valores de los elementos en forma independiente con el objetivo de determinar la relación espacial entre los elementos con índice de correlación alto, con la hipótesis de que estos elementos corresponden a asociaciones de igual paragénesis. Para este estudio se utilizó uno de los métodos más usados, el cual corresponde a la determinación del coeficiente de correlación de Pearson y los gráficos de correlación.

- Matriz de correlación:

El cobre tiene los mayores índices de correlación con el hierro (0,391) y el cobalto (0,409) pudiendo inferir que estos elementos se asocian espacialmente y que además pudieran haberse emplazado en un ambiente geoquímico similar. Esta asociación también se confirma debido a la alta correlación existente entre hierro y cobalto (0,754) (Figura 76).

El estroncio y el circonio tienen el menor grado de correlación con el cobre (-0,255 y -0,251, respectivamente), lo cual descarta la posibilidad de que estos elementos tengan una asociación espacial o genética (Figura 76).



Simbología	Correlación
	< 0
	0 - 0,3
	0,3 - 0,5
	> 0,5

Figura 76: Matriz de correlación de Pearson para los elementos analizados por equipo de fluorescencia de rayos X portátil.

- Gráfico de dispersión:

Los siguientes diagramas muestran la relación entre Fe-Co, Fe-Cu y Cu-Co, se representaron la totalidad de las muestras del área de estudio con el propósito de observar y verificar las correlaciones obtenidas previamente entre estos elementos.

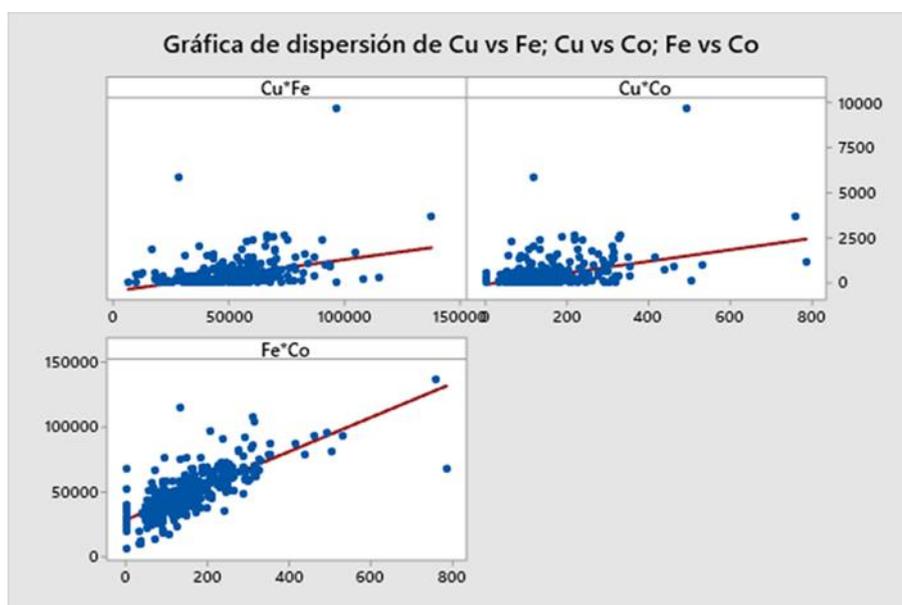


Figura 77: Gráfico de dispersión de Cu-Fe, Cu-Co y Fe-Co

Se logra observar en el gráfico la correlación lineal y positiva entre todos los pares de elementos, se destaca la alta similitud entre hierro y cobalto, la cual disminuye al compararla con el cobre, lo cual es consistente con los resultados obtenidos previamente en la matriz de correlación (Figura 77).

5.4.2 Definición de elementos target y pathfinder

- “Cluster analysis”:

La siguiente gráfica muestra conjuntos de elementos agrupados en base a su correlación y similitud, con el objetivo de visualizar de manera clara varios grupos homogéneos multivariados significativos.

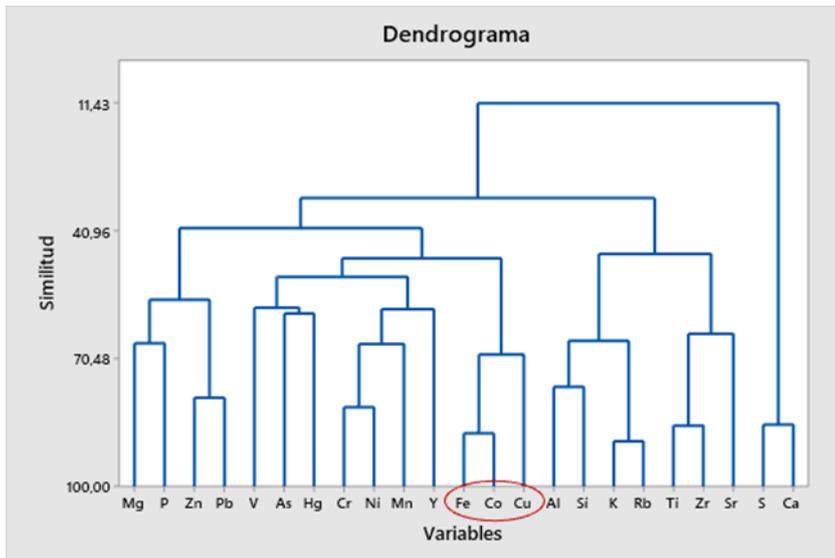


Figura 78: Dendrograma de datos geoquímicos de suelo del proyecto Margarita.

En esta gráfica se logra apreciar la fuerte asociación Fe-Co-Cu, la cual se encuentra correlacionada levemente con la asociación Mn-Ni-Cr-Y. Estos resultados son consistentes con la correlación de Pearson entre Fe-Cu, Fe-Co y Cu-Co, indicando una asociación espacial entre estos elementos y una posible asociación genética. Se observa a la vez la asociación S-Ca, la cual puede relacionarse la formación de caliche, la cual en terreno se observa siempre acompañada de yeso (Figura 78).

- Análisis de componentes principales (PCA):

La siguiente gráfica muestra a los elementos subdivididos en 3 grupos principales no correlacionados entre sí.

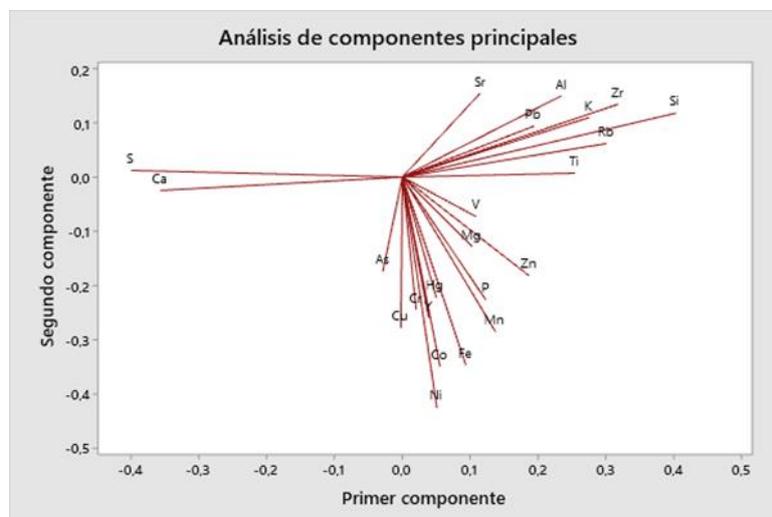


Figura 79: Análisis de componentes principales de datos geoquímicos de suelo del proyecto Margarita

Se observa claramente la asociación S-Ca la cual se correlaciona a la formación de caliche en terreno que siempre se ve acompañada de sulfatos como yeso. Se observa la asociación Fe-Co acompañada de Cu, la cual se asocia a la unidad Brecha riolacítica de sílice-hematita que en terreno se observa la presencia de magnetita además de precipitación de óxidos de cobre. A la vez, esta última asociación mencionada se correlaciona levemente con una gama de elementos como Mn-Ni-P-Zn lo cual responde en terreno a la precipitación de óxidos de cobre negro o “copper wad”, que presentan como elementos principales Mn-Cu y como elementos traza Ni-P-Zn, entre otros (Figura 79).

- Anomalías de Fe-Co:

Con el objetivo de representar la similitud entre las anomalías de Fe-Co y Cu, se representarán los mapas de anomalías geoquímicas Fe-Co.

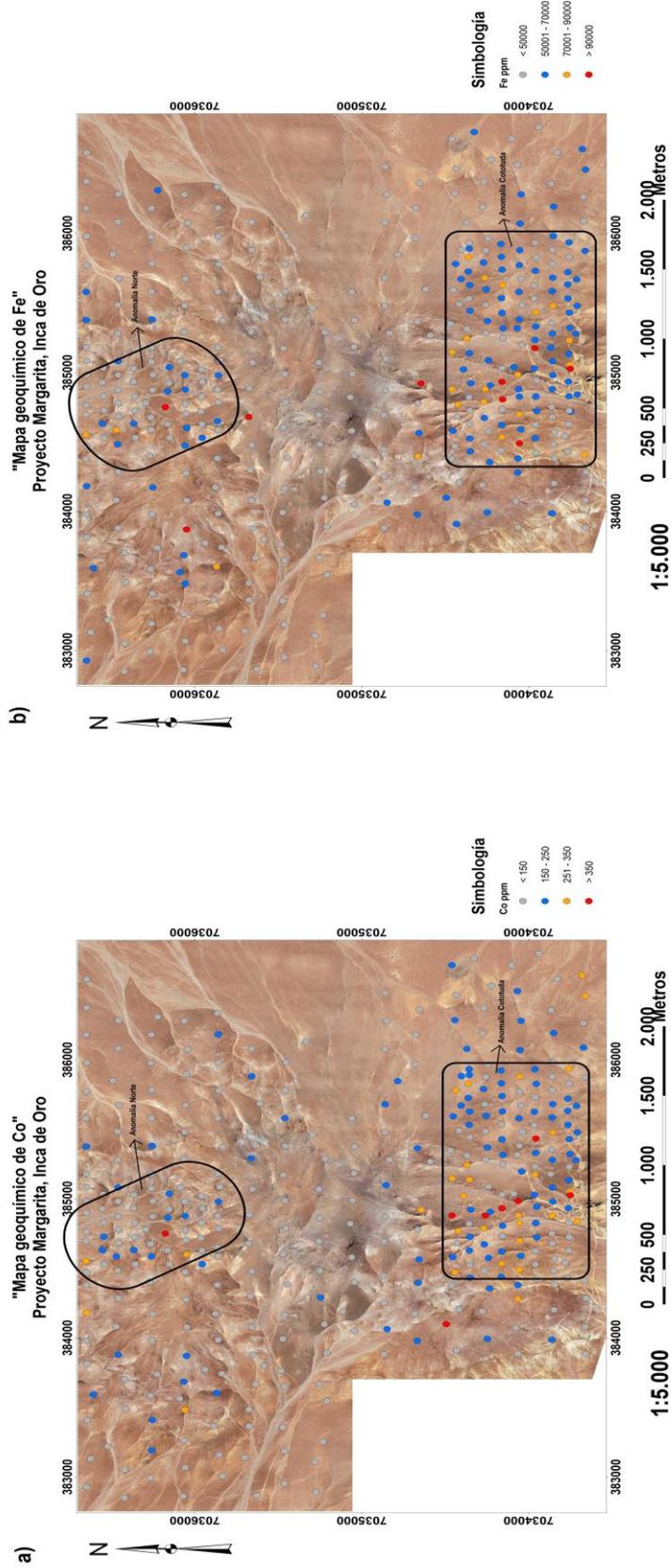


Figura 80: (a) Mapa geoquímico de anomalías de Co en suelos (b) Mapa geoquímico de anomalías de Fe en suelos.

En los mapas de anomalías geoquímicas de Fe-Co (Figura 80) se observa que ambos elementos comparten las mismas zonas de anomalías definidas previamente para el cobre, las cuales son en el sector norte y cototuda. Se infiere que fierro y cobalto presentan una asociación genética y espacial con el cobre, por lo tanto, se definen que son elementos pathfinder del cobre en suelos.

5.5 Control de las zonas mineralizadas

Con el objetivo de definir los controles de las soluciones mineralizadoras, se realizarán análisis a las concentraciones de cobre con enfoque litológico, alteración y estructural.

5.5.1 Control litológico

La unidad Toba lítico-cristalina presenta la mayor cantidad de datos y una media de 306,4 ppm, por sobre el valor de “background” previamente definido para toda el área de estudio; presenta un alto rango de datos entre 12-5891 ppm, también representando por su alta desviación estándar. Las unidades Brecha riódacítica de sílice-hematita y Diorita porfídica presentan promedios de concentraciones de cobre de 464 ppm y 605,8 ppm respectivamente, valores muy por encima del “background” del sector, destacándose en estas unidades su potencial prospectivo debido a las evidencias de mineralización en terreno. La unidad Diorita cototuda presenta altos valores de concentraciones de cobre, siendo la media de 1164 ppm y un rango entre 494 ppm y 2460 ppm. Las unidades Pórfido dacítico, Pórfido feldespático y Pórfido monzodiorítico presentan valores promedios por sobre el valor de “background”, sin embargo, la baja cantidad de datos en esas unidades no permiten inferir un control litológico sobre la mineralización.

Tabla 6: Estadística descriptiva de concentraciones de cobre en unidades litológicas.

Elemento	Unidad litológica	Datos	Media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Cu	Toba lítico-cristalina	159	306,4	637,3	12	76	119	254	5891
	Brecha riódacítica de Sílice-Hematita	53	464	613,8	41	100	207	565	2661
	Diorita porfídica	48	605,8	610,5	84	140,8	334,5	924,5	2407
	Pórfido Cuarzo-Feldespático	31	207,9	243,3	56	85	111	185	1107
	Pórfido Cuarzo-Diorítico	26	231,7	177,4	47	93	167	300,3	688
	Domos de lava Dacíticos a Riódacíticos	26	52,98	13,68	20	45,5	51,5	58	80
	Pórfido Feldespático con ojos de cuarzo	9	203,9	174,4	64	103	137	277	597
	Diorita Cototuda	8	1164	712	496	531	1010	1711	2460
	Pórfido Riódacítico	7	149,1	123,5	68	84	105	152	423
	Pórfido Riódacítico con vetillas de cuarzo	6	473	689	92	100	143	849	1840
	Pórfido Dacítico	4	1284	850	360	506	1206	2139	2362
	Pórfido Monzodiorítico	2	484	504	127	*	484	*	840
	Pórfido Feldespático	1	2008	*	2008	*	2008	*	2008
	Diorita Margarita	1	58	*	58	*	58	*	58
	Tonalita	1	127	*	127	*	127	*	127
	Brecha de Cuarzo-Turmalina	1	241	*	241	*	241	*	241

La unidad Toba lítico-cristalina concentra el 75% de sus valores bajo 254 ppm, pero con una gran cantidad de outliers. Las unidades Diorita porfídica y Brecha riódacítica de sílice-hematita concentran el 50% sus valores entre 140-924 ppm y 100-565 ppm respectivamente, evidenciando una alta variabilidad, pero por sobre todo presentan la mayor cantidad de valores anómalos en el área de estudio. Las unidades Pòrfido dacítico, y Pòrfido dacítico presentan altos valores de concentraciones, pero la baja densidad de datos no permite inferir control litológico en la mineralización. No presentan gráfico de caja las unidades Tonalita, Brecha de cuarzo-turmalina y Pòrfido feldespático debido a que solo tienen 1 dato asociado (Figura 81).

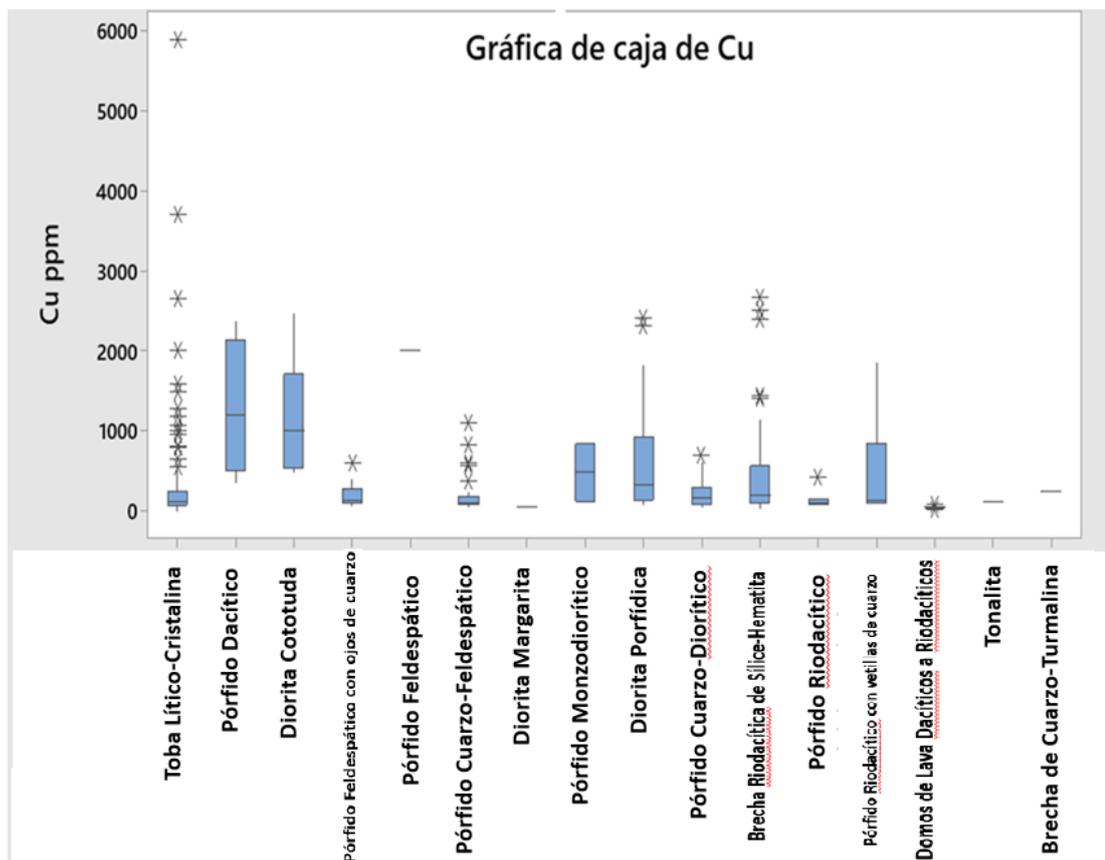


Figura 81: Gráfico tipo boxplot de concentraciones de cobre en las unidades litológicas.

El siguiente mapa muestra el mapa geológico del junto con los valores de concentraciones de cobre:

Mapa geológico y geoquímico Proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile

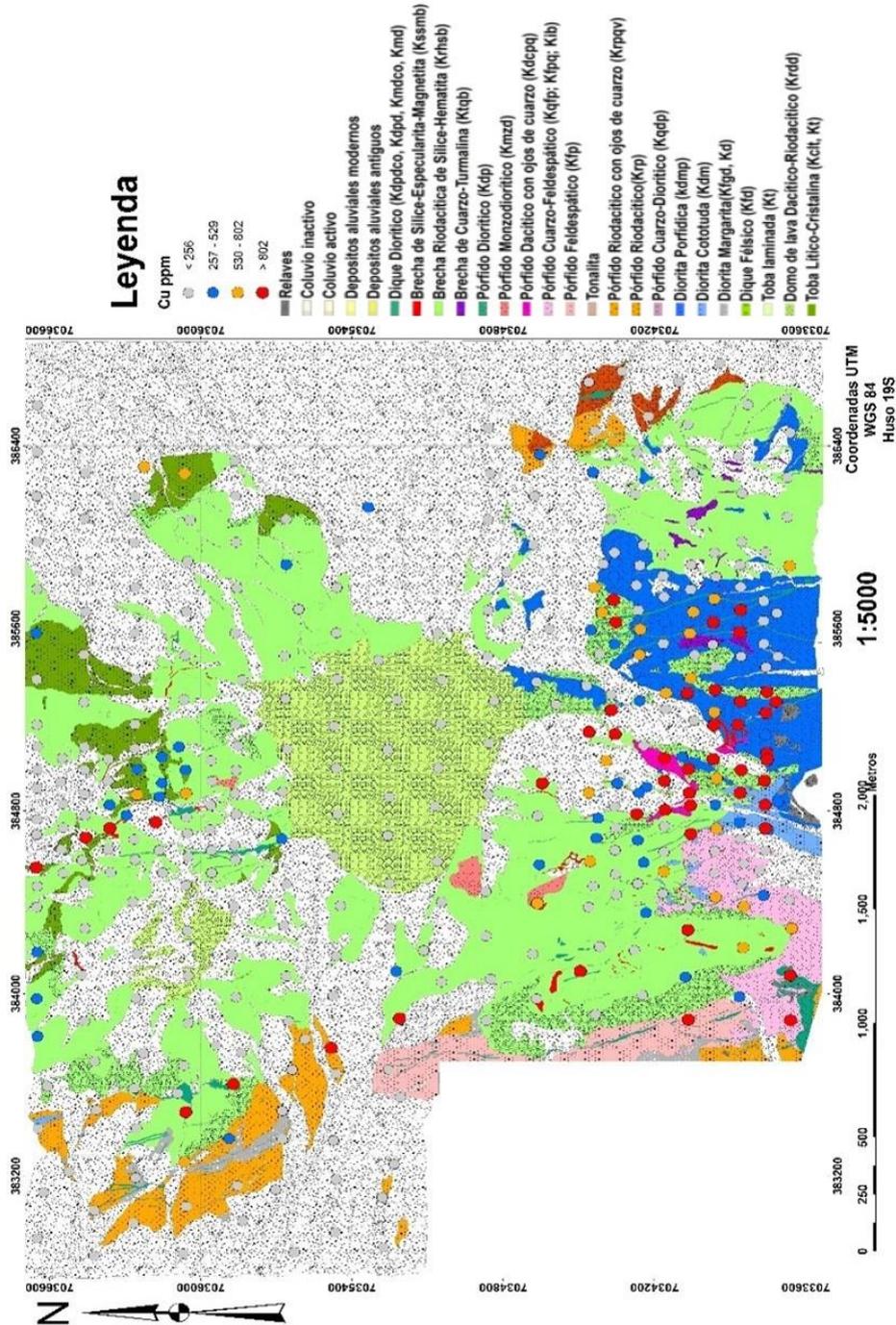


Figura 82: Mapa geológico y geoquímico del proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.

5.5.2 Control de la alteración sobre la mineralización

Las unidades de alteración sericita-clorita y potásica presentan el valor promedio más alto de concentraciones de cobre, con 1016 ppm y 741 ppm respectivamente, destacándose además las evidencias de mineralización observadas en terreno. La unidad hematítica y sericítica tienen la mayor cantidad de datos y por lo tanto la mayor extensión, junto con promedios de 348,2 ppm y 355,5 ppm, por encima

del “background” para el área de estudio. Las unidades que presentan menor concentración son cuarzo-sericita, clorita, y sílicea, indicando que no presentan relación espacial con la mineralización de cobre (Tabla 7).

Tabla 7: Estadística descriptiva de concentraciones de Cu en unidades de alteración.

Elemento	Alteración	Datos	Media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Cu	Hematítica	117	348,2	526,9	34	90	136	345,5	2661
	Sericítica	112	355,5	545,5	38	100,8	152	376,8	3706
	Sílicea	47	234,3	426,2	20	51	68	127	2008
	Argílica	37	378	992	12	57	93	252	5891
	Cuarzo-Sericita	19	160,5	137,1	41	63	103	221	555
	Clorita	18	274,6	191,4	47	126,8	204,5	441,8	688
	Potásica	17	741	693	58	143	653	1109	2407
	Sericita-Clorita	9	1016	747	185	429	719	1559	2460
	Clorita-Epidota	4	690	639	55	105	657	1309	1392
	Sericita-Turmalina	3	360	403	102	102	153	824	824
	Sílice-Turmalina	1	728	*	728	*	728	*	728

El gráfico tipo box plot muestra que, en las unidades de alteración potásica, clorita-epidota, sericita-clorita existe una alta concentración de altos valores de cobre, sin embargo, todas las unidades descritas presentan valores máximos por sobre el “background” del área de estudio, por lo que no se puede inferir de manera clara una asociación entre la mineralización de cobre y la alteración.

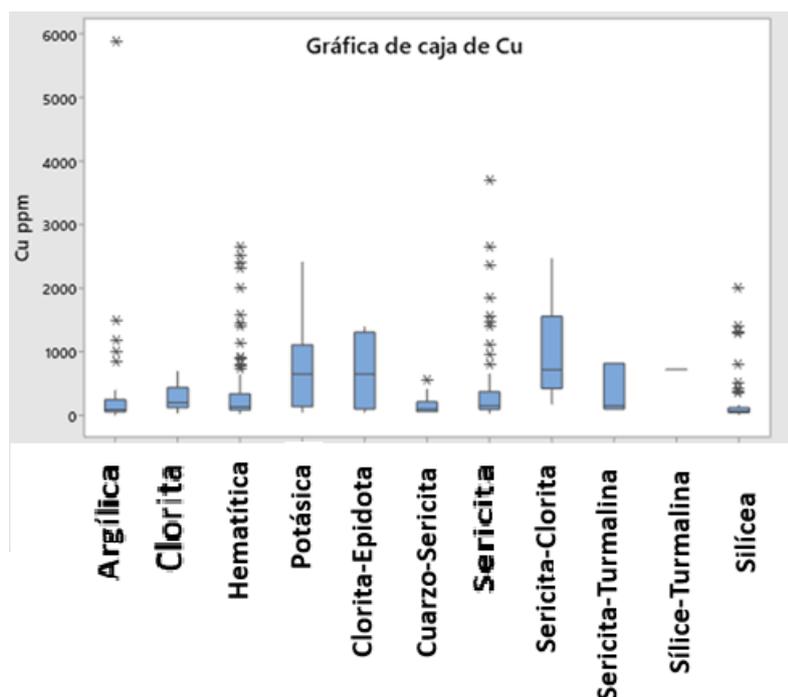


Figura 83: Gráfico tipo box plot de concentraciones de cobre en unidades de alteración.

El siguiente mapa muestra la relación entre las zonas de alteración y las concentraciones de cobre en el sector de Cototuda.

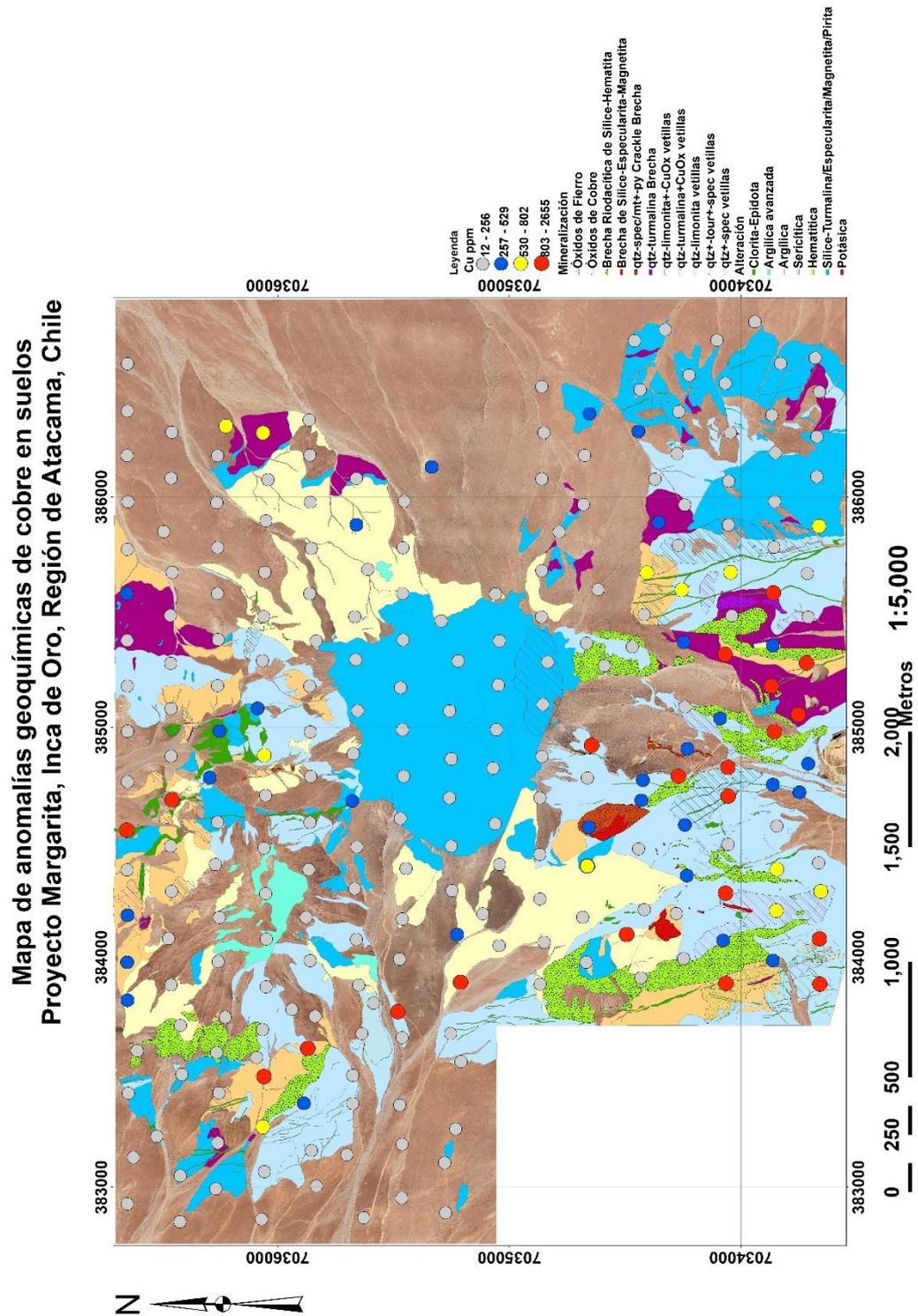


Figura 84: Mapa de alteración y geoquímico del proyecto Margarita, Inca de Oro, Región de Atacama, Chile.

5.5.3 Control estructural sobre la mineralización

Se observan dos sistemas estructurales principales con tendencia NNE y NNW, en ellos se destaca la presencia de valores anómalos de concentraciones de cobre. En el sector norte y noroeste se advierte la presencia netamente de estructuras con tendencia NNW. Por otro lado, en el sector de Cototuda se encuentran estructuras con ambas tendencias y en algunos casos interceptándose, por lo que se puede inferir un control estructural para la mineralización exótica de cobre (Figura 85).

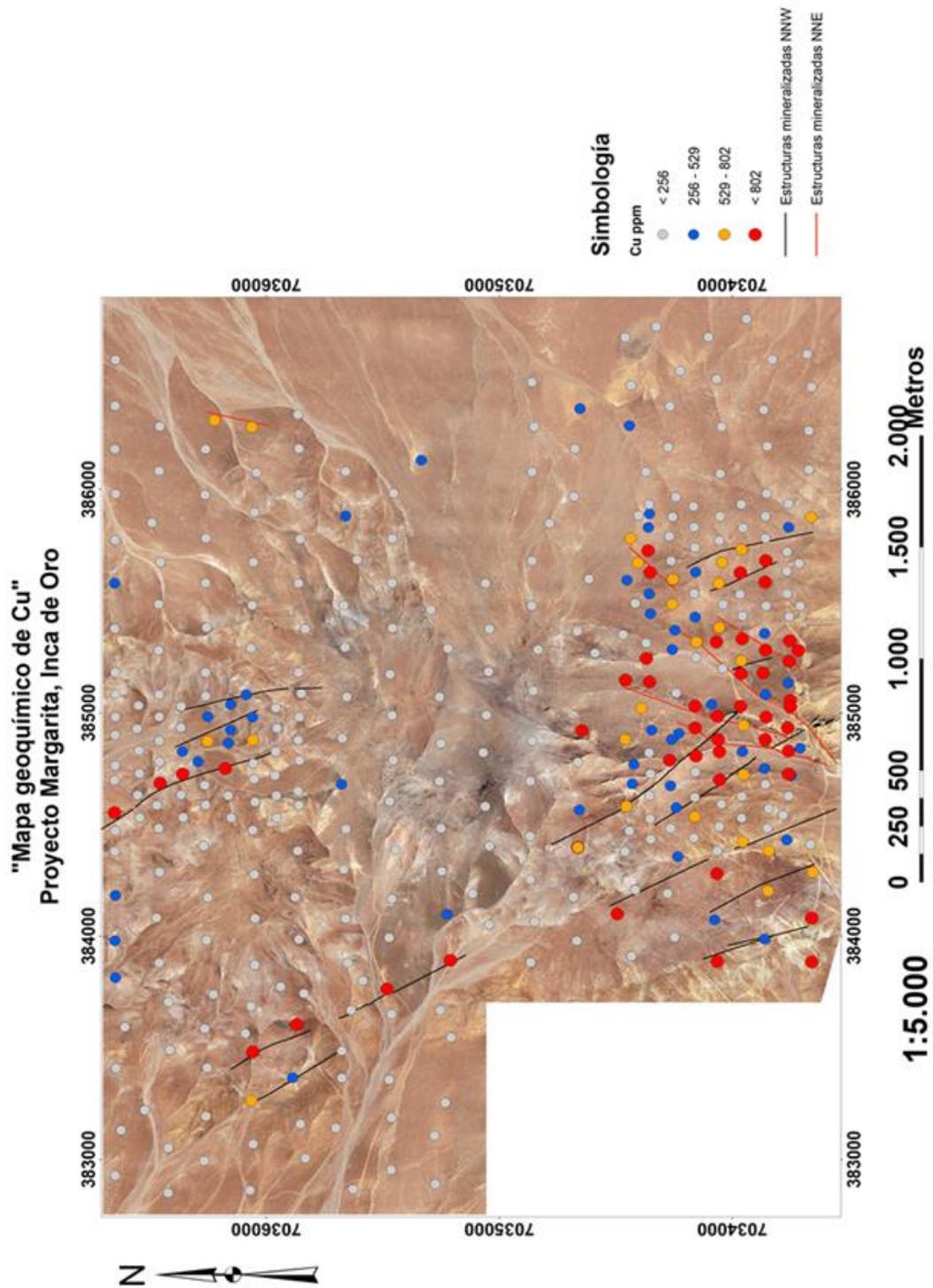


Figura 85: Mapa geoquímico de concentraciones de Cu en estructuras mineralizadas.

5.6 Análisis de la calidad y aseguramiento de la calidad (QA/QC)

Con el objetivo de analizar la precisión y exactitud del equipo portátil de fluorescencia de rayos X se llevó a cabo un proceso de QA/QC, el cual consistió en la obtención de duplicados de campo además de muestras para ser analizadas por el método ICP-MS.

5.6.1 Duplicados

Para definir la precisión del método pXRF en los distintos elementos se recolectaron a lo largo de la campaña de muestreo 20 duplicados de campo los cuales fueron analizados por el equipo pXRF y luego se compararon con las muestras regulares. La siguiente gráfica compara los resultados obtenidos en ambas muestras:

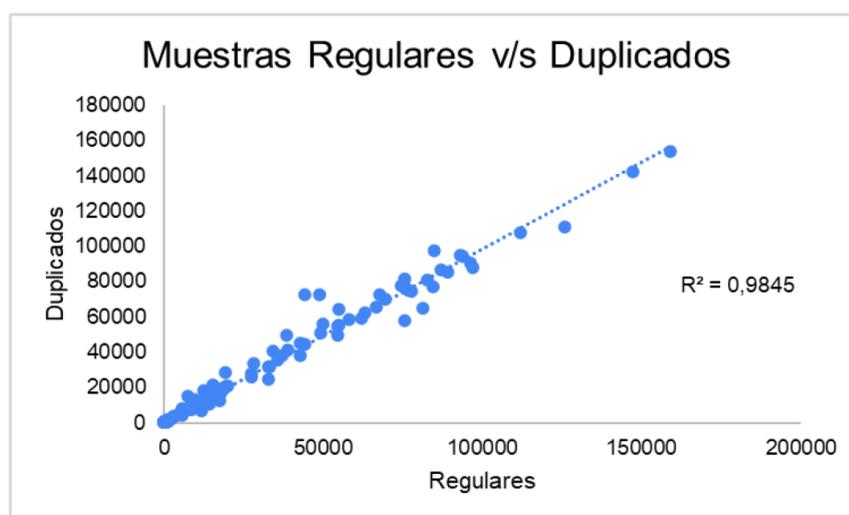


Figura 86: Análisis de correlación de muestras regulares y duplicados.

De manera general se observa una gran similitud en los resultados para ambos tipos de muestra, en base al $R^2=0,9845$ se destaca que se presenta una regresión lineal y alta correlación para los análisis de muestras regulares y duplicados, por lo tanto, se infiere que el equipo pXRF presenta una alta precisión (Figura 86).

La siguiente gráfica compara los resultados obtenidos en los análisis de muestras regulares y duplicados para cada elemento estudiado:

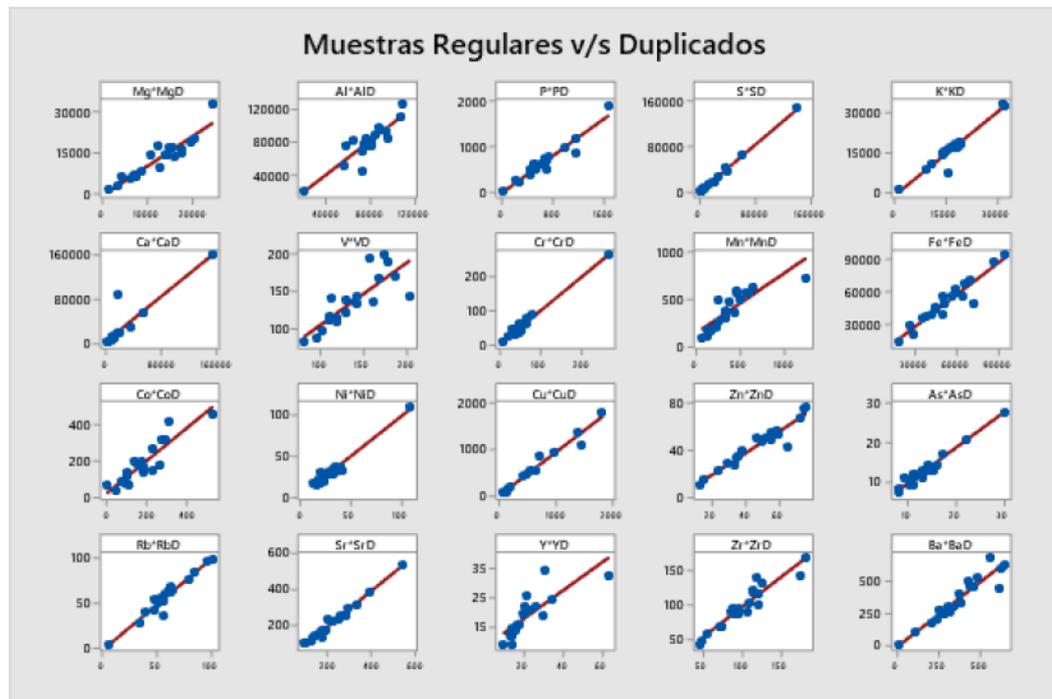


Figura 87: Análisis de correlación de elementos en muestras regulares y duplicados.

En forma particular, elementos litófilos como Mg, P, K, Ca, Rb, Sr, Ba y Zr presentan buena precisión, la cual disminuye levemente para casos como Y, V, Al. Siderófilos como Cr, Mn, Ni tienen alta precisión y para Fe, Co esta disminuye levemente. Por otro lado, en los elementos calcófilos como Cu, Zn, As y S se observa alta precisión en los resultados (Figura 87).

5.6.2 Análisis ICP

Para definir la exactitud del método pXRF y de los elementos analizados se recolectaron un total de 15 muestras para análisis ICP-MS, en la que cada muestra se tamizó a malla #10 y #30, obteniendo dos ejemplares por muestra. La siguiente gráfica muestra la comparación entre las muestras analizadas por ICP y pXRF,

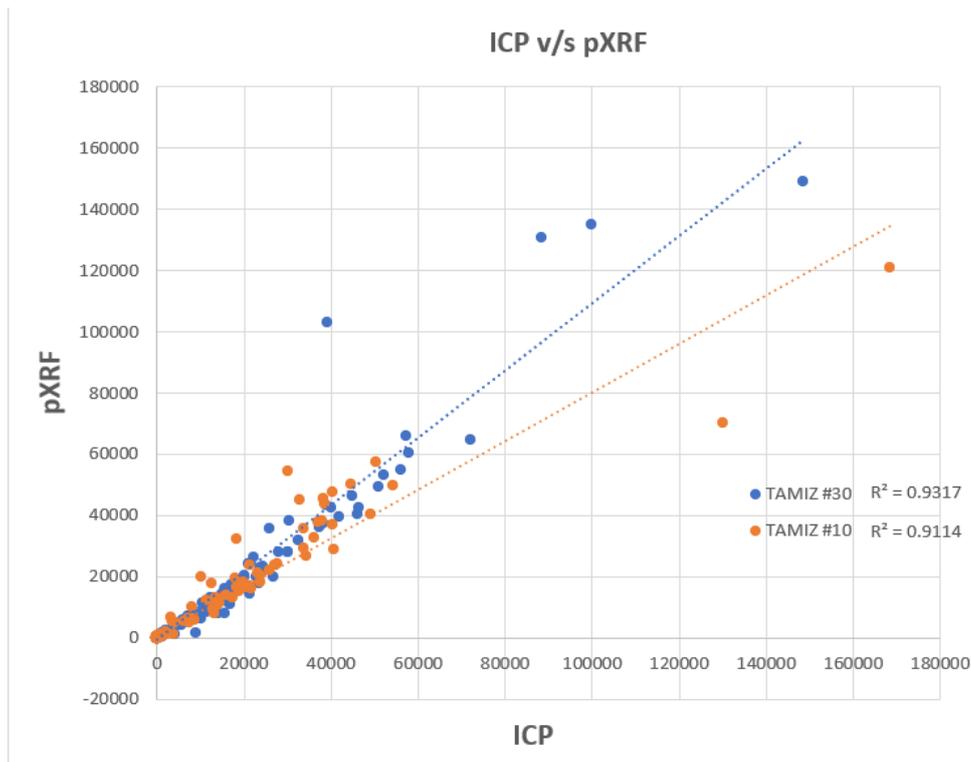


Figura 88: Análisis de correlación entre muestras analizadas por pXRF e ICP en distintas granulometrías.

En general, al analizar todos los elementos se observa que los resultados obtenidos para ambos tamaños de partícula presentan gran similitud entre los dos métodos de análisis. En base al índice de correlación R^2 obtenidos (0,9317 y 0,9114 para tamiz #30 y #10 respectivamente) se destaca que los análisis a tamiz #30 presentan una leve mayor semejanza entre los métodos pXRF e ICP (Figura 88).

- Malla #30

La siguiente gráfica compara los resultados obtenidos en los análisis ICP y pXRF en malla #30 para cada elemento estudiado:

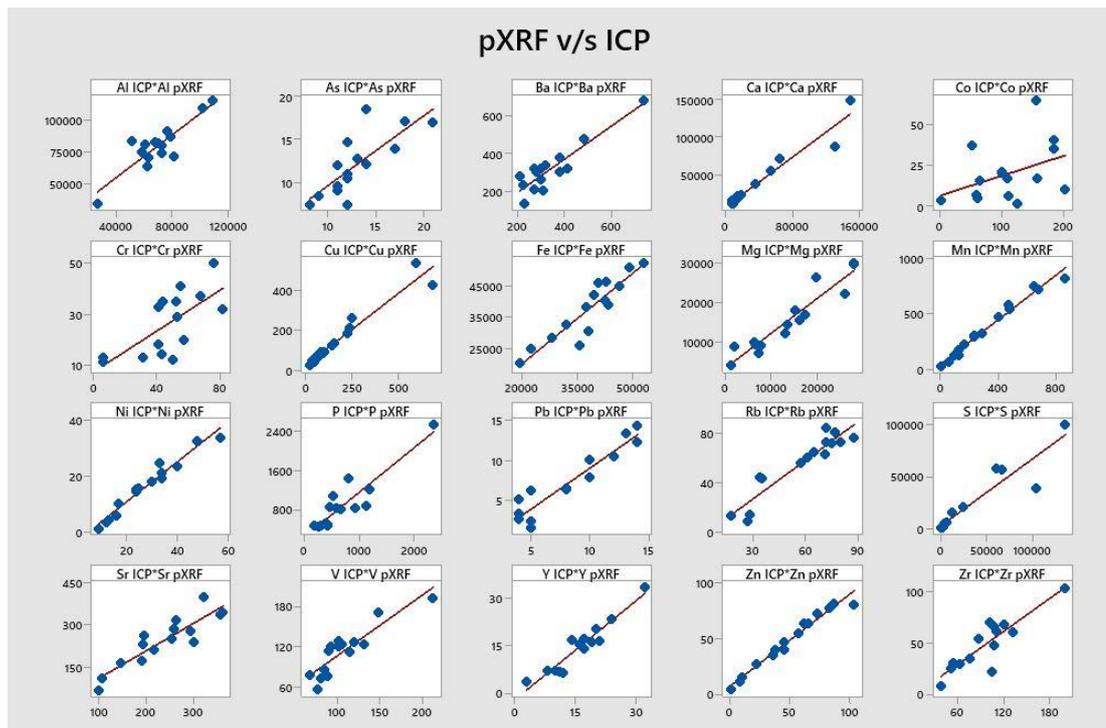


Figura 89: Análisis de correlación de cada elemento medido por pXRF e ICP en muestras de tamiz #30.

Elementos litófilos como Mg, Al, Rb, Sr, P, V, K y Ca presentan una buena exactitud, por otro lado, en el caso del Ba, Y, Zr la exactitud disminuye levemente. Para elementos siderófilos la exactitud es variable, siendo el caso de Mn y Ni con una buena exactitud; para Fe disminuye levemente, y el Co disminuye para valores menores a 10 veces el límite de detección y el Cr presenta exactitud baja. Finalmente, los elementos calcófilos como Cu, Zn, S, As presentan una alta exactitud en sus resultados. No se pudo comparar Si, Hg y Ti ya que no se obtuvieron resultados en el método ICP (Figura 89).

- Malla #10

La siguiente gráfica compara los resultados obtenidos en los análisis ICP y pXRF en malla #10 para cada elemento estudiado:

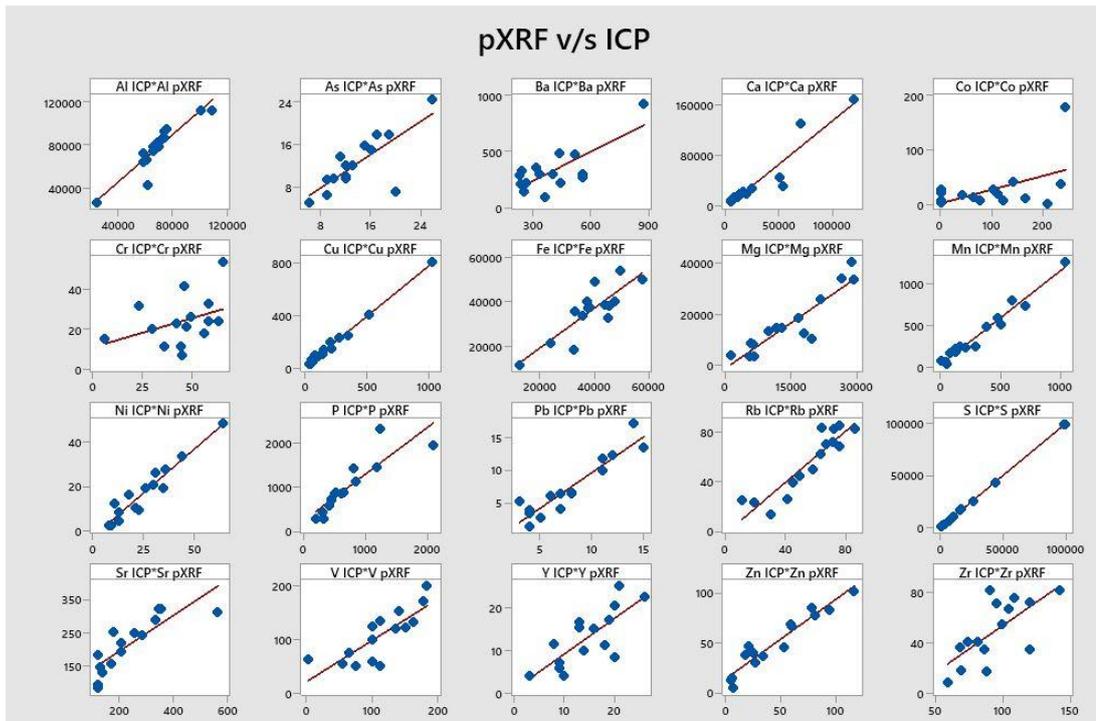


Figura 90: Análisis de correlación de cada elemento medido por pXRF e ICP en muestras de tamiz #30.

Elementos litófilos como Mg, Al, Rb, V, P, Ca y K presentan una buena exactitud, en el caso de Zr e Y se observa una exactitud menor y el Sr y Ba disminuye fuertemente su exactitud en comparación a los resultados en tamiz #30. Elementos siderófilos presentan una exactitud variable, Mn, Ni tienen una buena exactitud, Co tiene baja exactitud para valores cercanos al límite de detección y la exactitud del Fe disminuye considerablemente con respecto al tamiz #30 al igual que el Cr. Finalmente, elementos calcófilos como Cu, Zn y S tienen una buena exactitud, disminuyendo levemente en el As. No se pudo comparar Si, Hg y Ti ya que no se obtuvieron resultados en análisis ICP (Figura 90).

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

El diverso grupo de yacimientos de óxido de hierro, cobre y oro (IOCG, por sus siglas en inglés) ha sido una de las clases de yacimientos minerales más polémicas desde su reconocimiento como un nuevo tipo a mediados de la década de 1980 hasta principios de la de 1990. El centro de los debates han sido la definición, clasificación, los roles de las fuentes magmáticas y no magmáticas de fluidos y metales, y los entornos tectónicos (Meyer, 1998).

El Proyecto Margarita está ubicado cerca de la frontera oriental de la Cordillera costera de la región de Atacama en el límite con la depresión central. El estudio petrográfico y las relaciones de contacto de las diversas litologías permiten establecer que el edificio geológico del área de estudio corresponde a una secuencia de rocas volcánicas a volcanoclásticas de composición ácida intruida por cuerpos de mayor a menor escala dioríticos a cuarzo-dioríticos.

Dichas descripciones junto con la ubicación espacial permiten establecer que las secuencias volcánicas se correlacionan a la Fm. Punta del Cobre de edad Cretácico bajo-medio las cuales se encuentran intruidas por cuerpos de composición básica a intermedia (Segerstrom & Ruiz, 1962).

El ambiente tectónico del distrito está dominado por tres orientaciones principales de sistemas estructurales, el NNE-SSW, NW-SE y el NE-SW. El sistema de fallas de Atacama de tendencia NNE-SSW controlaba tanto el emplazamiento de los plutones del Jurásico Superior como el Cretácico Inferior (e.g. Grocott & Taylor, 2002; Arevalo et al., 2006) y el desarrollo de depósitos de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG), incluidos Manto verde y Candelaria cuya mineralización se encuentra alojada en brechas o litologías específicas emplazadas en sistemas de fallas NNW (del Real, 2018) lo cual se evidencia en las tendencias estructurales que presentan evidencias de mineralización en el área de estudio, especialmente en la anomalía del sector Norte, lo cual se asocia a una estructura secundaria del sistema de fallas de Atacama (Benavides et al., 2007; Rieger et al., 2010).

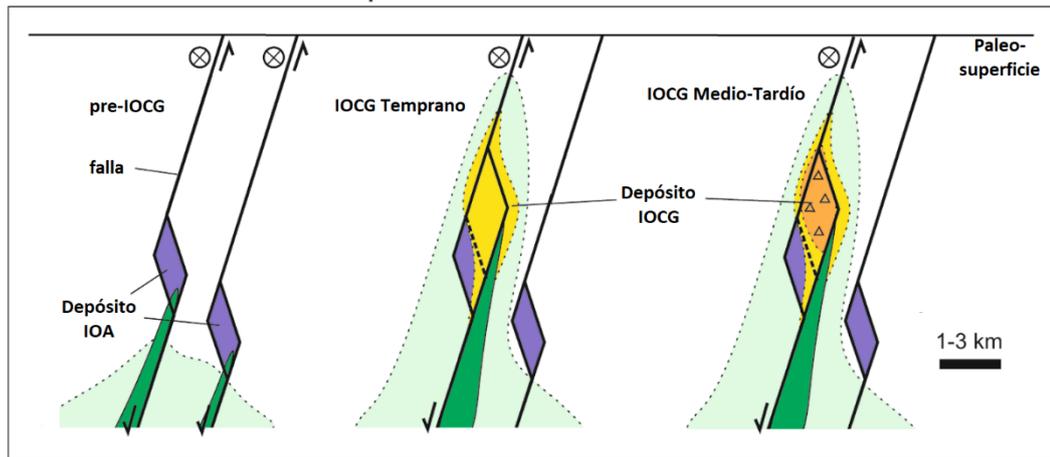
El sistema de fallas de mina Julia de componente inverso-sinistral de tendencia NNE aloja mineralización de Cu-Fe-Au (Arévalo, 2021) lo cual se refleja en las estructuras con mineralización de Cu-Fe en el sector de Cototuda. Además, Las estructuras NE-SW se reconocen como fallas discontinuas cortadas por todos los

demás sistemas que pudieron haber controlado el emplazamiento de los cuerpos intrusivos haber jugado un papel importante en la migración de fluidos.

Skirrow (2021) define geoquímicamente los yacimientos IOCG con moderados a altos enriquecimientos de elementos siderófilos como “IOCG-Co” los cuales además presentan grandes cantidades de magnetita, además los depósitos tipo pórfido, ampliamente reconocidos como de origen magmático-hidrotermal tienen valores de elementos siderófilos generalmente <100 para muestras con $\text{Cu} > 1000$ ppm.

En el caso del proyecto Margarita se evidencia una clara asociación entre las anomalías de Fe-Co-Cu que además se asocia mineralógicamente a zonas con magnetita-mushketovita lo cual según Skirrow (2021) representaría una firma geoquímica característica de yacimientos tipo IOCG. Debido a que el alcance de este estudio se abarca al análisis geoquímico de suelos, es necesario corroborar si estas asociaciones son consistentes con muestras de rocas o de sondajes que evidencian el ambiente hipógeno.

Algunos tipos de alteración características de pórfidos cupríferos son sericita, argílica y argílica avanzada (Sillitoe, 2003), los cuales se evidencian en ciertos sectores del Proyecto Margarita. Por otro lado, el estilo predominante de mineralización de IOCG consiste en vetas ricas en hematita, mantos y cuerpos de brechas con cantidades menores de calcopirita, pirita y bornita (Figura 91); la mineralización está relacionada con un conjunto hidrotermal con proporciones variables de feldespato K, biotita, clorita, sericita, epidota, carbonatos, cuarzo, actinolita y escapolita (Tornos et al. 2009) los cuales se encuentran también presentes en el área de estudio.



- △ Zona de falla/brecha: Cu-Au con alteración Fe-Ca y sulfuros de Fe (mag-act-py o hem-cal-chl-py)
- Zona de falla: alteración Fe-K con sulfuros de Fe (mag-bt-po)
- Alteración Ca-Na regional a local (ab-act)
- Zona de falla: alteración magnetita-actinolita-apatito (IOA)
- Dique máfico-intermedio
- Roca de caja: ígnea (intermedia)-sedimentaria

Figura 91: Sección esquemática de depósito IOCG Andino con secuencias hidrotermales de alteración mineralización (Skirrow, 2021).

En el caso del Proyecto Margarita, existen ensamblajes de alteración características de tipo pórfido e IOCG. Sin embargo, la firma geoquímica asociada a la mineralización es de tipo Cu-Siderófilos, característica de yacimientos tipo IOCG (Skirrow, 2021), junto con las tendencias estructurales mineralizadas NNW-NNE, por lo cual se postula que la mineralización de cobre en el Proyecto Margarita es de tipo IOCG a la cual se le sobrepuso un evento no mineralizador tipo pórfido evidenciado por los cuerpos intrusivos dioríticos a cuarzo dioríticos y las zonas de alteración sericítica, argílica y argílica avanzada.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las anomalías geoquímicas de cobre detectadas en el proyecto exponen zonas potenciales de prospección, las cuales se encuentran asociadas a rocas intrusivas dioríticas, cuarzo dioríticas y brechas riódacíticas con distintos tipos de alteración presentes, evidenciando que en esos sectores ocurrió una fuerte circulación de fluidos hidrotermales.

Las unidades que presentan mayor concentración de cobre son Diorita porfídica y Brecha riódacítica de sílice-hematita con valores promedios de 605,8 ppm y 464 ppm respectivamente, por encima del “background” del área de estudio, lo que junto a sus características geológicas indican un fuerte potencial prospectivo.

La mayoría de las unidades de alteración presentan una gran variabilidad de valores de concentraciones de cobre junto con máximos sobre los 1000 ppm, además de valores promedios por sobre el background del sector. Por lo tanto, se infiere que el tipo de alteración no controla la mineralización de cobre. Sin embargo, es de vital importancia entender los procesos de alteración presentes que evidencian la alta circulación de fluidos en el área de estudio.

Se evidencian dos corredores estructurales con evidencias de mineralización y valores anómalos de cobre, los cuales tienen tendencias preferenciales NNE y NNW. En el sector norte y noroeste se exponen estructuras mineralizadas de tendencia NNW junto con evidencias de precipitación de óxidos de cobre y en el sector de Cototuda se encuentran estructuras mineralizadas de tendencia NNW y NNE las cuales se interceptan entre sí formando trampas estructurales que pudieron almacenar cobre. Por lo cual se concluye que el proyecto Margarita presenta fuerte control estructural de la mineralización anómala de cobre.

El análisis estadístico bivariado indica que el cobre presenta grados de correlación con fierro y cobalto, lo cual es consistente con la asociación Fe-Co-Cu entregada por el dendrograma de variables y el análisis de componentes principales, por lo tanto, estos tres elementos presentan una asociación genética y espacial comprobada a la vez por la presencia de anomalías geoquímicas de estos tres elementos en los mismos sectores del área de estudio, indicando una clara firma geoquímica tipo IOCG.

El uso del equipo de fluorescencia de rayos X portátil fue un método rápido y efectivo para caracterizar cualitativa y cuantitativamente la geoquímica del Proyecto Margarita. El equipo portátil de fluorescencia de rayos X (pXRF) presenta datos exactos y precisos para una gran gama de elementos. Los elementos calcófilos presentan alta exactitud y precisión, en cambio, siderófilos tienen exactitud y precisión variable. En el caso de elementos litófilos, estos presentan exactitud variable pero alta precisión.

Diseñar un flujo de trabajo concreto para la toma de datos con pXRF es vital para obtener resultados cercanos a la realidad y confiables para su posterior tratamiento estadístico y toma de decisiones en tiempo real que a su vez también debe considerar todas las variables de campo peculiares que presenta cada terreno.

Referencias

Astudillo, F., Lacassie, J., Baeza, L., Barrera, J., Carrasco, F., Castillo, P., Espinoza, F., Figueroa, M., Miralles, C., Muñoz, N., Ramírez, C., Salinas, P. (2015). Principales características geoquímicas en los sedimentos de la Hoja Pisagua, Regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota, Chile. XIV Congreso geológico Chileno, La Serena.

Agnew, P. D. (1999). Interpretation and visualization of soil and rockchip geochemistry, Sepon Project, Laos. Australian Institute of Geoscientists Bulletin. Exploration Geochemistry for the new millennium: 113-223.

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Taylor, G., (2006). Structural setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au deposit, *Economic Geology* 101(4):819-841.

Barton, M.D., Johnson, D.A., (1996). Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide (REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology* 24, 259-262

Barton M.D. (2014). Iron Oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In *Treatise of Geochemistry* eds. H. Holland and K.Turekian. vol. 13, pp. 515-536

Bounessah, M & Atkin, B.P. (2003). An application of exploratory data analysis (EDA) as a robust non-parametric technique for geochemical mapping in a semi-arid climate. *Applied Geochemistry*. 18. 1185-1195.

Carranza, E. (2009). Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Chapter 3: Exploratory Analysis of Geochemical Anomalies. Volume 11, Pages 51-84.

Chen D, Wei J, Wang W, Shi W, Li H, Zhan X. (2019). Comparison of Methods for Determining the Thresholds of Geochemical Anomalies and the Prospecting Direction—A Case of Gold Deposits in the Gouli Exploration Area, Qinghai Province. *Minerals*. 9(6):368

Cueva, P. (2017). “Prospección Geoquímica Del Prospecto Isabel Distrito Jircán-Huanuco”. Repositorio De Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú

Díaz, A.; Lledó, H.; Gelcich, S.; Espinoza, C.; Portigliati, C.; Vivallo, W.; Vogel, S.; Carrasco, R. 1999. Atlas de Yacimientos metalíferos de la III Región de Atacama, entre los 26° y 28° S. Servicio Nacional de Geología Minería, Informe Registrado IR 99-18, 18 mapas escala 1:150.000.

Edwards R., Atkinson K. (1986) Magmatic hydrothermal deposits. In: *Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration*. Springer, Dordrecht.

Filzmoser, P.; Hron, K.; Reimann, C. (2009). Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20, 621–632.

Flores, R. (2021). Caracterización geoquímica de las vetas auríferas de la mina Orión en Chala-Arequipa. Tesis para optar al título de Ingeniero Geólogo, Facultad de ingeniería geológica y metalúrgica, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno, Perú.

Godoy, E., Lara, L., Ugalde, H. 1997. La Falla Chivato: Borde oriental plutonismo asociado al sistema de Falla Atacama. In: Proceedings of VIII Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 1, 70-74

Good, I. (1983). The Philosophy of Exploratory Data Analysis. *Philosophy of Science*, 50(2), 283-295. Retrieved May 24, 2021.

Gustafson, L., Hunt, J. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 1975; 70 (5): 857–912.

Grunsky, E.C.; Mueller, U.A.; Corrigan, D. (2014). A study of the lake sediment geochemistry of the Melville Peninsula using multivariate methods: Applications for predictive geological mapping. *J. Geochem. Explor.* 141, 15–41.

Hall, G., McClenaghan, M.B. & Page, Lilianne. (2015). Application of portable XRF to the direct analysis of till samples from various deposit types in Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.

Harris, J., Viljoen, D., Rencz, A. (1999). Integration and visualization of geoscience data. *Remote sensing for the Earth Sciences*. John Wiley and Sons Inc., New York, 707.

Harris, J., Wilkinson, L., Bernier, M. (2001). Analysis of geochemical data for mineral exploration using aGIS - A case study from the Swayze greenstone belt, Northern Ontario, Canada. *Geological Society, London, Special Publications*. 185. 165-200.

Harris, A., Golding, S., White, N. (2005). Bajo de la Alumbreira Copper-Gold Deposit: Stable Isotope Evidence for a Porphyry-Related Hydrothermal System Dominated by Magmatic Aqueous Fluids. *Economic Geology*.

Hawkes, H.E., Webb, J.S., (1962). *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper and Row, New York.

Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-AuREE) deposits: *Precambrian Research* 58, 241-287

Hitzman, M.W. (2000) Iron Oxide-Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why. In: Porter, T.M., Ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 1, PGC Publishing, Adelaide, 9-25

Howarth, R.J.; Sinding-Larsen, R. (1983) Multivariate analyses. In *Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting: Handbook of Exploration*

Geochemistry; Howarth, R.J., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; pp. 207–289.

Howarth, R., Turner, M. (1987). Statistical graphics in geochemical journals. *Mathematical Geology*. 19. 1-24.

Hurtado, Y. (2002). Prospección geoquímica del cuadrángulo de Chalhuanca (29-p), inventario de recursos minerales. Tesis de la Universidad Nacional de San Marcos, Lima, 48- 79 p.

Jolliffe, I.T. (2002). *Principal Component Analysis*, 2nd ed.; Springer: London, UK.

Kotz S., Johnson N. (1985). *Breakthroughs in Statistics, Perspectives in Statistics*. Volumen 3. Springer-Verlag, New York, USA.

Matthews, S.; Cornejo, P.; Riquelme, R. 2006. Carta Inca de Oro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y

Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 102, 79 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Mcqueen, Kenneth. (2008). Identifying geochemical anomalies. Department of Earth and Marine Sciences, Australian National University, Canberra, Australia.

Mpodozis, C., Allmendinger, R., (1992). Extensión cretácica a gran escala en el Norte de Chile (Puquios-Sierra Fraga, 27°S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geológica de Chile*. 19. 167-197.

Narváez, C, Fernández, S., Barrientos, F., Muñoz, A., Romero, L., Ramírez, G. (2014). Aplicación de fluorescencia de rayos X por reflexión total en la determinación de concentración de zinc en cabello de niños para la estimación de niveles nutricionales. *Revista Boliviana de Física*, 24(24), 1-6

Nejadhaddad, Mostafa; Taghipour, Batoul; Karimzadeh Somarin, Alireza. (2017). The Use of Univariate and Multivariate Analyses in the Geochemical Exploration, Ravanj Lead Mine, Delijan, Iran. *Minerals* 7, no. 11: 212.

Levinson, A.A. (1980) *Introduction to Exploration Geochemistry*, 2nd ed.; Applied Publishing Company: Calgary, AB, Canada, ; p. 924.

Liu, Y., Zhou, K., Carranza, E. (2018). Compositional balance analysis for geochemical pattern recognition and anomaly mapping in the western Junggar region, China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.

Praveena SM, Ahmed A, Radojevic M, Abdullah MH, Aris AZ (2007). Factor-cluster analysis and enrichment study of mangrove sediments—an example from Mengkabong, Sabah. *Malays J Anal Sci* 11(2):421–430.

Pollard, P.J., (2000). Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization. In Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A global perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide, 27-41.

Polonio, B., Castillo, J., Fernández, F. (1960). Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos X a la determinación de uranio en minerales. Junta de Energía Nuclear. Real sociedad española de física y química.

Ray, G., Lefebure, D., (2000). A Synopsis of Iron Oxide±Cu±Au±P±REE Deposits of the Candelaria-Kiruna-Olimpic Dam Family, pp. 267-271, in: Geological Fieldwork 1999, BC Ministry of Energy and Mines, Paper 2000-

Reimann, Clemens; Äyräs, M; Chekushin, V; Bogatyrev, I; Boyd, Rognvald; Caritat, P; Dutter, R; Finne, T E; Halleraker, J H; Jæger, Ø; Kashulina, G; Lehto, O; Niskavaara, H;

Ridley, J. (2013). Hydrothermal ore deposits I: Magmatic and orogenic environments. In *Ore Deposit Geology* (pp. 92-240). Cambridge: Cambridge University Press

Pavlov, V K; Räisänen, M L; Strand, T; Volden, T (1998): Geochemical analysis of soil in the central Barents Region. PANGAEA,

Proffett, J. (2003). Geology of the Bajo de la Alumbrera Porphyry Copper-Gold Deposit, Argentina. *Economic Geology*. 98. 1535-1574.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Appl. Geochem.* 17, 185–206.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. (2005). Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *The Science of the total environment*. 346. 1-16.

Richards, J. P. (2003) Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*; 98 (8): 1515–1533

Rivera, S.; Baeza, L.; Kovacic, P.; Martínez, A. 2006. Primeros antecedentes de la geología del Pórfido Cu-Au-Mo de Inca de Oro, Tercera Región de Atacama, Chile. *Congreso Geológico Chileno*, No. 11, Actas, Vol. 2, p. 339-342. Antofagasta.

Sacsi, Manuel. (2016). Características geológicas principales de la mineralización cuprífera post – Jurásico del yacimiento Chavíncha (veta Las Águilas). Lucanas – Ayacucho – Perú.

Segestrom, K. y Ruiz, C., (1962). Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Santiago, Instituto de investigación geológica. Carta Geológica de Chile, vol, nº1, 115 p

Sillitoe, R. (1972). A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*; 67 (2): 184–197

Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*. 38. 787-812.

Sillitoe, R., Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume. 845-890.

Skirrow, R. (2021) Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification, *Ore Geology Reviews*, Volume 140, 2022.

Templ, M., Filzmoser p., Reimann, C. (2008). Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, Volume 23, Issue 8, pp 2198-2213.

Thermo Fisher Cientific. (2021). XRF technology on the field. XRF technology for non-scientist. Pxxf equipment user manual.

Titley, S. (1982). *Advances in Geology of the Porphyry Cu Deposits*. University of Arizona Press, Tucson, 560 p

Tornos, F., Velasco, F., Barra, F., Morata, D. (2010). The Tropezón Cu-Mo-(Au) deposit, Northern Chile: The missing link between IOCG and porphyry copper systems?. *Mineralium Deposita*. 4

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Reading, Mass: Addison-Wesley Pub. Co. London

Ulrich, T., Heinrich, C. (2002). Geology and Alteration Geochemistry of the Porphyry Cu-Au Deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*. 97. 1865-1888.

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., De Hallar, A., Geordie, M., Oliver, N.H.S., Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Econ. Geol.* 100th Anniv. vol. pp. 371–405.

Yusta, I., Velasco, F., Herrero, J-M. (1998). Anomaly threshold estimation and data normalization using EDA statistics: application to lithochemical exploration in Lower Cretaceous Zn-Pb carbonate-hosted deposits, Northern Spain. *Applied Geochemistry*, 13 (4): 421-439.

Zapana, E. (2012) Determinación de targets de exploración en yacimientos minerales polimetálicos mediante prospección geoquímica “Proyecto Santa Rosa – Brazinni, Raura”. Tesis de la Universidad Nacional de Puno. Puno, Perú.

