



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

**DOCUMENTOS SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS XI:
EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS PÓRFIDO CUPRÍFEROS UTILIZANDO
PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS, EN EL DISTRITO MINERO
ANDACOLLO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CHRISTOPHER ANGELO YÁÑEZ PEZZOPANE

PROFESOR GUÍA:
JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
KATJA DECKART
JOËLLE D'ANDRES

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Christopher Angelo Yáñez Pezzopane
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: Daniel Moncada, PhD

**“DOCUMENTOS SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS XI:
EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS PÓRFIDO CUPRÍFEROS UTILIZANDO
PETROGRAFÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS, EN EL DISTRITO MINERO
ANDACOLLO, CHILE”**

El estudio petrográfico de inclusiones fluidas, provee una herramienta importante para comprender el origen de los depósitos y la evolución de los fluidos hidrotermales, durante los procesos de mineralización. De esta forma, al caracterizar la variación espacial y temporal, en las relaciones de fase de las inclusiones fluidas, se pueden establecer vectores que guíen hacia las zonas con mayor potencial de mineralización.

Este trabajo, tiene como objetivo la caracterización petrográfica de inclusiones fluidas asociadas a la mineralización pórfido cuprífera, en el distrito minero Andacollo, ubicado en la región de Coquimbo, Chile, a unos 40 km al sureste de La Serena, el cual, comprende una variedad de depósitos de oro, cobre y mercurio, cuyo centro comprende un pórfido cuprífero del Cretácico, denominado pórfido Carmen de Andacollo.

Becker et al. (2019), presentan un modelo para la variación espacial y temporal, en las propiedades P-V-T-X (presión-volumen-temperatura-composición) de los fluidos magmáticos, durante la cristalización de un plutón, que captura los procesos y condiciones que más se asocian con la mineralización de tipo pórfido. Por consiguiente, la petrografía de inclusiones fluidas, en muestras recolectadas en diversas zonas adyacentes al pórfido Carmen de Andacollo, será una guía para determinar la ubicación relativa de las muestras dentro del depósito.

La evidencia petrográfica, muestra que los arreglos de inclusiones fluidas (FIAs) predominantes, son los conformados por inclusiones ricas en líquido coexistentes con inclusiones ricas en vapor (tipo L+V) y los constituidos por inclusiones con precipitación de halita (tipo H), los cuales, se hospedan principalmente en vetillas A y vetillas B, lo que sugiere, que la zona de estudio se encuentra dominada por una secuencia de alteración-mineralización de temporalidad temprana.

El modelamiento espacial de los diferentes arreglos de inclusiones fluidas, permite sugerir varias zonas potenciales para la mineralización cuprífera, las cuales, principalmente se localizan a profundidades intermedias del sector occidental correspondiente a la zona de estudio, por lo tanto, se propone esta región como la carta principal para la exploración minera.

*“Dedico esta memoria a mi Familia
que la Amo con todo
mi Corazón”*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia, comenzando con mi padre y mi madre, quienes me dieron la vida, me apoyaron desde niño y me dieron todas las facilidades en este arduo camino. A ellos, por siempre entregarme todo su amor y cariño, estar atentos en mis necesidades y por haberme brindado apoyo en todas las decisiones que tomé. A mi hermano, por el cariño incondicional y por todos esos buenos momentos que me sirvieron de gran ayuda para combatir el estrés universitario. Al Ángel, por siempre moverme la cola y darme a entender que, para gozar felicidad, solo basta con tener a alguien con quien compartir un buen momento. Como olvidarme de mi tata, quién fue el primero en darme a conocer el maravilloso e intrigante universo de la ciencia, en entregarme las ganas y la motivación de aprender constantemente y, por sobre todo, agradecerle a él y a la Tabita por haberme dado alojamiento durante mi primer semestre universitario. Finalmente, quiero agradecerle a quienes lamentablemente ya no están conmigo, comenzando con mi Nanay, quien siempre me defendió a muerte, para quien siempre fui un orgullo y quiso lo mejor para mí. A mi Yayo Pepe y mi Yayita Eliana, por siempre preocuparse de mis estudios y darme la motivación de seguir adelante.

En segundo lugar, quiero agradecerle a mis amigos de LA M4TEO, por siempre estar ahí desde pendejos, en las buenas y en las malas, y especialmente por todos esos buenos vaciles que me ayudaron a calmar la mente y a olvidarme por un rato del estresante mundo universitario. También agradecerle a los Pichanguebrios, por todas esas pichangas, sobre todo, esos terceros tiempos y carretes inmemorables, y como olvidar esos vaciles durante la semana en el 1803, que puta que sirvieron para respirar y alivianarse. También agradecer a los de geo por su buena onda y motivación, especialmente con quienes compartí en todos esos terrenos inolvidables. Finalmente, dar las gracias a todos los compañeros del colegio y la universidad, los cuales, me acompañaron e hicieron más que entretenido este largo camino.

En tercer lugar, dar las gracias a todos los profesores, tanto del colegio como de la universidad, en especial al profesor Daniel Moncada, por su buena onda, por guiarme y entregarme todas las herramientas necesarias para lograr el primer título profesional de mi familia. Agradecer a los proyectos CONACYT 11170210 y FONDEQUIP EQM140009. También agradecerle a Blanca por siempre responder a todas mis consultas y a Rosita por siempre facilitarme las llaves de los laboratorios.

Finalmente, agradecer a mi gran amor, Sophie, por todos esos momentos increíbles, y en especial, por la gran ayuda y apoyo que me brindó en los meses finales de mi memoria de título.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del Trabajo de Investigación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Hipótesis de Trabajo.....	2
1.4 Ubicación del Área de Estudio.	3
1.5 Historia y Producción del Distrito.....	3
1.6 Estudios Anteriores	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Depósitos Pórfido Cupríferos	6
2.1.1 Definición	6
2.1.2 Características Generales.....	6
2.1.3 Marco y Contexto Geológico	7
2.1.4 Alteración y Mineralización Hidrotermal.....	11
2.1.5 Perfil de Enriquecimiento Supérgeno.....	16
2.1.6 Clasificación de Vetillas.....	18
2.1.7 Formación y Evolución de los Depósitos Pórfido Cupríferos.....	21
2.2 Inclusiones Fluidas	24
2.2.1 Introducción.....	24
2.2.2 La Filosofía de Realizar un Estudio de Inclusiones Fluidas.....	26
2.2.3 Características Generales.....	29
2.2.4 Clasificación de Inclusiones Fluidas	31
2.2.5 Fluidos Homogéneos vs Heterogéneos	38
2.2.6 Decrepitación y Modificación de Inclusiones Fluidas	39
2.3 Modelo de Becker et al. (2019)	43
2.3.1 Introducción.....	43
2.3.2 Parámetros Principales del Modelo	44
2.3.3 Evolución Espacial y Temporal de los Campos de Estabilidad de Fase	49
2.3.4 Distribución Espacial y Temporal de las Inclusiones Fluidas.....	51
3. MARCO GEOLÓGICO	55
3.1 Geología General del Distrito Minero Andacollo	55

3.2	Estratigrafía Distrital	57
3.2.1	Rocas Estratificadas.....	57
3.2.2	Intrusivos	58
3.3	Estructuras y Lineamientos	60
3.3.1	Evolución Estructural del Distrito Minero Andacollo.....	60
3.3.2	Estructuras Locales.....	61
3.4	Alteración Hidrotermal del Yacimiento Carmen de Andacollo	63
3.4.1	Alteración Hipógena.....	63
3.4.2	Alteración Supérgena	64
3.5	Mineralización del Yacimiento Carmen de Andacollo	65
3.5.1	Zona de Lixiviación.....	65
3.5.2	Zona de Enriquecimiento Secundario	66
3.5.3	Zona de Mineralización Primaria	66
4.	METODOLOGÍA.....	69
4.1	Preparación de <i>Quickplates</i>	69
4.2	Petrografía de Inclusiones Fluidas.....	70
4.3	Modelamiento 3D: <i>Software Asgard</i>	73
5.	RESULTADOS	74
5.1	Petrografía de Inclusiones Fluidas.....	74
5.1.1	Caracterización de Vetillas	74
5.1.2	Caracterización de Inclusiones Fluidas	77
5.2	Modelamiento 3D	85
6.	DISCUSIONES	93
6.1	Relaciones Temporales.....	93
6.1.1	Vetillas.....	93
6.1.2	Inclusiones Fluidas	93
6.2	Vectores de Mineralización	94
7.	CONCLUSIONES	101
8.	BIBLIOGRAFÍA	103
9.	ANEXOS	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Vetillas y sus porcentajes, con respecto al tipo de FIA que atraparon. En colores azul y rojo se señalan los mayores y menores porcentajes, respectivamente. El porcentaje de cada tipo de FIA fue calculado con respecto al número total de muestras correspondiente a cada vetilla.....	76
Tabla 5.2: Tipos de FIAs y sus porcentajes, con respecto a la vetilla en que fueron atrapados. En colores azul y rojo se señalan los mayores y menores porcentajes, respectivamente. El porcentaje de cada vetilla fue calculado con respecto al número total de muestras correspondiente a cada tipo de FIA.	84
Tabla 6.1: Intervalos de profundidad para las zonas de probable mineralización, conforme a la distribución espacial mostrada por cada tipo de FIA. Colores de acuerdo con Figura 6.1. Los intervalos se presentan en m s.n.m.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación geográfica del distrito minero Andacollo. Escala 1:750,000. Elaborado en ArcMap10.8. Fuente: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN y GIS User Community.	4
Figura 2.1: Distribución geográfica de los cinturones metalogénicos y sus principales depósitos de Cu, en los Andes Centrales. Extraído de Sillitoe (2005).	8
Figura 2.2: Evolución de la secuencia de alteración-mineralización, con respecto al aumento de acidez y del estado de sulfuración, en depósitos pórfido cupríferos. Modificado de Sillitoe (2010).	12
Figura 2.3: Modelo de Lowell & Guilbert (1970): A) Zonas de alteración hidrotermal. B) Zonas de mineralización hidrotermal. C) Ocurrencia de la mineralización de sulfuros. Modificado de Lowell & Guilbert (1970).	15
Figura 2.4: Perfil de enriquecimiento supérgeno esquemático, asociado a un depósito pórfido cuprífero. Para cada zona, se incluye la mineralogía junto con las leyes de Cu típicas (en negrita). En entre paréntesis, se presentan las leyes correspondientes al yacimiento Carmen de Andacollo. El nivel freático, está representado por la línea de color rojo. Modificado de Astudillo (2008).	18
Figura 2.5: Temporalidad y relaciones de corte de las vetillas descritas por Gustafson & Hunt (1975), en El Salvador. Modificado de Sillitoe (2010).	20
Figura 2.6: Evolución temporal de la formación de un depósito pórfido de Cu. Extraído de Sillitoe (2010).	24
Figura 2.7: Sistema inclusión fluida-mineral huésped. Las dislocaciones son comunes y pueden inducir la fuga parcial de líquido, formando microporos. L: fase líquida; V: fase de vapor; S: fase sólida. Extraído de Van den Kerkhof & Hein (2001).	29
Figura 2.8: Representación esquemática de la clasificación de inclusiones fluidas, con respecto a la relación de fases presentes a temperatura ambiente. L: fase líquida; V: fase de vapor; LCO ₂ : CO ₂ líquido. Modificado de Nash (1976).	31
Figura 2.9: a) Microfotografía a luz polarizada de una inclusión multifásica, conteniendo una gran burbuja de CO ₂ (V), líquido salino saturado (L) y varias fases minerales hijas (S1, S2 y S3). b) Imagen SEM (microscopio electrónico de barrido) de una inclusión abierta,	

que contiene halita (H), silvita (S) y arcanita (A), como minerales hijos. Extraído de Van den Kerkhof & Hein (2001).....	32
Figura 2.10: Microfotografías a luz polarizada de inclusiones fluidas. A) Inclusión rica en líquido. B) Inclusiones ricas en vapor. C) Inclusión con precipitación de halita. L: fase líquida; V: fase de vapor; H: halita. Extraído de Nash (1976).....	35
Figura 2.11: Representación idealizada de un cristal de cuarzo euhedral, mostrando la distinción entre inclusiones fluidas primarias (p) y secundarias (s). Modificado de Goldstein & Reynolds (1994).....	37
Figura 2.12: Representación esquemática de cristales de cuarzo anhedrales, mostrando la distinción entre inclusiones fluidas primarias (p) y secundarias (s). Modificado de Mangas & Sierra (1991).....	37
Figura 2.13: Cuadro esquemático exhibiendo los diferentes tipos de inclusiones fluidas, formadas a partir del atrapamiento de a) fluidos homogéneos y b) fluidos heterogéneos. Modificado de Van den Kerkhof & Hein (2001).....	39
Figura 2.14: Regímenes principales de modificación de inclusiones fluidas, durante condiciones retrógradas, en función de la presión y temperatura. Modificado de Van den Kerkhof & Hein (2001).....	41
Figura 2.15: Inclusiones fluidas afectadas por procesos de modificación: a) Inclusiones fluidas de forma muy irregular, con microfracturas que se extienden lejos de las inclusiones. b) Inclusión rica en vapor con dos microfracturas. c) Inclusión rica en vapor de forma irregular. d) Inclusión rica en vapor de superficies muy irregulares, mostrando un arreglo planar de neonate inclusions, el cual, emana hacia afuera de la inclusión. e) Inclusión con precipitación de halita, exhibiendo dos microfracturas que se extienden hacia afuera de la inclusión. f) Inclusión rica en vapor de superficies muy irregulares, presentando diversas microfracturas que emanan de la inclusión. Todas las imágenes fueron tomadas con luz polarizada. Extraído de Sun et al. (2020)...	42
Figura 2.16: Historia idealizada de la cristalización del plutón. El área celeste representa a la roca caja. Extraído de Becker et al. (2019).....	45
Figura 2.17: Diagrama de estabilidad de fases correspondiente al sistema H ₂ O-NaCl. L: campo líquido; V: campo de vapor; V _H : campo de vapor saturado en halita; L+V: campo de líquido + vapor. Modificado de Becker et al. (2019).....	47

Figura 2.18: Historia idealizada de la cristalización del plutón, en función de los campos de estabilidad de fase correspondientes al sistema H ₂ O-NaCl. Extraído de Becker et al. (2019).....	50
Figura 2.19: Variación espacial y temporal en las características de las inclusiones fluidas. Los círculos o elipses sombreados en gris, representan la fase de vapor, los cuadrados sin relleno representan la halita y el área restante corresponde a la fase líquida. Extraído de Becker et al. (2019).	53
Figura 3.1: Mapa geológico del distrito minero Andacollo. Extraído de Oyarzun et al. (1996).	56
Figura 3.2: Fallas principales del yacimiento Carmen de Andacollo. Extraído de Nilo et al. (2015).	62
Figura 3.3: Perfil supérgeno del yacimiento Carmen de Andacollo. Extraído de Llaumett et al. (1975).	68
Figura 4.1: Microscopio óptico Olympus BX53.....	71
Figura 5.1: Vetilla A con abundante cuarzo (qz), calcopirita (cp) diseminada y feldespato potásico (Kfel). También presenta un halo de feldespato potásico. Muestra DDH1234/580.95.	75
Figura 5.2: Vetilla B con abundante cuarzo (qz), calcopirita (cp) diseminada y molibdenita (mo) en los bordes. Muestra DDH1234/588.95.	75
Figura 5.3: Vetilla D con abundante pirita (py), alteración de clorita (chl) y cantidades menores de cuarzo (qz). Muestra DDH1234/357.2.	76
Figura 5.4: FIA tipo L+V: inclusiones ricas en líquido (L) coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (V). Con flechas color amarillo, se indican inclusiones con minerales opacos, posiblemente calcopirita. Muestra DDH1241/408.8, FIA 12-A.	78
Figura 5.5: FIA tipo L _H +V: inclusiones ricas en líquido saturadas en halita (L _H) coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (V). La mayoría de las inclusiones con precipitación de halita, presentan más de un mineral hijo. Muestra DDH1241/408.8, FIA 17-A.	79
Figura 5.6: FIA tipo V _H : únicamente inclusiones ricas en vapor (V), con burbujas ocupando aproximadamente el 100% de la inclusión. Muestra NNV1708/016, FIA 1-B.	80
Figura 5.7: FIA tipo V: solamente inclusiones ricas en vapor (V). Con flechas color amarillo, se indican dos inclusiones con minerales hijos: la superior muestra un mineral opaco	

(posiblemente calcopirita) y la inferior presenta halita. Muestra DDH1241/294.15, FIA 7-A.	81
Figura 5.8: FIA tipo L: únicamente inclusiones ricas en líquido (L). Casi todas exhiben minerales opacos, posiblemente calcopirita. Con flecha color amarillo, se señala una inclusión con precipitación de halita. Muestra DDH1241/116.1, FIA 10-A.	82
Figura 5.9: FIA tipo Cp: inclusiones con precipitación de calcopirita (Cp). La calcopirita como mineral hijo, se caracteriza por su forma triangular y tonalidad opaca. Debido al pequeño tamaño de la calcopirita, frecuentemente su forma no se puede apreciar correctamente, no obstante, si la inclusión presenta un mineral hijo opaco, es probable que se trate de calcopirita. En el presente caso, dado que en algunas inclusiones se exhibe la forma triangular característica de la calcopirita, es muy probable que los minerales opacos en el resto de las inclusiones, también correspondan a calcopirita. Muestra DDH1234/341.1, FIA 7-A.	83
Figura 5.10: FIA tipo H: inclusiones con precipitación de halita (H). La halita como mineral hijo, se caracteriza por su forma cuadrada y mostrarse incolora. La mayoría de las inclusiones, presenta otros minerales hijos además de halita. Muestra DDH1234/452.67, FIA 7-A.	84
Figura 5.11: Representación 3D de los sondajes: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color naranja); y de las muestras superficiales NNV1708 (6, color rojo). Vista en perfil.	85
Figura 5.12: Representación 3D de los sondajes con vista en planta. Para los sondajes, se conserva el esquema de color empleado en la Figura 5.11.	86
Figura 5.13: Representación 3D de los sondajes seleccionados: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color rojo). Vista en perfil.	86
Figura 5.14: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo L+V. Vista en perfil.	87
Figura 5.15: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo L+V, en función de la profundidad.	87

Figura 5.16: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo L_H+V . Vista en perfil.	88
Figura 5.17: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo L_H+V , en función de la profundidad.	88
Figura 5.18: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo V_H . Vista en perfil.	89
Figura 5.19: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo V_H , en función de la profundidad.	89
Figura 5.20: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo V. Vista en perfil.	90
Figura 5.21: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo V, en función de la profundidad.	90
Figura 5.22: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo C_p . Vista en perfil.	91
Figura 5.23: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo C_p , en función de la profundidad.	91
Figura 5.24: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo H. Vista en perfil.	92
Figura 5.25: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo H, en función de la profundidad.	92
Figura 6.1: Regiones de potencial mineralización, definidas con respecto a la distribución espacial exhibida por los FIAs tipo H (zona color azul), tipo $L+V$ (zona color verde), tipo L_H+V (zonas color amarillo), tipo C_p (zonas color negro) y tipo V_H (bajo líneas discontinuas color rojo). Para una mejor observación de las regiones, guiarse por sus contornos (líneas punteadas). Sondajes: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color rojo). Vista en perfil.	100

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del Trabajo de Investigación

La exploración minera, es un proceso muy importante en el rubro de la minería, dado que es la única actividad que permite sostener el negocio minero en el tiempo y hacerlo crecer, a raíz del descubrimiento de recursos minerales. Sin embargo, para llevarla a cabo, se debe invertir una gran cantidad de recursos y, aun así, sigue siendo un mecanismo que siempre conlleva un alto riesgo debido a la gran incertidumbre de los resultados.

Existen diferentes métodos para optimizar los recursos y disminuir el riesgo en la búsqueda de depósitos minerales. Algunos de estos métodos, se basan en el estudio petrográfico de inclusiones fluidas. Estos estudios, proveen una herramienta importante para comprender el origen de los depósitos y la evolución de los fluidos hidrotermales, durante los procesos de mineralización. De esta forma, al caracterizar la variación espacial, en las relaciones de fase de las inclusiones fluidas, se pueden establecer vectores que señalen las zonas donde es más probable encontrar mineralización económica.

El distrito minero Andacollo, se encuentra en la región de Coquimbo, Chile, a unos 40 km al sureste de La Serena, en la Cordillera de la Costa, a 1030 m sobre el nivel del mar. El distrito, comprende una variedad de depósitos, donde se incluyen: placeres auríferos, vetas auríferas y vetas ricas en mercurio, estratoligados de oro y plata, y un pórfido cuprífero del Cretácico, a partir del cual, se extrae cobre, oro y molibdeno (Oyarzun et al., 1996). Actualmente, el pórfido Carmen de Andacollo está siendo explotado, no obstante, labores de exploración en las cercanías del pórfido no son la excepción.

Bajo este contexto, se lleva a cabo un estudio petrográfico de inclusiones fluidas, con el fin de establecer guías de localización, hacia las zonas más factibles de albergar mineralización económica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Generar vectores que permitan establecer guías de localización, hacia las zonas con mayor potencial de albergar mineralización económica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los diferentes arreglos de inclusiones fluidas (FIAs) presentes en cada muestra, a través de un estudio petrográfico.
- Desarrollar una representación espacial para cada FIA caracterizado, mediante el *software* Asgard.
- Determinar la variación espacial, en las relaciones de fase a temperatura ambiente de los fluidos caracterizados, con base en el modelo de Becker et al. (2019).
- Definir las zonas más probables de hospedar mineralización cuprífera.

1.3 Hipótesis de Trabajo

Becker et al. (2019), presentan un modelo para la variación espacial y temporal, en las propiedades P-V-T-X (presión-volumen-temperatura-composición) de los fluidos magmáticos, durante la cristalización de un plutón, que captura los procesos y condiciones que más se asocian con la mineralización de tipo pórfido. De acuerdo a este modelo, la variación en las relaciones de fase a temperatura ambiente de las inclusiones fluidas, en función de la ubicación dentro del sistema magmático-hidrotermal, permite estimar donde y cuando las inclusiones fluidas probablemente quedaron atrapadas.

Por consiguiente, la petrografía de inclusiones fluidas, en muestras recolectadas en diversas zonas adyacentes al pórfido Carmen de Andacollo, será una guía para determinar la ubicación relativa de las muestras dentro del depósito.

1.4 Ubicación del Área de Estudio.

El distrito minero Andacollo, se encuentra ubicado en la Cordillera de la Costa, en la Provincia de Elqui, IV Región, Chile, aproximadamente a 40 km al sureste de La Serena y 42 km al noreste de Ovalle (Figura 1.1). El distrito, se sitúa en la cuenca de Andacollo, dentro de un relieve montañoso semiárido, a una altitud de 1030 m sobre el nivel del mar, próximo al pueblo de Andacollo (Llaumett et al., 1975; Reyes, 1991; Oyarzun et al., 1996). El yacimiento, forma parte del cinturón metalogénico del Cretácico Inferior (Figura 2.1), el cual, se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, entre los 22°S y 34°S, y comprende un amplio conjunto de depósitos metalíferos (Maksaev et al., 2007). Dentro de los depósitos pórfido cupríferos, Carmen de Andacollo, corresponde económicamente al depósito más importante de este cinturón (Maksaev et al., 2007).

1.5 Historia y Producción del Distrito

Desde tiempos precoloniales (mediados del siglo XV) que la actividad minera del distrito ha estado presente (Oyarzun et al., 1996). Los Incas, seguidos de los españoles, explotaron Andacollo por oro, principalmente extraído de vetas y placeres auríferos (Llaumett et al., 1975; Reyes, 1991; Oyarzun et al., 1996). En 1607, Andacollo fue descrito por los mineros locales como “*el distrito con ríos de oro*” (Reyes, 1991:1301). Recién en la segunda mitad del siglo XX, comenzó la explotación de los recursos cupríferos, luego de que los trabajos se profundizaran debajo de la grava aluvial (Reyes, 1991), sin embargo, según Oyarzun et al. (1996), la minería cuprífera tuvo su inicio a finales del siglo XIX. Actualmente, la actividad minera en el distrito, está concentrada principalmente en la explotación tanto de cobre como de oro.

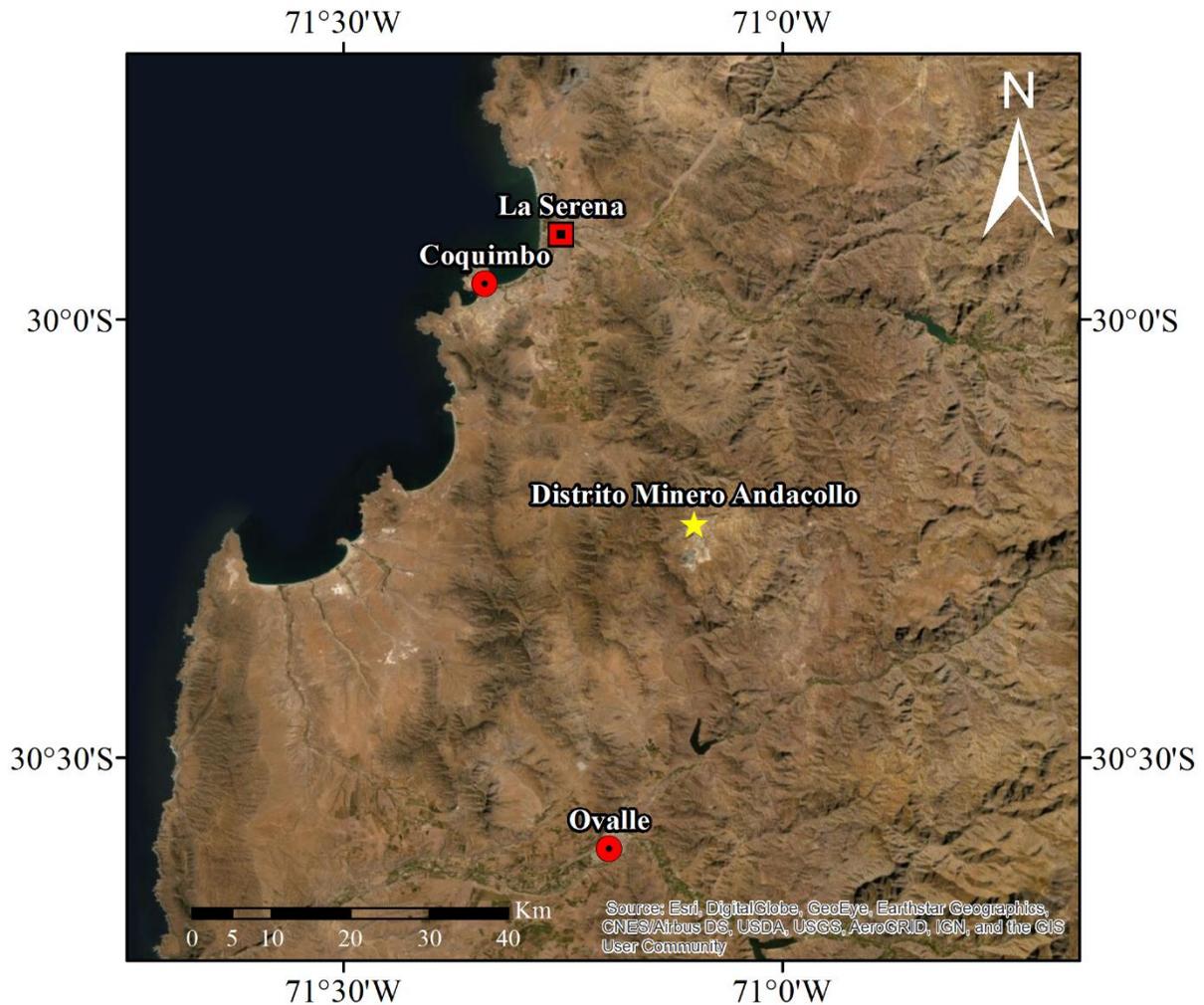


Figura 1.1: Ubicación geográfica del distrito minero Andacollo. Escala 1:750,000. Elaborado en ArcMap10.8. Fuente: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN y GIS User Community.

Se estima que durante la primera explotación del depósito (entre los años 50's y los 70's), se extrajeron unos 5 millones de toneladas de mineral, las cuales, representan aproximadamente 40,000 toneladas de cobre fino y 600 kg de oro. (Llaumett et al., 1975). En la década de los 70's, ENAMI (Empresa Nacional de Minería) y Noranda, realizaron la evaluación más detallada en el yacimiento pórfido cuprífero y reportaron reservas geológicas de 249 Mt, con leyes de 0.62% Cu, 0.25 g/t Au y ~0.01% Mo (Oyarzun et al., 1996). En la década de los 80's, el cobre se produjo a una tasa mensual estimada de 100 toneladas de cobre fino, el cual, fue extraído de una capa de enriquecimiento supérgeno (Reyes, 1991).

Conforme al planteamiento minero, la explotación del distrito minero Andacollo, significaría un aumento en la producción chilena, en aproximadamente 80,000 toneladas de cobre fino (Llaumett et al., 1975).

1.6 Estudios Anteriores

Llaumett et al. (1975), hicieron un estudio geológico enfocado en el yacimiento Carmen de Andacollo. Este estudio, permitió definir aproximadamente las principales características sobre la estructura, alteración y mineralización del depósito. Estos autores, estudiaron la distribución de la alteración hidrotermal y de la mineralización de cobre y molibdeno, además de su cuantificación (leyes y tonelaje) y relaciones de sulfuros (razón pirita-calcopirita), lo cual, ayudó a establecer una evaluación geológica del yacimiento.

Reyes (1991), realizó un estudio geocronológico y geoquímico, en muestras alteradas y mineralizadas, correspondientes a los depósitos estratoligados de oro y al pórfido Carmen de Andacollo. Conforme a los resultados obtenidos, este autor, plantea que, los sistemas de falla locales más jóvenes, al superponerse a la mineralización pórfido cuprífera y el área circundante, favorecieron el transporte lateral de los fluidos hidrotermales hacia las zonas circundantes al pórfido Carmen de Andacollo, desarrollando así, la mineralización de oro en los depósitos estratoligados. Este modelo, es comúnmente denominado como modelo de zonación horizontal.

Oyarzun et al. (1996), llevaron a cabo un estudio microtermométrico de inclusiones fluidas, en muestras de cuarzo y calcita, correspondientes al distrito minero Andacollo. Con base en los resultados obtenidos, estos autores, debaten la validez del modelo de zonación horizontal propuesto por Reyes (1991), el cual, señala que, los depósitos estratoligados de oro, se formaron en respuesta al emplazamiento del pórfido Carmen de Andacollo. Por consiguiente, Oyarzun et al. (1996), proponen un modelo de zonación vertical, el cual, sugiere que, el sistema hidrotermal que condujo a la mineralización de oro en los depósitos estratoligados, no fue generado por el pórfido Carmen de Andacollo, sino que, por otra intrusión oculta debajo de los depósitos estratoligados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Depósitos Pórfido Cupríferos

2.1.1 Definición

“Los depósitos tipo pórfido, son depósitos magmático-hidrotermales, en los cuales, los minerales de sulfuro y óxido, precipitan de una solución acuosa a elevadas temperaturas. Deben su nombre de la textura porfírica de diques e intrusiones, comúnmente asociados espacial y genéticamente a la mineralización del depósito.” (Seedorff et al., 2005:252).

2.1.2 Características Generales

Los depósitos tipo pórfido, están asociados genéticamente con el emplazamiento y cristalización de magmas hidratados de composición intermedia (granodiorítica), a lo largo de márgenes de placa convergentes, en zonas de subducción activa (Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 1972; Richards, 2003). Estos depósitos, se forman relativamente cerca de la superficie, típicamente entre 1 a 6 km de profundidad (Seedorff et al., 2005) y sufren constantes procesos de tectonismo, erosión y entierro (Staude & Barton, 2001).

Los depósitos pórfido cupríferos, se caracterizan por sus grandes tonelajes y leyes de mineral relativamente bajas. La mineralización, suele ocurrir en forma diseminada, en vetillas y enjambres de vetillas (stockwork), dentro de rocas alteradas hidrotermalmente (Lowell & Guilbert, 1970; Seedorff et al., 2005). Los depósitos, comúnmente son de grandes dimensiones (cientos a miles de metros de diámetro), con formas que varían de circulares a elongadas en planta, cuyos límites normalmente están definidos, con base en una ley de corte (Sillitoe, 2010). En secciones verticales, muestran una forma tabular o de embudo, en donde la mineralización tiende a mostrar patrones diferenciales, con respecto a la ley de Cu (Sillitoe, 2010). En general, los depósitos pórfido

cupríferos, presentan depósitos minerales periféricos, los cuales, sugieren una mineralización a temperaturas más bajas (Lowell & Guilbert, 1970).

Los depósitos pórfido cupríferos, representan la mayor fuente de Cu a nivel mundial, así como fuentes importantes de Mo, Au y Ag (Hammarstrom et al., 2019). El impacto económico de estos depósitos, es similar en magnitud al mercado del aluminio y solo es superado por los mercados del hierro y el acero (Seedorff et al., 2005). Actualmente, los depósitos pórfido cupríferos, aportan a nivel mundial casi tres cuartas partes del Cu, la mitad del Mo, una quinta parte del Au, la mayor parte del Re y cantidades menores de otros metales (Ag, Pd, Te, Se, Bi, Zn, Pb), además de incluir las concentraciones explotables de Cu (203 Mt: Los Bronces-Río Blanco; A. J. Wilson, comunicación personal con Sillitoe, 2009) y Mo (2.5 Mt: El Teniente; Camus, 2003) más grandes del mundo. Los depósitos pórfido de Cu no descubiertos a nivel mundial, podrían contener 3,100 Mt de Cu, lo cual, representa casi el doble de los 1,800 Mt de Cu ya medidos en estos depósitos (Hammarstrom et al., 2019).

2.1.3 Marco y Contexto Geológico

Cinturones Metalogénicos

Los depósitos pórfido cupríferos, normalmente se forman en cinturones o franjas lineales, típicamente orógenos paralelos, los cuales, se extienden desde unas pocas decenas hasta miles de kilómetros, así como lo ejemplifican los cinturones metalogénicos de los Andes centrales (Figura 2.1; Sillitoe & Perelló, 2005).

Los pórfidos que dieron origen a los depósitos de Cu, en el norte de Chile y el sur de Perú, se emplazaron durante cuatro épocas metalogénicas bien definidas (Sillitoe, 1988; Sillitoe & Perelló, 2005), cada una de las cuales, muestra una duración típica de 10 a 20 Ma, conforme a dataciones isotópicas (Sillitoe, 2010). Cada época metalogénica, se encuentra asociada a un evento magmático (Sillitoe, 2010) y corresponde a un cinturón metalogénico marcadamente lineal (Sillitoe,

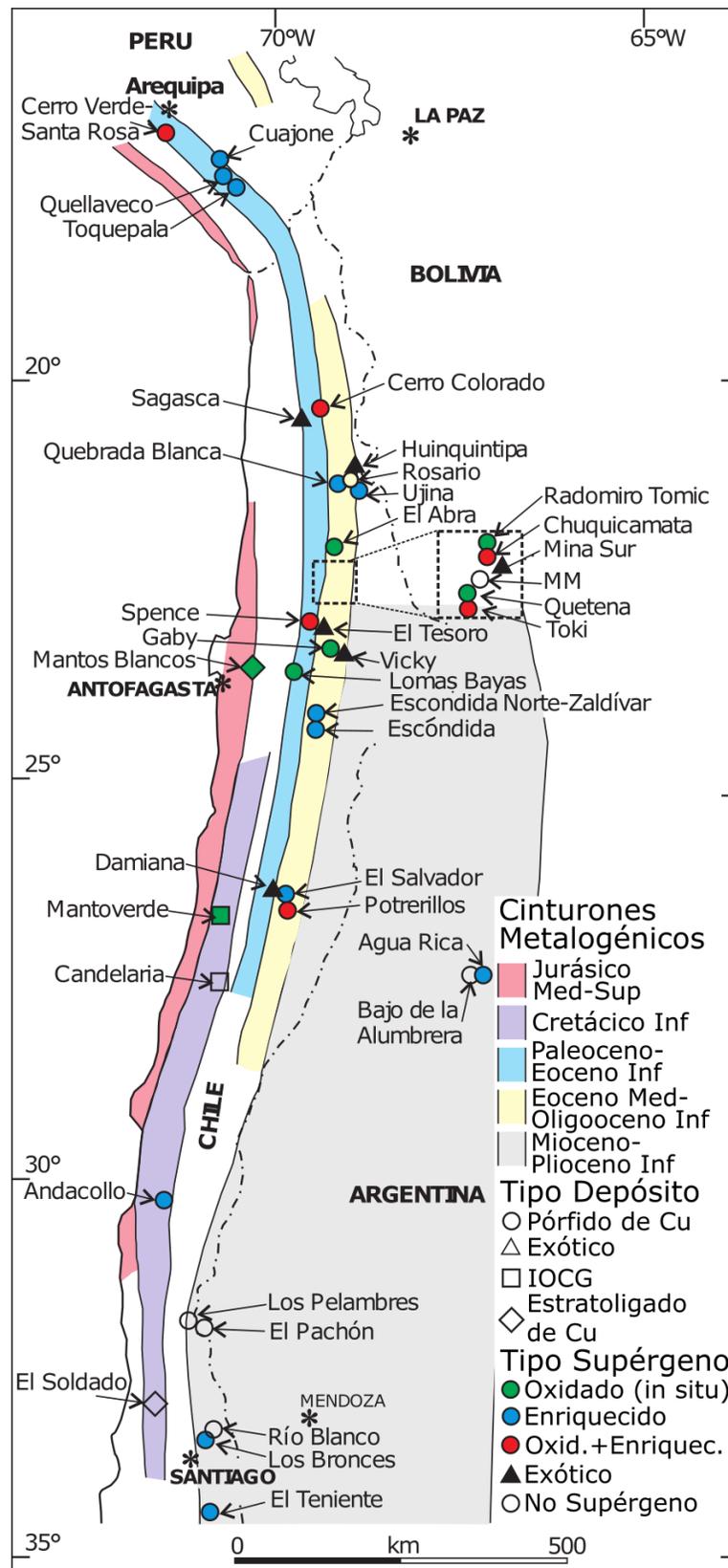


Figura 2.1: Distribución geográfica de los cinturones metalogénicos y sus principales depósitos de Cu, en los Andes Centrales. Extraído de Sillitoe (2005).

1988; Sillitoe & Perelló, 2005). Estos cinturones metalogénicos, se ubican cronológicamente disminuyendo su edad, desde la costa del océano Pacífico hacia Argentina, tal como se observa en la Figura 2.1.

La migración del arco volcánico, juega un rol fundamental en la disposición geográfica de los cinturones metalogénicos, dado que evita que se superpongan entre sí y hace posible la separación espacial de cada uno de ellos (Sillitoe, 2005). La migración del arco volcánico, en los márgenes convergentes, se debe principalmente a la inclinación o el hundimiento de las losas subducidas (Sillitoe & Perelló, 2005) y es ayudada por procesos de subducción, erosión y acreción del terreno (von Huene & Scholl, 1991; Kay et al., 2005).

Configuraciones Tectónicas

Los arcos volcánicos, se encuentran sometidos a una gama de regímenes de estrés a escala regional (Tosdal & Richards, 2001), la cual, depende, entre otros factores, de si hay avance o retroceso de la fosa y del grado de oblicuidad del vector de convergencia de placas (Dewey, 1980).

Existe una relación empírica, entre los entornos de compresión (evidenciados por el engrosamiento de la corteza, el alzamiento de la superficie y la exhumación rápida) y los grandes depósitos pórfido cupríferos, como lo ejemplifica el cinturón del Mioceno Tardío al Plioceno de los Andes centrales (Figura 2.1; Sillitoe & Perelló, 2005; Sillitoe, 2010). Se conjetura que, la compresión de la corteza terrestre, ayuda al desarrollo de grandes cámaras de magma, en la corteza media a superior (Takada, 1994), las cuales, producto de un eficiente fraccionamiento, producen grandes cantidades de fluido magmático, especialmente en periodos de rápido alzamiento y exhumación (Sillitoe, 1998).

Las fallas y sus intersecciones, continuamente definen los sitios de formación y las geometrías de los depósitos pórfido cupríferos (Sillitoe, 2010). Los sistemas de fallas de intra-arco, activos tanto antes como durante la formación de los pórfidos de Cu, son localizadores particularmente importantes, como lo ejemplifica el sistema de fallas de Domeyko, durante el desarrollo del cinturón del Eoceno medio al Oligoceno Temprano, en el norte de Chile (Figura 2.1; Sillitoe & Perelló, 2005). Por otro lado, las intersecciones de falla, pueden facilitar el ascenso de volúmenes de magma relativamente pequeños, involucrados en la formación de depósitos pórfido cupríferos (Clark, 1993; Richards, 2000).

Stocks y Diques

Los depósitos pórfido cupríferos, se concentran en intrusiones de pórfido, las cuales, pueden variar desde stocks verticales en forma cilíndrica, conjuntos de diques, hasta cuerpos pequeños e irregulares (Sillitoe, 2010). Los stocks y diques, comprenden diámetros y longitudes cercanas al kilómetro, respectivamente, sin embargo, pueden alcanzar dimensiones mucho mayores, como lo ejemplifica el stock de 14 km de largo en Chuquicamata-Radomiro Tomic (Ossandón et al., 2001; Sillitoe, 2010).

Las intrusiones de pórfido, en los depósitos pórfido de Cu, comprenden diferentes fases (Kirkham, 1971; Gustafson, 1978), emplazadas inmediatamente antes (pórfidos tempranos), durante (pórfidos interminerales), cerca del final (pórfidos tardíos) y después (pórfidos postminerales) de los eventos de alteración y mineralización (Sillitoe, 2010). Los pórfidos tempranos, albergan la mineralización de mayor grado, en la mayoría de los depósitos; los pórfidos interminerales, normalmente se encuentran menos mineralizados a medida que se vuelven progresivamente más jóvenes; los pórfidos tardíos y postminerales, son estériles (Sillitoe, 2010).

Las intrusiones relacionadas con los depósitos pórfido cupríferos, son exclusivamente de afiliación tipo I (magmas originados en el manto y la corteza inferior) y serie magnetita (óxidos opacos; Ishihara, 1981), y típicamente metaluminosas y calco-alcaldas de K medio (Seedorff et

al., 2005). Abarcan una amplia gama de composiciones, desde diorita calco-alcalina y diorita de cuarzo, incluyendo granodiorita, monzogranito y cuarzo monzonita, hasta monzonita y sienita, esta última con poca frecuencia (Enns et al., 1995). Estas intrusiones, poseen cantidades variables de fenocristales, que por lo general presentan hornblenda y/o biotita, dentro de una masa fundamental de grano fino que suele ser aplítica (Sillitoe, 2010).

2.1.4 Alteración y Mineralización Hidrotermal

Las rocas huésped de los depósitos pórfido de Cu, son alteradas hidrotermalmente para formar asociaciones minerales que incluyen: minerales de alteración sin un valor económico (ganga) y minerales de mena con un importante valor económico, los cuales, constituyen procesos fisicoquímicos, comúnmente conocidos como alteración y mineralización hidrotermal (Seedorff et al., 2005). Los estudios de alteración-mineralización son importantes, dado que proporcionan límites sobre las condiciones P-T-X (presión-temperatura-composición) de los fluidos mineralizadores, los que, a su vez, representan las guías más fácilmente reconocibles y ampliamente distribuidas, utilizadas en la exploración de nuevos depósitos minerales (Seedorff et al., 2005).

En general, los depósitos pórfido cupríferos, muestran una secuencia característica de alteración-mineralización a gran escala, constituida desde abajo hacia arriba por las zonas: sódico cálcica, potásica, fílica o sericítica y argílica, con una zona propilítica que se forma distalmente a niveles profundos (Sillitoe, 2010). Este patrón de zonificación, típicamente afecta varios kilómetros cúbicos de roca (Lowell & Guilbert, 1970; Beane & Titley, 1981), cuyas zonas de alteración-mineralización, son progresivamente más jóvenes hacia arriba, las cuales, constantemente sobreimprimen y reconstituyen parcialmente las zonas más profundas (Sillitoe, 2010).

La secuencia de alteración-mineralización (desde la zona potásica hasta zona la argílica), se debe al incremento de acidez, generado por la disminución de temperatura de los fluidos hidrotermales (Sillitoe, 2010). Un aumento paralelo, en el estado de sulfuración (en función de la fugacidad de S y la temperatura, aumentando a medida que desciende la temperatura) de los fluidos, produce cambios en el conjunto de minerales sulfurados (Figura 2.2; Einaudi et al., 2003).

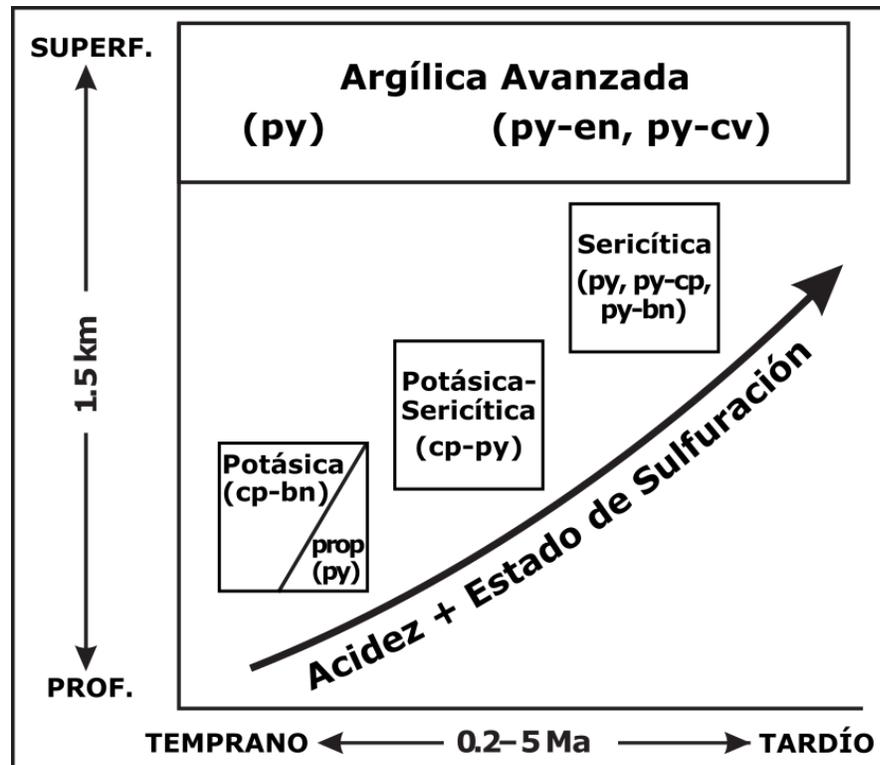


Figura 2.2: Evolución de la secuencia de alteración-mineralización, con respecto al aumento de acidez y del estado de sulfuración, en depósitos pórfido cupríferos. Modificado de Sillitoe (2010).

Modelo de Lowell & Guilbert (1970)

Basado en el estudio del depósito pórfido cuprífero de San Manuel-Kalamazoo y de la recopilación de 27 depósitos de similares características, este modelo, ilustra la distribución espacial de las zonas de alteración-mineralización hidrotermal, junto con su modo de ocurrencia (Figura 2.3). Cabe señalar que, este modelo, corresponde a una idealización, por lo que muchas veces la zonificación ideal no ocurre, debido a las particularidades de cada depósito (litología, estructuras, intrusiones, deformación regional, etc.).

Zonas de Alteración Hidrotermal

Alteración Sódico-Cálcica. Corresponde a la zona de alteración más profunda y se encuentra a los costados de la parte inferior de la zona potásica (Figura 2.3A; Lowell & Guilbert, 1970), típicamente en las rocas de caja adyacentes a las intrusiones de pórfido (Sillitoe, 2010). En general, se caracteriza por la presencia de magnetita, biotita normalmente cloritizada y vetillas de cuarzo-magnetita±pirita de hasta 1.5 cm de ancho, generalmente con salbandas estrechas de cuarzo-sericita-clorita (Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010). La zona sódico-cálcica, comúnmente se encuentra mal conservada y suele ser pobre en sulfuros y metales (excepto Fe como magnetita), no obstante, puede albergar mineralización en depósitos pórfido cupríferos ricos en Au (Sillitoe, 2010).

Alteración Potásica. Es la zona de alteración más interna (Figura 2.3A) y se caracteriza por el reemplazo pervasivo de minerales primarios por biotita secundaria (comúnmente intercrecida con clorita), feldespato potásico, cuarzo, sericita y, en menor medida, anhidrita (Lowell & Guilbert, 1970). La biotita secundaria, es el mineral de alteración más abundante, en intrusiones de pórfido relativamente máficas, mientras que, el feldespato potásico, se vuelve predominante en entornos más félsicos (Sillitoe, 2010). La zona potásica, comprende parte de la zona de mena y presenta mineralización en la mayoría de los depósitos pórfido cupríferos (Lowell & Guilbert, 1970).

Alteración Fílica. También llamada alteración sericítica, se encuentra rodeando a la zona potásica (Figura 2.3A) y normalmente sobreimprime y destruye total o parcialmente los conjuntos potásicos (Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010). Esta zona, se caracteriza por la sericitización completa de todos los minerales a excepción del cuarzo, cuyos minerales de alteración, incluyen cuarzo, sericita, pirita e illita, con cantidades menores de clorita y trazas de rutilo (Lowell & Guilbert, 1970). La sericita, abunda en la parte interna de esta zona, mientras que, los minerales de arcilla e illita, en los márgenes exteriores (Lowell & Guilbert, 1970). La pirita es abundante y ocurre como vetillas y diseminaciones granulares, mientras tanto, el contenido de calcopirita, suele variar y comúnmente se presenta como granos diseminados (Lowell & Guilbert, 1970). La zona

fílica, generalmente incluye parte de la zona de mena y todas las zonas marginalmente mineralizadas (Lowell & Guilbert, 1970).

Alteración Argílica. Se encuentra bordeando la parte superior de la zona fílica (Figura 2.3A) y se caracteriza por la formación de minerales arcillosos, siendo la caolinita, el principal producto de reacción (Lowell & Guilbert, 1970). La caolinita, se presenta en la parte interna de esta zona y gradúa a montmorillonita hacia el exterior (Lowell & Guilbert, 1970). La pirita es común, pero mucho menos abundante que en la zona fílica y comúnmente se presenta en vetillas (Lowell & Guilbert, 1970).

Alteración Propilítica. Corresponde a la zona de alteración más distal (Figura 2.3A), la cual, ocurre por lo general, como halo gradacional y distal de la alteración potásica (Lowell & Guilbert, 1970). La zona propilítica, se caracteriza por la presencia de clorita, epidota, calcita, plagioclasa y pirita, minerales que, disminuyen su abundancia hacia el exterior de la zona (Seedorff et al., 2005). La calcopirita es escasa y la pirita constituye del 1-3% del volumen de roca (Lowell & Guilbert, 1970).

Zonas de Mineralización Hidrotermal

Mineralización Potásica. Esta zona de mineralización, se puede dividir en dos: una zona interna y una zona de mena. La zona interna, también denominada núcleo de bajo grado, tiene un diámetro aproximado de 800 m y se ubica en el núcleo de la zona de potásica (Figura 2.3B; Lowell & Guilbert, 1970). Contiene una ley de ~0.3% Cu y presenta una proporción de pirita-calcopirita igual a 1:2 (Lowell & Guilbert, 1970). En esta zona, el contenido total de sulfuros es bajo, cuya mayoría corresponde a calcopirita, la cual, ocurre en granos diseminados, aunque también en vetillas (Figura 2.3C; Lowell & Guilbert, 1970). La zona de mena, también llamada caparazón mineralizado, se encuentra definida por una ley de 0.5% Cu y típicamente se localiza en el límite entre la zona potásica y la zona fílica, con un espesor aproximado de 180 m (Figura 2.3B; Lowell & Guilbert, 1970). Esta zona mineralizada, posee una ley de 0.5-1% Cu, con una razón de pirita-

calcopirita de 1:1, con la pirita normalmente en forma de vetillas tipo stockwork y la calcopirita como granos diseminados (Figura 2.3C; Lowell & Guilbert, 1970).

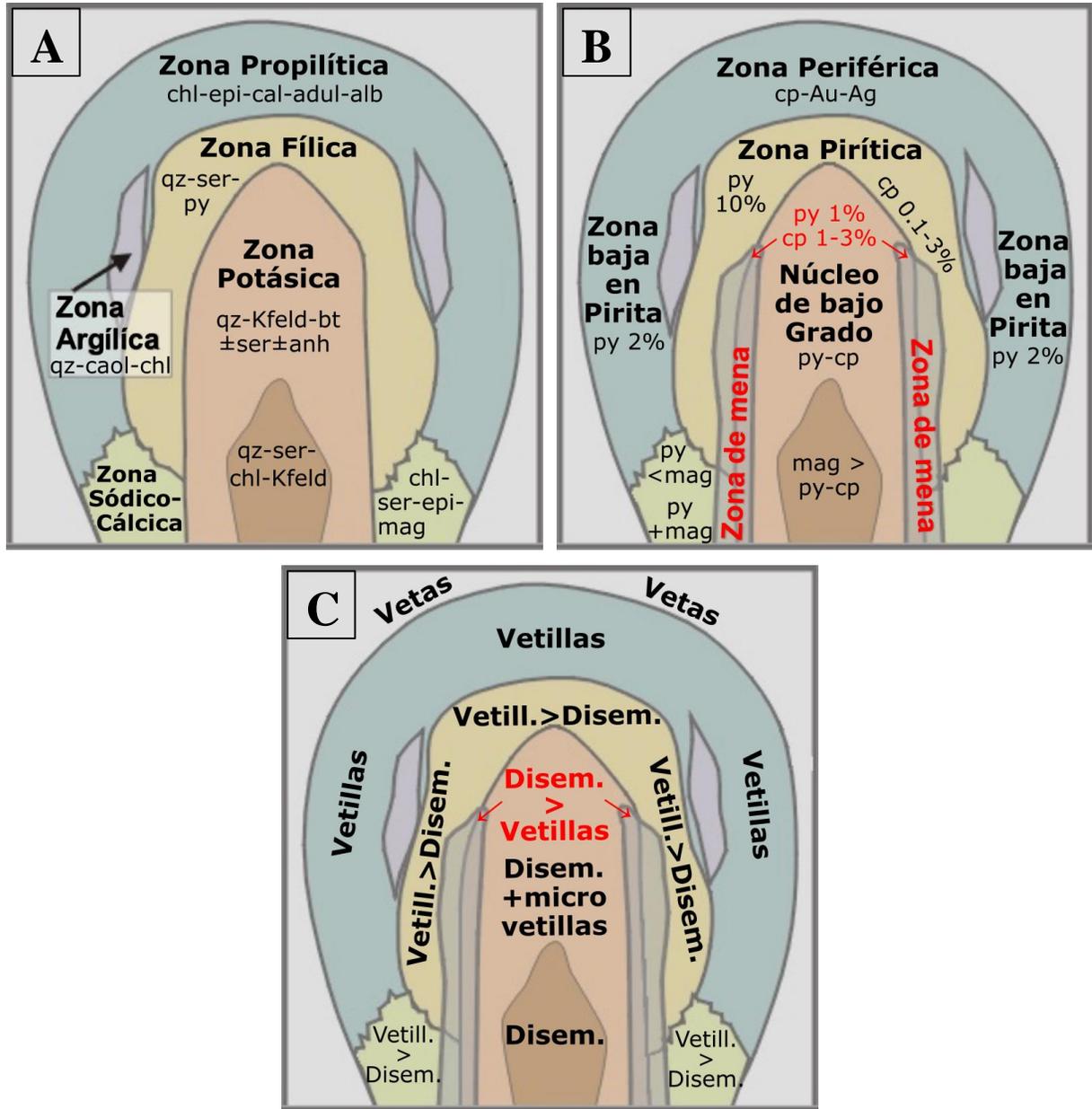


Figura 2.3: Modelo de Lowell & Guilbert (1970): A) Zonas de alteración hidrotermal. B) Zonas de mineralización hidrotermal. C) Ocurrencia de la mineralización de sulfuros. Modificado de Lowell & Guilbert (1970).

Mineralización Fílica y Argílica. Rodeando la zona de mena y al interior de la zona fílica, se halla una zona con un espesor aproximado de 60 m, con una ley de 0.1-0.5% Cu y una relación de pirita-calcopirita igual a 10:1, con la mayoría en forma de vetillas (Lowell & Guilbert, 1970). Rodeando esta zona, se dispone una zona de mineralización de pirita, la cual, presenta un diámetro de 300-450 m que abarca las zonas fílica y argílica (Figura 2.3B; Lowell & Guilbert, 1970). Esta zona piritizada, contiene entre 6-25% de pirita en peso de la roca, la que se presenta acompañada de cuarzo, en vetillas de hasta 1.5 cm de espesor (Figura 2.3C; Lowell & Guilbert, 1970). Esta abundancia de pirita, causa la remoción efectiva de Cu y otros metales presentes, en los tempranos conjuntos potásicos (Sillitoe, 2010).

Mineralización Propilítica. Esta zona de mineralización, se puede dividir en dos: una zona profunda y otra superficial. La zona profunda, se caracteriza por el veteado pervasivo de pirita, el cual, constituye entre 2-6% en peso de la roca y contiene cantidades de 100-500 ppm de Cu (Figura 2.3B, C; Lowell & Guilbert, 1970). La zona superficial, se distingue por limitadas vetas pequeñas, con una alta ley de Ag, Au y calcopirita (Figura 2.3B, C; Lowell & Guilbert, 1970).

2.1.5 Perfil de Enriquecimiento Supérgeno

Los depósitos pórfido de Cu, típicamente se exponen a procesos de alteración supérgena en climas áridos (como en el norte de Chile), lo que puede generar procesos de enriquecimiento supérgeno, como resultado de la erosión y exhumación del depósito (Chávez, 2000; Sillitoe, 2005). Este proceso, da origen a un perfil de enriquecimiento supérgeno (Figura 2.4), el cual, se divide en tres zonas características: una zona de lixiviación, una zona de oxidación y una zona de enriquecimiento secundario. Cabe mencionar que, en algunos depósitos, dependiendo de la variación del nivel freático, se pueden desarrollar zonas intermedias de óxidos-sulfuros secundarios (Sillitoe, 2005).

Zona de Lixiviación. Corresponde a la región superficial de un perfil supérgeno típico (Figura 2.4), la cual, se caracteriza por la presencia de cuarzo residual, arcillas y abundantes óxidos e hidróxidos de Fe, con leyes normalmente por debajo del 0.1-0.2% Cu (Sillitoe, 2005, 2010). La gran lixiviación de las rocas de esta zona, se debe a la acción del H₂SO₄ o ácido sulfúrico, el cual, tiene su origen, mediante la combinación del H₂O proveniente de las aguas meteóricas y el S (azufre) liberado por la destrucción de los sulfuros hipógenos, producto de las condiciones fuertemente oxidantes (Sillitoe, 2005). Las zonas de lixiviación en los Andes centrales, tienen potencias que comúnmente varían entre los 20 y 200 m (Sillitoe, 2005), no obstante, en El Salvador alcanzan los 500 m (Gustafson & Hunt, 1975).

Zona de Oxidación. Subyace a la zona lixiviada (Figura 2.4) y consiste esencialmente de mineralización de Cu oxidada (antlerita, atacamita, brochantita, crisocola, malaquita, entre otros), asociada con óxidos e hidróxidos de Fe (Chávez, 2000), con leyes próximas al 1% Cu (Sillitoe, 2005). El cobre, generalmente se encuentra en solución, en forma de sulfatos solubles, estables en condiciones ácidas y oxidantes; por consiguiente, al migrar a mayores profundidades (condiciones menos oxidantes), las soluciones ácidas transportadoras de cobre, reaccionan con los minerales de la roca huésped, generando su neutralización y la precipitación de los minerales oxidados de Cu (Chávez, 2000; Sillitoe, 2005). La zona de oxidación, posee espesores que normalmente no exceden los 200 m (Sillitoe, 2005), aunque pueden ser mayores en depósitos gigantes como Chuquicamata (Ossandón et al., 2001).

Zona de Enriquecimiento Secundario. También denominada zona de enriquecimiento supérgeno (Figura 2.4), subyace a la zona de oxidación y se caracteriza por una mineralización de calcosina y covelina, con leyes entre 1 y 2% Cu (Sillitoe, 2005). Esta zona, se desarrolla bajo el nivel freático, en presencia de sulfuros primarios, cuyas condiciones reductoras, producen que los sulfatos sean reducidos a sulfuros enriquecidos de Cu (Sillitoe, 2005). Las zonas de enriquecimiento en los Andes centrales, alcanzan potencias que generalmente oscilan entre los 60 y 300 m, pero en el caso de Chuquicamata llegan a los 750 m (Sillitoe, 2005).

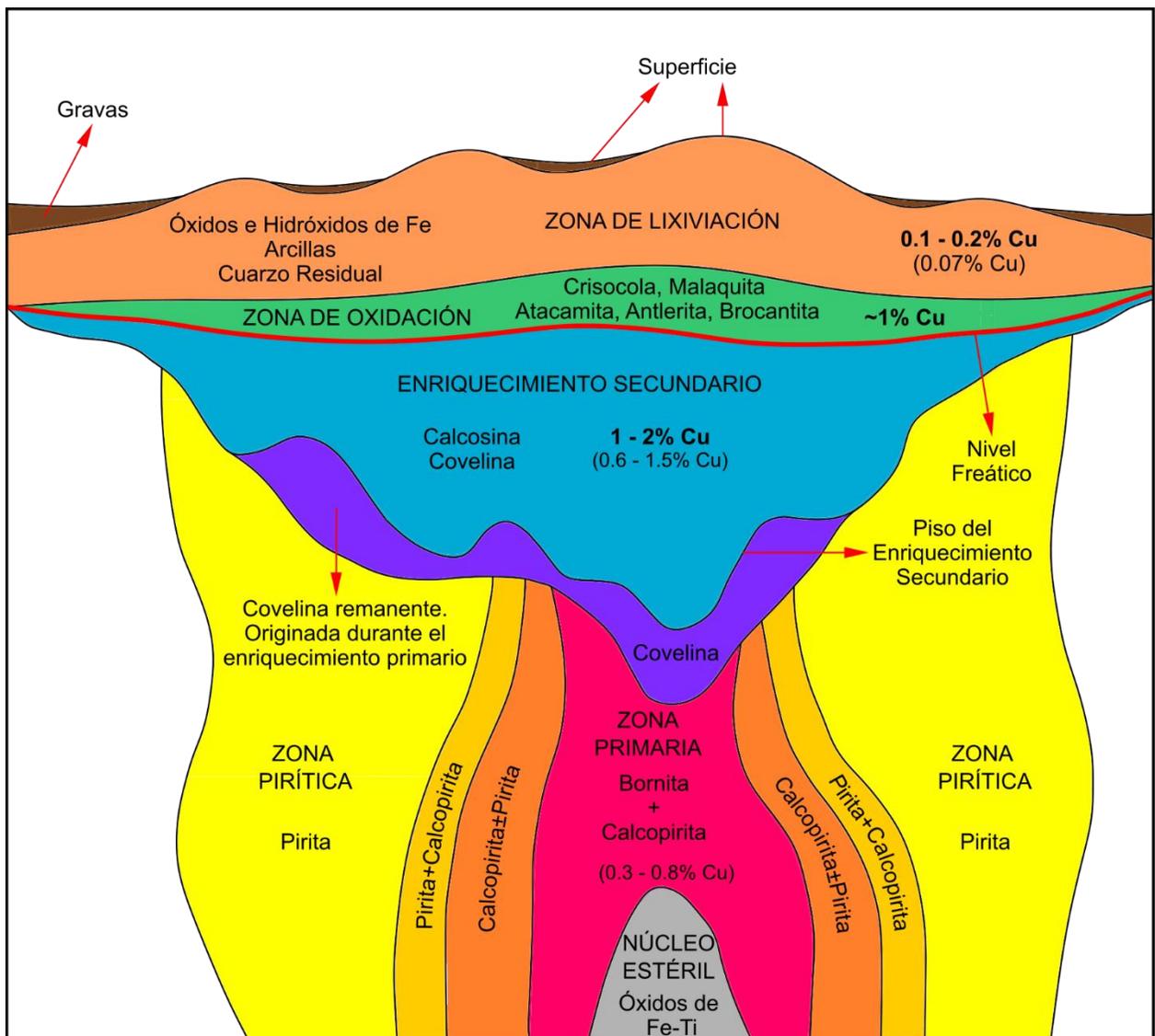


Figura 2.4: Perfil de enriquecimiento supérgeno esquemático, asociado a un depósito pórfido cuprífero. Para cada zona, se incluye la mineralogía junto con las leyes de Cu típicas (en negrita). En entre paréntesis, se presentan las leyes correspondientes al yacimiento Carmen de Andacollo. El nivel freático, está representado por la línea de color rojo. Modificado de Astudillo (2008).

2.1.6 Clasificación de Vetillas

La alteración-mineralización temprana, se caracteriza por distintos tipos de vetillas de cuarzo y conjuntos minerales, las que pueden variar en textura, composición y forma, conforme a variables como presión y temperatura (Gustafson & Hunt, 1975). Las vetillas, albergan una gran cantidad de los minerales depositados y simbolizan el lugar de mayor flujo de fluidos (Seedorff et al., 2005). Como consecuencia, sus múltiples características (mineralogía, ubicación, abundancia,

entre otras), proporcionan información valiosa sobre la evolución en el espacio-tiempo de la composición y flujo de los fluidos (Seedorff et al., 2005). Las vetillas, fueron clasificadas por Gustafson & Hunt (1975), en El Salvador, de acuerdo a su temporalidad y composición mineralógica, en vetillas A, B y D (Figura 2.5), cuya caracterización se cita a continuación:

Vetillas A. “Corresponden a conjuntos granulares de cuarzo (más abundante), feldespato potásico (de textura perítica), anhidrita, calcopirita, bornita y trazas de molibdenita. Los halos de alteración, son prácticamente indistinguibles en rocas fuertemente alteradas, sin embargo, en zonas donde cortan rocas débilmente alteradas, el feldespato potásico, la anhidrita, calcopirita y bornita, se presentan en halos. Las vetillas A más tempranas, típicamente son muy irregulares, discontinuas y segmentadas, mientras que, las sucesivamente más tardías, suelen tener límites más paralelos y ser más continuas. Las vetillas A, son las más tempranas, por ello, están cortadas por todos los demás tipos de vetillas.” (1975:881).

Vetillas B. “Se caracterizan por la presencia de cuarzo de grano grueso, anhidrita, molibdenita, calcopirita y por la ausencia de feldespato potásico. Las trazas de bornita, son raras en las vetillas B, mientras que, la pirita, sólo es abundante dentro de la zona pirítica (Figuras 2.3B y 2.4) o donde las vetillas han sido cortadas por vetillas más tardías ricas en pirita. La falta de halos de alteración es característica. Estas vetillas, son estructuras continuas, planares, con límites paralelos y, por lo general, presentan bandeamiento. Las vetillas B, son más tardías que las vetillas A y más tempranas que las vetillas D.” (1975:893).

Vetillas D. “También denominadas vetillas de sulfuro, contienen altas proporciones de pirita, con cantidades menores de calcopirita, bornita, enargita, esfalerita, galena y trazas de molibdenita. La anhidrita, está presente en la mayoría de las vetillas D, cuando no se elimina por acción supérgena. El cuarzo, suele ser menor y tiende a mostrar formas cristalinas. La dolomita, es un componente menor bastante común. Halos de alteración compuestos por sericita o sericitoclorita, rodean muchas vetillas D, particularmente las vetillas más pequeñas. Estos halos de alteración sericíticos, pueden estar rodeados por halos de alteración externos de caolinita o

caolinita-calcita. Estas vetillas, se caracterizan por ser continuas, localmente irregulares y por presentar una orientación preferencial. Las vetillas D, corresponden a las más tardías, por lo tanto, cortan a todas las demás vetillas.” (1975:895).

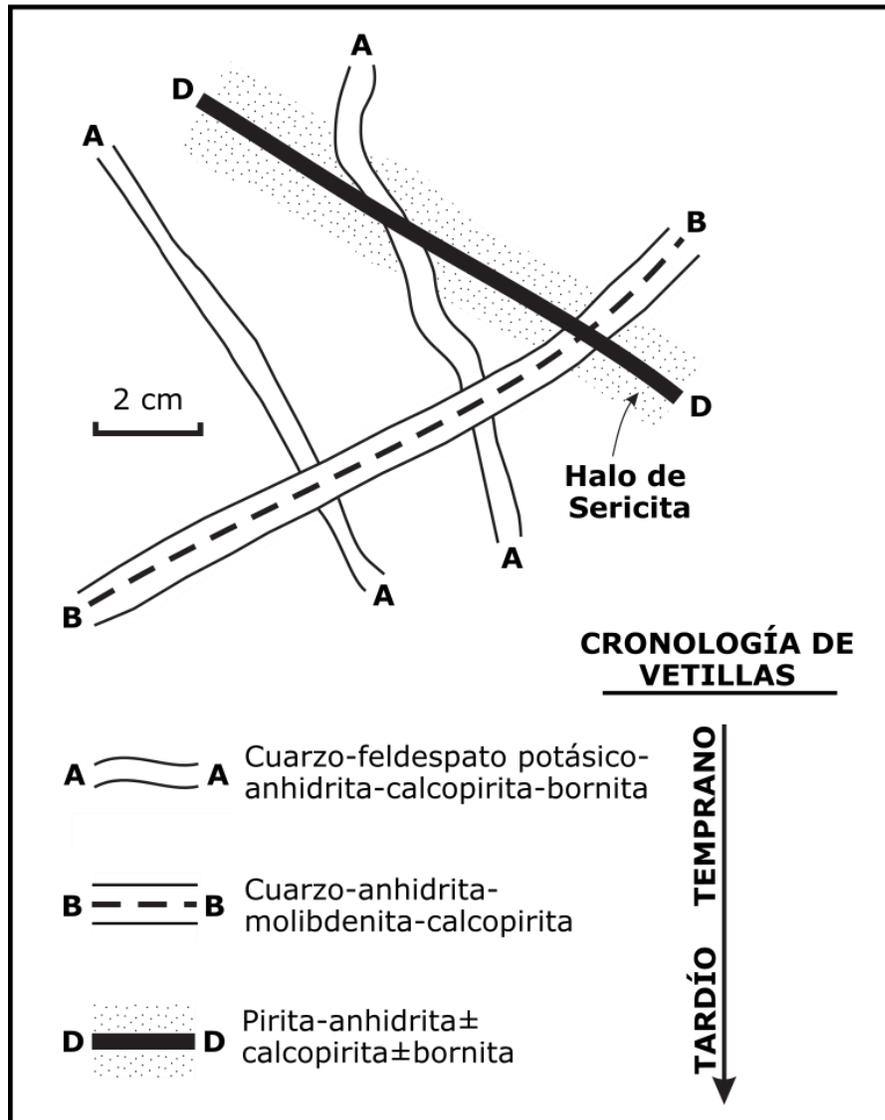


Figura 2.5: Temporalidad y relaciones de corte de las vetillas descritas por Gustafson & Hunt (1975), en El Salvador. Modificado de Sillitoe (2010).

2.1.7 Formación y Evolución de los Depósitos Pórfido Cupríferos

Producción de Magmas y Fluidos

La formación de depósitos pórfido de Cu, comienza con el emplazamiento de cámaras magmáticas parentales, en sitios de flotabilidad neutra a profundidades de 5 a 15 km (Cloos, 2001; Richards, 2005), las cuales, se convierten en la fuente tanto de magmas como de fluidos metalíferos, durante toda la evolución y génesis del depósito (Sillitoe, 2010). El enfriamiento y fraccionamiento o más comúnmente, la descompresión de las cámaras parentales, produce la saturación volátil de la masa fundida (magma), provocando la exsolución de una fase acuosa rica en metales (Shinohara & Hedenquist, 1997), la cual, por medio de la convección, es suministrada en forma de magma rico en burbujas, hacia las partes basales de las principales intrusiones de pórfido (Candela, 1991; Shinohara et al., 1995; Cloos, 2001; Richards, 2005).

Para maximizar el contenido metálico de la fase acuosa, los magmas parentales, deben ser ricos en agua (>4 % en peso) y estar oxidados (Candela & Holland, 1986; Dilles, 1987; Candela, 1992; Candela & Piccoli, 2005; Richards, 2005). Los altos contenidos de agua, producen la saturación volátil del magma, generando la separación de metales mineralizadores de manera eficiente, mientras tanto, un estado de alta oxidación, reprime la precipitación del sulfuro magmático, evitando la pérdida de metales antes de que puedan dividirse en la fase acuosa (Sillitoe, 2010).

Etapas Tempranas de Evolución

A profundidades someras (<4 km), típicas de la mayoría de los depósitos (Fournier, 1999), el contenido de H₂O en la masa fundida, aumenta a medida que cristalizan las fases anhidras, generando que la masa fundida se sature en H₂O y una fase acuosa monofásica (flechas rojas, Figura 2.6) se exsuelva de la masa fundida (Sillitoe, 2010; Becker et al., 2019). Posteriormente, la descompresión y enfriamiento del fluido monofásico, provocan su separación (Henley & McNabb, 1978; Burnham, 1979; Bodnar, 1995; Cline, 1995), lo que resulta en la producción de una fase

líquida de alta salinidad (salmuera), en equilibrio con una fase de vapor de baja densidad, denominado fluido bifásico o fluido hipersalino inmiscible (flechas moradas, Figura 2.6; Fournier, 1999), el cual, es el principal responsable de la mineralización en la zona potásica (Bodnar, 1995; Frei, 1995; Fournier, 1999; Ulrich et al., 2001). En algunos casos, el fluido bifásico, se puede formar a partir de la exsolución directa de la masa fundida (Shinohara, 1994).

En general, el enfriamiento del fluido bifásico en la zona potásica, ocurre en el rango de ~550 a 350 °C, cuya precipitación de sulfuros de Cu-Fe, es asistida por: (1) la reacción del fluido bifásico con la roca huésped (Ulrich et al., 2001; Redmond et al., 2004; Landtwing et al., 2005; Klemm et al., 2007; Rusk et al., 2008a) y (2) la rápida disminución en la solubilidad de los metales transportados por la fase de vapor del fluido bifásico, producto de la descompresión de la fase de vapor (Cox & Singer, 1992; Sillitoe, 2000; Williams-Jones et al., 2002). Esta precipitación de metales, ocurre en condiciones casi litostáticas e implica una masiva fracturación hidráulica de la roca dúctil, a altas tasas de deformación (Fournier, 1999), generando el enrejado de vetillas (stockwork) característico de los depósitos pórfido cupríferos (Burnham, 1979), el cual, controla y canaliza el ascenso continuo de los fluidos hidrotermales (Fournier, 1999). El ciclo de propagación y sellado de fracturas, así como las constantes reducciones en la presión de confinamiento, debido a la progresiva degradación de la superficie (Figura 2.6), producen variaciones en la presión que pueden inducir a la precipitación de metales, en las fases fluidas presentes (Ulrich et al., 2001; Klemm et al., 2007; Rusk et al., 2008a).

A medida que el fluido bifásico asciende, la fase de vapor de baja densidad (flechas doradas, Figura 2.6), se separa de la fase líquida de alta salinidad y producto de su menor densidad, asciende con fuerza por encima de las intrusiones de pórfido, hasta llegar a la superficie (Henley & McNabb, 1978; Hedenquist et al., 1998). Por otra parte, la condensación del SO₂ y HCl, en agua subterránea, causa la desproporción progresiva del SO₂ (a H₂SO₄ y H₂S; Giggenbach, 1992; Rye, 1993), lo que genera el fluido extremadamente ácido, responsable de los altos grados de lixiviación, involucrados en la formación de los lithocaps argílicos (Meyer & Hemley, 1967). Paralelamente, el agua externa calentada (flechas verdes, Figura 2.6), principalmente meteórica, desarrolla la zona propilítica, generalmente por reacciones de hidratación a temperatura moderada (Meyer & Hemley, 1967). La

circulación convectiva de agua externa, actúa como un potente mecanismo de enfriamiento, en especial, durante la formación tardía de los depósitos (Cathles, 1977).

Etapas Tardías de Evolución

La cristalización progresiva de las cámaras de magma parentales, genera reducciones graduales tanto en el flujo de calor, como en el abastecimiento de fluido hidrotermal (Dilles, 1987; Shinohara & Hedenquist, 1997). Bajo estas condiciones de menor temperatura (350-250 °C), no se produce la separación de la fase acuosa monofásica, exsuelta de la fase fundida, lo que resulta en un fluido monofásico de baja a moderada salinidad (flechas azules, Figura 2.6), el cual, asciende a través del enrejado de vetillas preexistente (Shinohara & Hedenquist, 1997; Hedenquist et al. 1998) e implica el desarrollo de las zonas sericítica y argílica (Hedenquist et al., 1998; Heinrich et al., 2004; Rusk et al., 2008b). Al entrar en entornos de lithocap, este fluido monofásico, en estado de sulfuración intermedio, pierde su capacidad de *buffer* o de tampón químico y evoluciona a un estado de sulfuración más alto, producto de su enfriamiento (Einaudi et al., 2003; Sillitoe & Hedenquist, 2003), lo cual, conduce a una mineralización de alta sulfuración apreciable de Au±Ag±Cu (Hedenquist et al., 1998; Heinrich et al., 2004; Heinrich, 2005; Pudack et al., 2009).

A medida que el régimen termal del depósito declina, las zonas de alteración-mineralización formadas cerca de la superficie, se sobreimprimen sobre las formadas a mayor profundidad (Gustafson, 1978; Fournier, 1999; Heinrich et al., 2004; Williams-Jones & Heinrich, 2005; Rusk et al., 2008a), lo cual, puede generar que, la parte superior de una intrusión de pórfido, contenga por lo menos tres eventos distintos de alteración-mineralización (zona potásica, sericítica y argílica, Figura 2.6; Sillitoe, 2010).

Una vez que las cámaras de magma parentales han cristalizado y el ascenso de fluidos prácticamente ha cesado, la disponibilidad de K y metal, es muy limitada para formar una zona potásica apreciable (Sillitoe, 2010). El único fluido presente, es de origen externo y produce una alteración propilítica, similar a la desarrollada durante las etapas tempranas (Sillitoe, 2010).

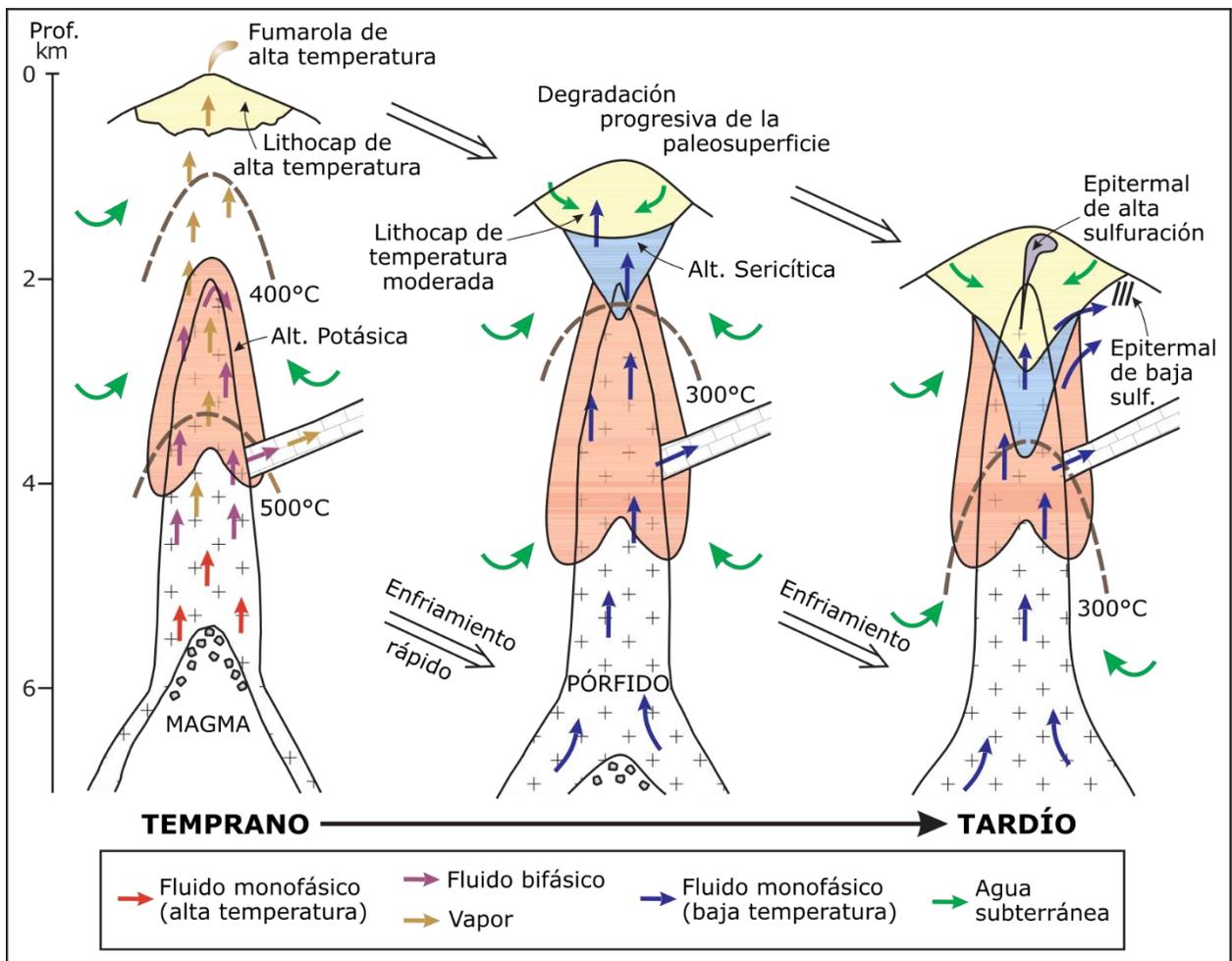


Figura 2.6: Evolución temporal de la formación de un depósito pórfido de Cu. Extraído de Sillitoe (2010).

2.2 Inclusiones Fluidas

2.2.1 Introducción

A excepción de los minerales metamórficos formados en estado sólido, todos los minerales, han crecido a partir de algún tipo de fluido (Roedder, 1984). Los minerales, durante su crecimiento cristalino, son fracturados repetidas veces, cuyas fracturas son selladas bajo la presencia de fluidos (Roedder, 1984; Goldstein & Reynolds, 1994). Durante estos procesos reiterados de propagación y sellado de fracturas, pequeñas cantidades del fluido circundante, quedan típicamente atrapadas como inclusiones fluidas, en el mineral en crecimiento, el cual, se define como mineral huésped (Roedder, 1984). Las inclusiones fluidas, son consideradas como verdaderas cápsulas de tiempo,

dado que almacenan valiosa información, sobre la temperatura, presión y composición de los fluidos que atraparon (Goldstein & Reynolds, 1994).

Las inclusiones fluidas, se definen como interrupciones o defectos de la estructura cristalina de un mineral, que han atrapado algún tipo de fluido durante el crecimiento del mismo (Roedder, 1984; Van den Kerkhof & Hein, 2001). Por ello, las inclusiones fluidas, pueden ser usadas, previo análisis petrográfico, para reconstruir las condiciones termodinámicas del crecimiento cristalino, así como, para caracterizar químicamente los fluidos, a partir de los cuales, se formaron los minerales que las contienen (Roedder, 1984; Goldstein & Reynolds, 1994; Van den Kerkhof & Hein, 2001).

Para estudiarlas y obtener información válida, referente a las condiciones originales de atrapamiento, las inclusiones fluidas, deben cumplir con tres premisas, comúnmente conocidas como “reglas de Roedder”, las cuales, establecen que las inclusiones fluidas: (1) deben ser atrapadas en una fase homogénea, (2) representan un sistema isocórico y (3) después de su atrapamiento, nada ha sido adherido y/o removido de las inclusiones (Roedder, 1984).

Breve Reseña Histórica

Hace más de 200 años (comunicación personal con Moncada, 2021), los petrógrafos, solían hacer referencia a las inclusiones fluidas y en sus primeros conceptos sobre el origen mineral, consideraban tales inclusiones como evidencia (Nash, 1976). Uno de los observadores más astutos fue Lindgren, quien destinó varias páginas a la descripción de inclusiones fluidas, en el depósito pórfido cuprífero de Morenci, Arizona. Parte de sus observaciones son las siguientes:

“Se han observado inclusiones fluidas, en granos de cuarzo del granito, la cuarcita, el pórfido y la veta de cuarzo, que se encuentran en este distrito. No hay nada raro en esto; de hecho, es la condición ordinaria de las cosas. Dado que estas inclusiones fluidas contienen sin duda

soluciones acuosas, puede considerarse como certero que tales fluidos, estaban presentes cuando los granos de cuarzo en cuestión fueron formados.” (1905:213-214).

2.2.2 La Filosofía de Realizar un Estudio de Inclusiones Fluidas

Un estudio de inclusiones fluidas, precisa de una metodología científica, la cual, implica la formulación de preguntas específicas e hipótesis concebibles para posibles resultados (Goldstein & Reynolds, 1994). Este enfoque filosófico, es requerido, porque en muchos casos, los datos de inclusiones fluidas que se necesitan para responder una pregunta específica, no se encuentran en las rocas estudiadas (Goldstein & Reynolds, 1994). Por ello, una metodología bien estructurada, puede permitir el reconocimiento de tal situación, en una etapa temprana del estudio, evitando la terrible experiencia de desperdiciar un tiempo considerable, en la recopilación de datos sin sentido (Goldstein & Reynolds, 1994).

Procedimiento

Todo estudio de inclusiones fluidas, debe emplear el siguiente procedimiento, sin omitir ninguno de los pasos (Goldstein & Reynolds, 1994). Sin embargo, hay varios puntos de la metodología que pueden ser omitidos, dependiendo del tipo de pregunta(s) planteada(s) en el estudio (Goldstein & Reynolds, 1994). El procedimiento, fue elaborado por Goldstein & Reynolds (1994) y cada uno de sus puntos se cita a continuación:

1. *“El primer paso, en cualquier estudio de inclusiones fluidas, es plantear una pregunta. Toda persona, que se encuentre en la posición de tener que recopilar datos de inclusiones, debe determinar, por qué se está realizando el estudio y debe intentar centrarse en aspectos muy específicos de la pregunta planteada.” (1994:65).* En el presente estudio, se busca generar vectores de mineralización, en el distrito minero Andacollo, los cuales, permitan establecer guías de localización hacia una potencial zona mineralizada; por consiguiente, para llevar a cabo este objetivo, se necesitan conocer las condiciones P-T-X (presión-temperatura-composición) de las

inclusiones fluidas, y así, dependiendo de si estas presentan o no fluidos mineralizadores, establecer los vectores de mineralización correspondientes. Entonces, la interrogante planteada que se busca responder en este estudio es: ¿Cuáles son las condiciones P-T-X de las inclusiones fluidas presentes en las muestras de roca recolectadas en el distrito? “*Este primer paso de hacer una pregunta apropiada y específica, es fundamental para el método científico y no se puede hacer suficiente hincapié, en que será crucial, para la implementación exitosa del estudio de inclusiones fluidas.*” (1994:66).

2. “*El siguiente paso, consiste en seleccionar muestras que demarquen una zona de estudio adecuada, la cual, permita responder a la pregunta planteada. Una roca recolectada al azar, rara vez renunciará a los secretos de su historia, por ello, se deben estudiar las rocas, para conocer lo mejor posible el contexto geológico del que provienen las muestras. Sin un marco geológico apropiado, la interpretación de los datos de inclusiones fluidas, puede ser muy limitada y en algunos casos, inapropiada.*” (1994:66). El marco geológico de este estudio, se presenta en el capítulo 3 del presente informe.

3. “*Si se lleva a cabo un estudio diagenético, se debe examinar el contexto paragenético del mineral de interés, para que el estudio de inclusiones fluidas, se sitúe dentro de un marco paragenético. La diagénesis es un proceso y un proceso ocurre a través del tiempo; por lo tanto, para que los datos de cualquier arreglo de inclusiones fluidas (FIA), puedan ayudar a desentrañar un evento diagenético, cada FIA, debe colocarse dentro de un marco temporal.*” (1994:66). En este trabajo, no se realiza ningún estudio diagenético, no obstante, dado que las inclusiones fluidas se presentan en distintos tipos de vetillas de cuarzo, de todas formas, se examina la temporalidad entre las vetillas.

4. “*El cuarto paso, consiste en describir y caracterizar las inclusiones, por medio de la petrografía de inclusiones fluidas. En esta etapa, es clave la caracterización de arreglos de inclusiones fluidas (FIAs), que corresponden a grupos de estas cavidades que fueron atrapadas de forma contemporánea. Mientras más muestras caracterizadas, mayor es la posibilidad de*

encontrar los FIAs requeridos para responder a la pregunta planteada y más cómodo se vuelve en la representatividad de los FIAs, que potencialmente serán seleccionados para las técnicas analíticas. Una vez completado este paso, el investigador, a menudo puede interpretar límites bastante concisos para las condiciones en las que se formaron las inclusiones fluidas.” (1994:66). La petrografía de inclusiones fluidas realizada en este estudio, es explicada en detalle en el capítulo 4.2.

5. *“Una vez caracterizados los FIAs correspondientes, el siguiente paso lógico, es realizar un análisis microtermométrico a las inclusiones fluidas, obteniendo así, datos de densidad y de temperaturas de homogenización (temperatura mínima de atrapamiento del fluido hidrotermal). Los datos, deben obtenerse de varias inclusiones individuales, dentro de un mismo arreglo de inclusiones fluidas, en consecuencia, es muy importante no centrar la atención en una sola inclusión, sino concentrarse en un grupo de inclusiones para poder interpretar los datos.”* (1994:66). Cabe señalar que, en este estudio, no se realiza la microtermometría de inclusiones fluidas, dado que, los datos previamente mencionados, no se requieren para cumplir con el objetivo planteado.

6. *“Finalmente, se pueden aplicar técnicas analíticas más sofisticadas, para evaluar mejor la composición de las inclusiones fluidas. A menudo, se pueden utilizar varias técnicas, en una determinada inclusión o FIA, para obtener un análisis más completo. Pero tal como se explicó anteriormente, bajo ninguna circunstancia, se deben realizar estos análisis especiales, solo con el fin de recopilar datos con la esperanza de que algo caiga. Solo después de obtener un conocimiento profundo de los estudios petrográficos, las inclusiones deben someterse a estos sofisticados instrumentos analíticos.”* (1994:67). En este estudio, no se aplican técnicas analíticas.

2.2.3 Características Generales

Mineral Huésped

Las inclusiones fluidas, forman parte de un pequeño sistema (Figura 2.7), el cual, comprende una parte del mineral huésped (mineral que alberga las inclusiones fluidas; Van den Kerkhof & Hein, 2001). La fracción de cuarzo que inmediatamente rodea una inclusión fluida, puede exhibir concentraciones de microtexturas, como dislocaciones, microfracturas y cuarzo secundario (recristalizado; Figura 2.7), las cuales, son muy útiles para obtener información sobre los procesos de interacción, entre una inclusión fluida y su mineral huésped (Van den Kerkhof & Hein, 2001). Las inclusiones fluidas, prácticamente siempre se encuentran en un estado de desequilibrio y, por lo tanto, tienden a interactuar constantemente con su mineral huésped (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

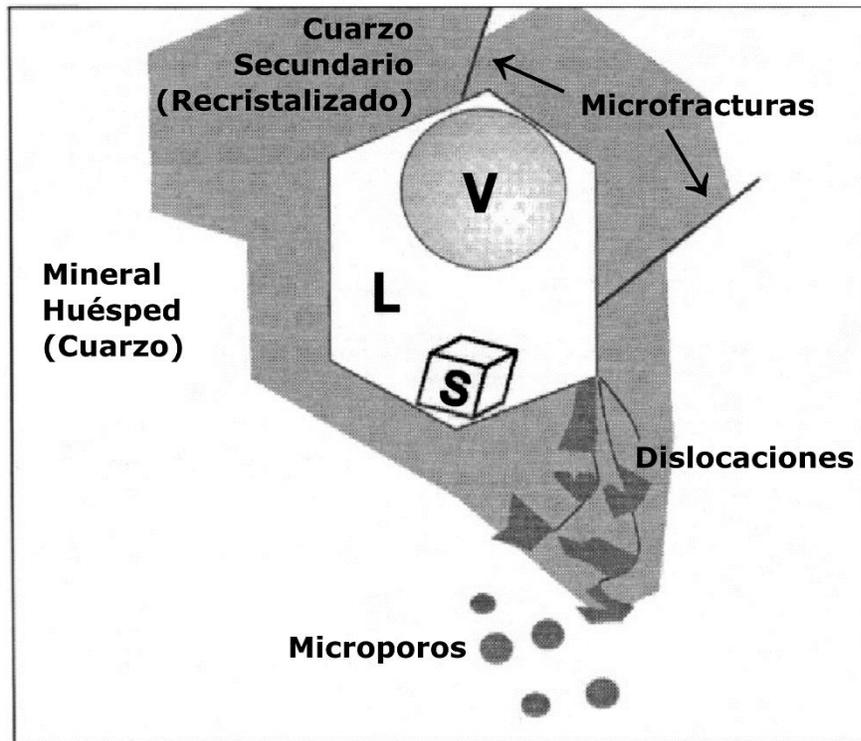


Figura 2.7: Sistema inclusión fluida-mineral huésped. Las dislocaciones son comunes y pueden inducir la fuga parcial de líquido, formando microporos. L: fase líquida; V: fase de vapor; S: fase sólida. Extraído de Van den Kerkhof & Hein (2001).

En un buen estudio de inclusiones fluidas, la selección del mineral huésped es fundamental, dado que, las inclusiones fluidas, se conservan de manera diferente en cada mineral (Van den Kerkhof & Hein, 2001). Las inclusiones fluidas, pueden ocurrir en la mayoría de los minerales, pero en la práctica, más del 90% de los estudios de inclusiones fluidas son llevados a cabo en cuarzo, cuya dureza, ausencia de clivaje y gran capacidad de recristalización, lo convierten en un medio sumamente adecuado para la preservación de las inclusiones fluidas (Van den Kerkhof & Hein, 2001). En algunos casos, las inclusiones fluidas también se conservan de buena manera en minerales como granate, olivino, piroxeno, feldespato, carbonato, fluorita y halita (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

Tamaño

Las inclusiones fluidas, poseen un gran espectro de tamaños, los cuales, van desde $< 1 \mu\text{m}$ hasta tamaños que pueden superar el centímetro de diámetro (Van den Kerkhof & Hein, 2001), no obstante, la mayoría de las inclusiones fluidas visibles (bajo microscopio petrográfico), caen en el rango de 1 a 200 μm (comunicación personal con Moncada, 2021). Es importante mencionar que, un porcentaje no menor de inclusiones fluidas, presenta tamaños $\ll 1 \mu\text{m}$, observables solo por medio del microscopio electrónico de transmisión (TEM; Viti & Frezzotti, 2001).

Color e Índice de Refracción

Salvo casos particulares (algunos fluidos orgánicos; Munz, 2001), las inclusiones fluidas, típicamente son incoloras en secciones delgadas. No obstante, la diferencia del índice de refracción ($n = \text{cociente entre la velocidad de la luz en el aire y su velocidad en el mineral}$), entre la inclusión y su mineral huésped, puede, dependiendo de la óptica (posición del condensador y diafragma, en el microscopio), generar colores oscuros, grisáceos o rosáceos (Van den Kerkhof & Hein, 2001). La observación y distinción de inclusiones fluidas, es posible debido a la diferencia de los índices de refracción; por ejemplo, las inclusiones fluidas ricas en líquido, tienen un índice de refracción de 1.32 a 1.33 y se suelen observar como inclusiones brillantes, mientras tanto, las inclusiones

fluidas ricas en vapor, poseen un índice de refracción mucho más bajo y, por ello, normalmente se observan como inclusiones oscuras (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

2.2.4 Clasificación de Inclusiones Fluidas

Clasificación Descriptiva

Las inclusiones fluidas, se pueden clasificar por diferentes parámetros visuales, dentro de los cuales, los más comunes son: tamaño, forma, color, índice de refracción y principalmente, la relación de fases presentes a temperatura ambiente (Van den Kerkhof & Hein, 2001). A temperatura ambiente, las inclusiones suelen exhibir una fase líquida (L) y otra de vapor (V), eventualmente acompañadas de una o más fases sólidas (S), las cuales, fueron atrapadas accidentalmente o formadas como una fase mineral hija, durante el enfriamiento de la inclusión (Figura 2.9; Roedder, 1984; Van den Kerkhof & Hein, 2001). La relación de fases presentes a temperatura ambiente, es uno de los criterios más útiles y ampliamente aplicados para clasificar las inclusiones fluidas (Figuras 2.8 y 2.10; Van den Kerkhof & Hein, 2001), y en este estudio, no será la excepción.



Figura 2.8: Representación esquemática de la clasificación de inclusiones fluidas, con respecto a la relación de fases presentes a temperatura ambiente. L: fase líquida; V: fase de vapor; LCO₂: CO₂ líquido. Modificado de Nash (1976).

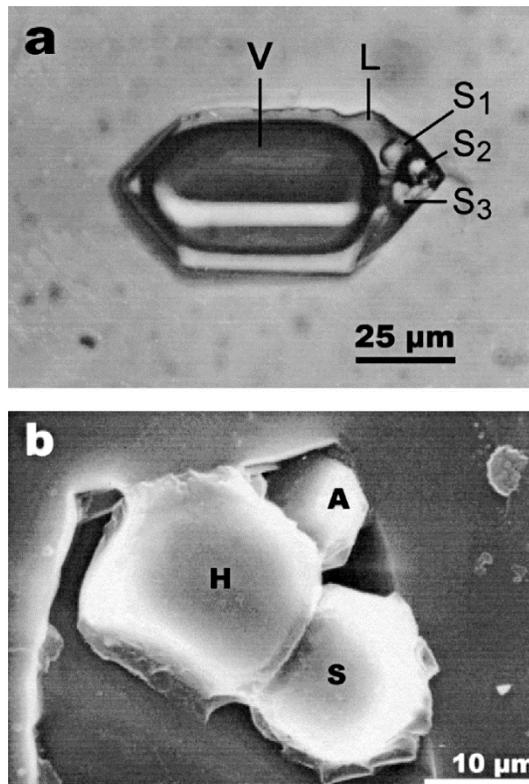


Figura 2.9: a) Microfotografía a luz polarizada de una inclusión multifásica, conteniendo una gran burbuja de CO₂ (V), líquido salino saturado (L) y varias fases minerales hijas (S1, S2 y S3). b) Imagen SEM (microscopio electrónico de barrido) de una inclusión abierta, que contiene halita (H), silvita (S) y arcanita (A), como minerales hijos. Extraído de Van den Kerkhof & Hein (2001).

Inclusiones Ricas en Líquido. Corresponden a las inclusiones fluidas más abundantes. Contienen dos fases: una fase líquida y otra de vapor, representada por una pequeña burbuja que comprende del 10 al 40% del volumen de la inclusión (Figuras 2.8 y 2.10A; Nash, 1976). Estas inclusiones de densidad moderada (Mangas & Sierra, 1991), presentan una amplia gama de salinidades, variando desde 0 a 23%, en peso equivalente de NaCl (Nash, 1976). Análisis químicos de los fluidos extraídos, señalan que, Na, K, Ca y Cl, son los componentes principales de la fase líquida (Roedder, 1972). La fase de vapor, se constituye principalmente de H₂O, aunque un porcentaje no menor corresponde a CO₂, el cual, generalmente está presente en inclusiones de depósitos pórfido cupríferos (Nash, 1976). En las inclusiones ricas en líquido, los cristales birrefringentes como carbonato romboédrico y anhidrita, son relativamente comunes y en algunos casos, se puede observar hematita (Nash, 1976).

Las inclusiones ricas en líquido, son comunes en rocas intrusivas, rocas de caja y vetillas de depósitos pórfido de Cu y, en general, se asocian a zonas propilíticas y sericíticas, y a vetillas desarrolladas en etapas relativamente tardías (Nash, 1976).

Inclusiones Ricas en Vapor. En general, contienen dos fases fluidas: una fase líquida y otra de vapor, representada por una gran burbuja, que comprende más del 60% del volumen de la inclusión (Figuras 2.8 y 2.10B; Nash, 1976). Estas inclusiones de baja densidad (Mangas & Sierra, 1991), muestran salinidades entre 0.4 y 7%, en peso equivalente de NaCl (Nash, 1976) y se plantea que, las salinidades más altas, se traducen en el atrapamiento de un líquido de alta salinidad con vapor de baja densidad (Nash & Theodore, 1971; Roedder, 1971). El contenido de CO₂, varía desde trazas, en las inclusiones ricas en vapor, hasta más del 25% en volumen, en las inclusiones ricas en CO₂ (mencionadas más adelante; Nash, 1976). En las inclusiones ricas en vapor, se suele observar hematita rojiza u opaca, como mineral hijo (Nash, 1976).

La cantidad de inclusiones ricas en vapor, es sumamente variable, sin embargo, habitualmente se encuentran en el cuarzo ígneo de los pórfidos, donde la mayoría de las muestras, comprenden el 50% o más de la población (Nash, 1976).

Inclusiones con Halita. Contienen tres fases: una fase líquida, otra de vapor (burbuja) y una fase sólida representada por halita (Figuras 2.8 y 2.10C), la cual, se caracteriza por ser incolora y mostrar una geometría cúbica (Nash, 1976). Además de la halita, estas inclusiones, suelen contener otros minerales hijos, como la silvita (Nash, 1976) y la calcopirita (Becker et al., 2019). La silvita, se caracteriza por su carácter isotrópico, bordes redondeados y por presentar un menor relieve que la halita (Nash, 1976). La calcopirita, se distingue por su tonalidad opaca y su geometría trigonal (Zolensky & Bodnar, 1982; Anthony et al., 1984; Mavrogenes & Bodnar, 1994). Estas inclusiones, típicamente son de alta densidad (Mangas & Sierra, 1991) y normalmente presentan salinidades que rondan el 40%, en peso equivalente de NaCl (Nash, 1976).

Tras la observación y descripción de inclusiones fluidas, en diversos estudios aplicados a la exploración de depósitos pórfido cupríferos, Roedder & Bodnar (1997), llegaron a la conclusión, de que la presencia de inclusiones que contienen halita, está muy estrechamente asociada con la zona de mineralización, lo cual, es concordante con estudios realizados por autores como Theodore & Nash (1973), Moore & Nash (1974), Redmond et al. (2004), Landtwing et al. (2010) y Lecumberri-Sanchez et al. (2013). Este vínculo genético, entre las inclusiones con precipitación de halita y la mineralización cuprífera, fue reconocido hace más de 100 años por Lindgren, quién declara lo siguiente: “*Ellas (inclusiones con halita) prueban, yo creo concluyentemente, que el magma de pórfido ácido (en Morenci), estaba acompañado por notables cantidades de soluciones acuosas conteniendo una gran cantidad de sal, que probablemente era NaCl.*” (1905:216) y también manifiesta que: “*Es quizás un hecho significativo que, estas inclusiones, estén ausentes en los pórfidos dioríticos, quienes por regla general, no tienen conexión con los depósitos de cobre.*” (1905:216).

Inclusiones Ricas en CO₂. Se caracterizan por la presencia de CO₂ líquido (Figura 2.8), por consiguiente, contienen dos fases líquidas y una de vapor (Nash, 1976). Algunas inclusiones ricas en CO₂, presentan salinidades cercanas al 2%, en peso equivalente de NaCl (Nash & Cunningham, 1973), mientras que otras, pueden contener halita y alcanzar salinidades de 30%, en peso equivalente de NaCl (Nash & Theodore, 1971). Las inclusiones que contienen CO₂ líquido, se asocian con depósitos de tipo pórfido de temperatura relativamente baja o con sus etapas tardías de baja temperatura (Nash, 1976), lo que refleja la brecha de miscibilidad, en el sistema CO₂-H₂O (Takenouchi & Kennedy, 1964), la cual, se desarrolla por debajo de los 350 °C, generando que, a temperaturas más altas, el CO₂ se disuelva fácilmente en soluciones acuosas (Nash, 1976).

Las inclusiones ricas en CO₂, no son muy comunes en los depósitos pórfido cupríferos, dado que, la concentración de CO₂ en estos depósitos, es normalmente insuficiente para producir CO₂ líquido a temperatura ambiente (Nash, 1976). En estos depósitos, los fluidos mineralizadores, suelen contener un porcentaje molar de CO₂ inferior al 3% (Nash, 1976).

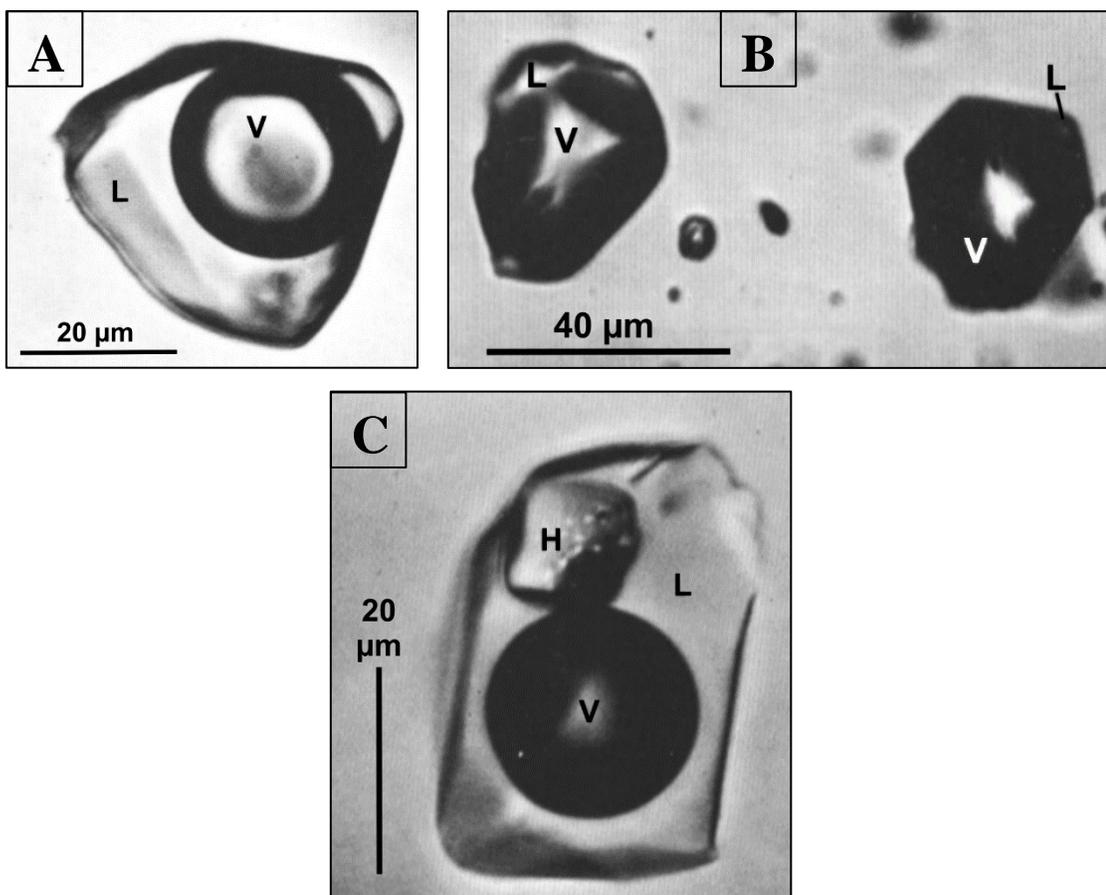


Figura 2.10: Microfotografías a luz polarizada de inclusiones fluidas. A) Inclusión rica en líquido. B) Inclusiones ricas en vapor. C) Inclusión con precipitación de halita. L: fase líquida; V: fase de vapor; H: halita. Extraído de Nash (1976).

Clasificación Genética

Otro criterio ampliamente utilizado se basa en el origen. Las inclusiones fluidas, comúnmente pertenecen a distintas generaciones, dado que, el atrapamiento de los fluidos, suele tener diferente lugar en el tiempo, siendo esta la causa principal, de que algunos fluidos muestren grandes diferencias de composición (Mangas & Sierra, 1991). Roedder (1984), establece ciertos criterios geométricos y morfológicos para clasificar las inclusiones fluidas, en dos tipos genéticos: primarias y secundarias.

Inclusiones Primarias. Corresponden a todas las inclusiones que son atrapadas durante el crecimiento cristalino (Van den Kerkhof & Hein, 2001). Durante el crecimiento de un cristal, en presencia de un fluido, se forman defectos en la estructura cristalina, que atrapan diminutas porciones del fluido circundante, cuyo sellado, da lugar a la formación de las inclusiones primarias (Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991). Estas inclusiones, se localizan en el avance de las caras, aristas y vértices del cristal (Figura 2.11) y se caracterizan por ser las más representativas de las condiciones termodinámicas presentes en el momento del atrapamiento (Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991).

Inclusiones Secundarias. Corresponden a todas las inclusiones que son atrapadas luego de la formación del cristal (Van den Kerkhof & Hein, 2001). Cuando un cristal se fractura, en presencia de un fluido, el fluido ingresa a la fractura e inicia un proceso de disolución y recristalización cristalina, lo que produce el atrapamiento de un grupo de inclusiones secundarias (Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991). Estas inclusiones, suelen encontrarse en grupos muy numerosos y dispuestas a lo largo de fracturas recristalizadas (Figura 2.11; Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991). Las inclusiones secundarias, solo representan las condiciones termodinámicas de fluidos posteriores al crecimiento cristalino (Roedder, 1984).

Los criterios que permiten distinguir genéticamente a las inclusiones fluidas, son muy ambiguos y dependientes de la forma cristalina del mineral. En un cristal euhedral (cristal con caras bien definidas), las inclusiones primarias, típicamente se encuentran aisladas y dispuestas según los planos de crecimiento del cristal (Figura 2.11), mientras tanto, las inclusiones secundarias, atraviesan el cristal con orientaciones aleatorias, siguiendo fracturas recristalizadas (Figura 2.11; Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991; Goldstein & Reynolds, 1994). Sin embargo, en un cristal anhedral (cristal con caras irregulares y mal definidas), la clasificación se complica, ya que los planos de crecimiento nunca son visibles, por lo que la distinción de inclusiones, se define con respecto al borde de grano mineral (Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991). Las inclusiones primarias, pueden aparecer tanto aisladas dentro de los granos y presentando un gran tamaño, como en el borde de los granos minerales (Figura 2.12), mientras que, las inclusiones secundarias, suelen atravesar los bordes de grano mediante fracturas recristalizadas, son mucho más abundantes,

presentan un menor tamaño y pueden mostrar formas muy irregulares (Figura 2.12; Roedder, 1984; Mangas & Sierra, 1991).

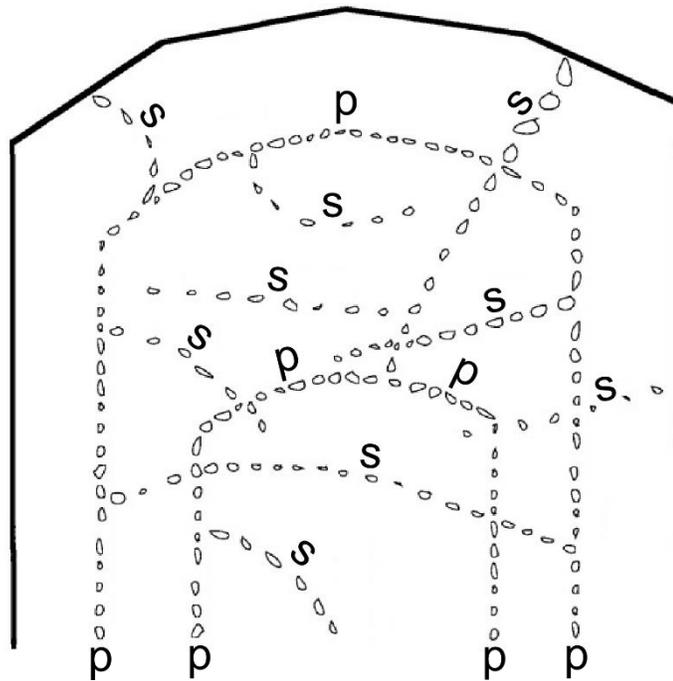


Figura 2.11: Representación idealizada de un cristal de cuarzo euahedral, mostrando la distinción entre inclusiones fluidas primarias (p) y secundarias (s). Modificado de Goldstein & Reynolds (1994).

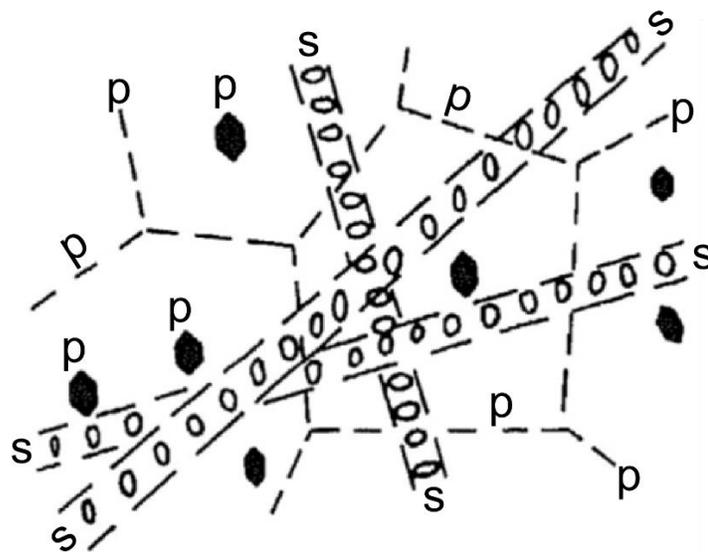


Figura 2.12: Representación esquemática de cristales de cuarzo anhedral, mostrando la distinción entre inclusiones fluidas primarias (p) y secundarias (s). Modificado de Mangas & Sierra (1991).

2.2.5 Fluidos Homogéneos vs Heterogéneos

El atrapamiento de un fluido homogéneo, en un momento dado del crecimiento cristalino, produce inclusiones fluidas que son prácticamente idénticas en apariencia, composición y densidad (Figura 2.13a; Van den Kerkhof & Hein, 2001). Durante el enfriamiento posterior al atrapamiento del fluido homogéneo, ocurren diferentes procesos dentro de la inclusión, los cuales, provocan la separación de fases (Figura 2.13a): (1) la contracción del fluido, ocasiona la formación de burbujas ($L \rightarrow L+V$), (2) la saturación del fluido, induce al desarrollo de minerales hijos ($L \rightarrow L+S$) y (3) la miscibilidad del fluido, causa la separación de la fase líquida ($L \rightarrow L_1+L_2$; Van den Kerkhof & Hein, 2001). La separación de fases, producto del enfriamiento del fluido, genera inclusiones con exactamente la misma proporción de fases (Van den Kerkhof & Hein, 2001), es decir, todas las inclusiones, contendrán el mismo porcentaje de líquido y vapor, por ejemplo.

El atrapamiento de fluidos heterogéneos (inmiscibles) o durante la ebullición, generalmente produce inclusiones fluidas de composición y densidad variables (Figura 2.13b; Van den Kerkhof & Hein, 2001), es decir, las inclusiones, no contendrán el mismo porcentaje de líquido y vapor, por ejemplo. La ebullición o *boiling*, se debe a una repentina caída en la presión del fluido, lo que comúnmente es consecuencia del fracturamiento hidráulico de la roca suprayacente o del propio ascenso del fluido (Moncada & Bodnar, 2012; Moncada et al., 2012). Conforme a datos teóricos y experimentales, la ebullición es considerado uno de los mecanismos más eficaces de precipitación mineral (Au, Ag, Cu y otros elementos), en la mayoría de los sistemas hidrotermales (Drummond & Ohmoto, 1985; Henley & Brown, 1985). El atrapamiento de un fluido bajo condiciones de ebullición, está representado por la coexistencia de inclusiones ricas en líquido con inclusiones ricas en vapor (Figura 2.13b), mientras tanto, la presencia sólo de inclusiones ricas en vapor, representa el atrapamiento de un fluido bajo condiciones de ebullición intensa o *flashing* (Bodnar et al., 1985b).

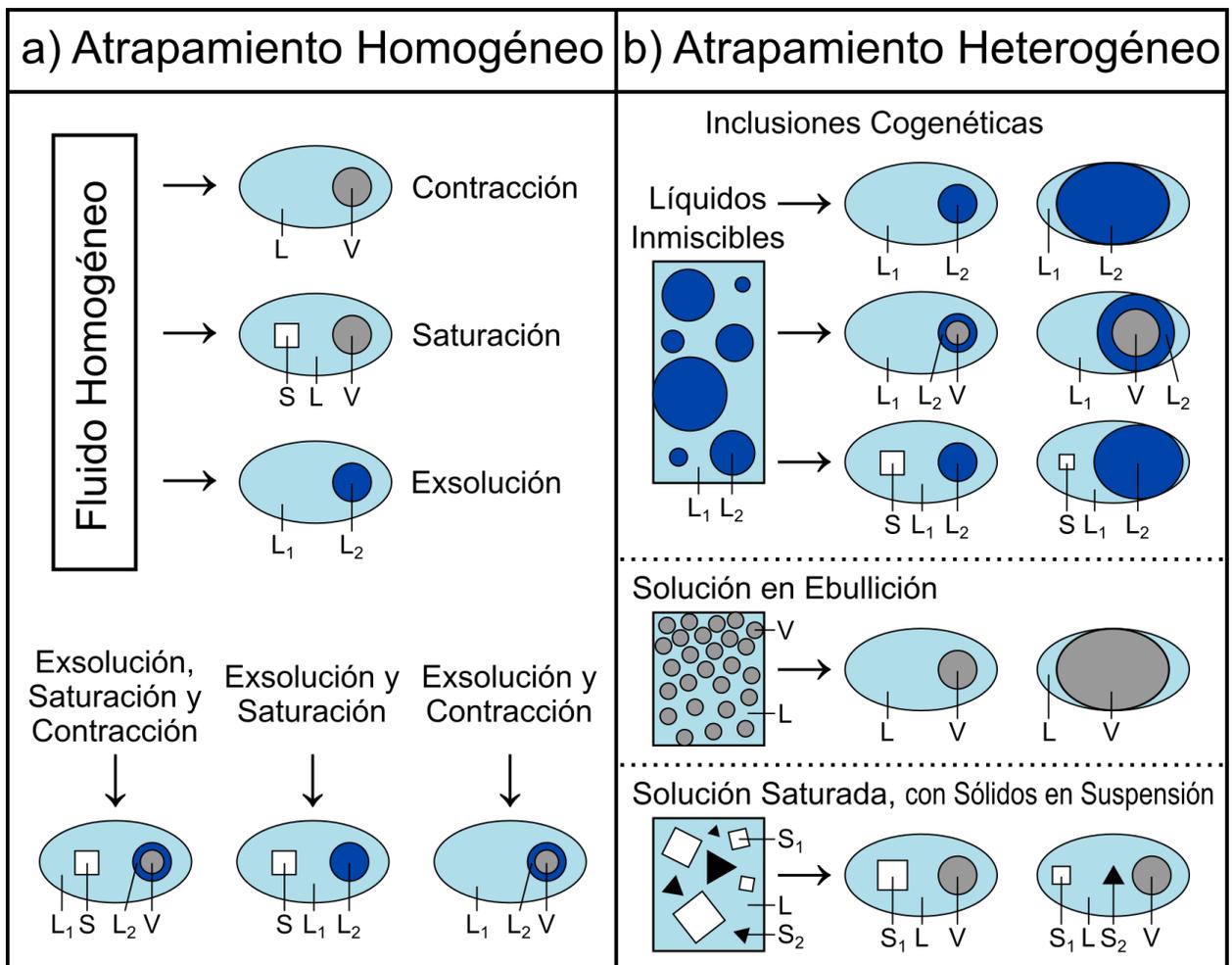


Figura 2.13: Cuadro esquemático exhibiendo los diferentes tipos de inclusiones fluidas, formadas a partir del atrapamiento de a) fluidos homogéneos y b) fluidos heterogéneos. Modificado de Van den Kerkhof & Hein (2001).

2.2.6 Decrepitación y Modificación de Inclusiones Fluidas

La decrepitación de una inclusión fluida, se define como la fuga parcial o completa de su contenido, debido a la variación, entre la presión interna de la inclusión y la presión de confinamiento (Van den Kerkhof & Hein, 2001). La modificación o el reequilibrio de una inclusión, hacen referencia a los diversos cambios que se producen en la inclusión, al variar la presión y la temperatura (Van den Kerkhof & Hein, 2001). Otros términos como estiramiento o *stretching*, apuntan a un cambio de volumen sin pérdida de material (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

Una vez formada la inclusión fluida, su presión se define, de acuerdo a una isocora determinada por la densidad y composición del fluido, en el momento de su atrapamiento (ic_x , Figura 2.14; Van den Kerkhof & Hein, 2001). Cualquier ruta que no trace exactamente la isocora, generará una diferencia de presión (entre la inclusión y su entorno), que, al superar un valor crítico, provocará la modificación de la inclusión (Van den Kerkhof & Hein, 2001). La modificación de inclusiones fluidas, depende principalmente del gradiente de presión, entre la presión interna de la inclusión y la presión de confinamiento externa (comúnmente la presión litostática), el cual, da lugar a los tres regímenes principales de modificación de inclusiones fluidas: descompresión isotérmica, enfriamiento isobárico y enfriamiento isocórico (Van den Kerkhof & Hein, 2001), los cuales, se muestran en la Figura 2.14 y se explican a continuación:

Descompresión Isotérmica (DIT). Se produce cuando la presión interna de la inclusión, es mayor que la presión de confinamiento, causando un proceso de explosión-decrepitación (ED, Figura 2.14), lo que resulta en la expansión de la inclusión y/o la pérdida parcial de su contenido, producto de la filtración mediante microfracturas y dislocaciones (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

Enfriamiento Isobárico (EIB). Tiene lugar cuando la presión interna de la inclusión, es menor que la presión de confinamiento, generando un proceso de implosión-decrepitación (ID, Figura 2.14), lo que provoca el colapso de la inclusión (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

Enfriamiento Isocórico (ECC). Ocurre cuando no hay variación del gradiente de presión, es decir, la inclusión fluida, se enfría exactamente a lo largo de su isocora (ic_2 , Figura 2.14), lo que conlleva a su preservación (Van den Kerkhof & Hein, 2001).

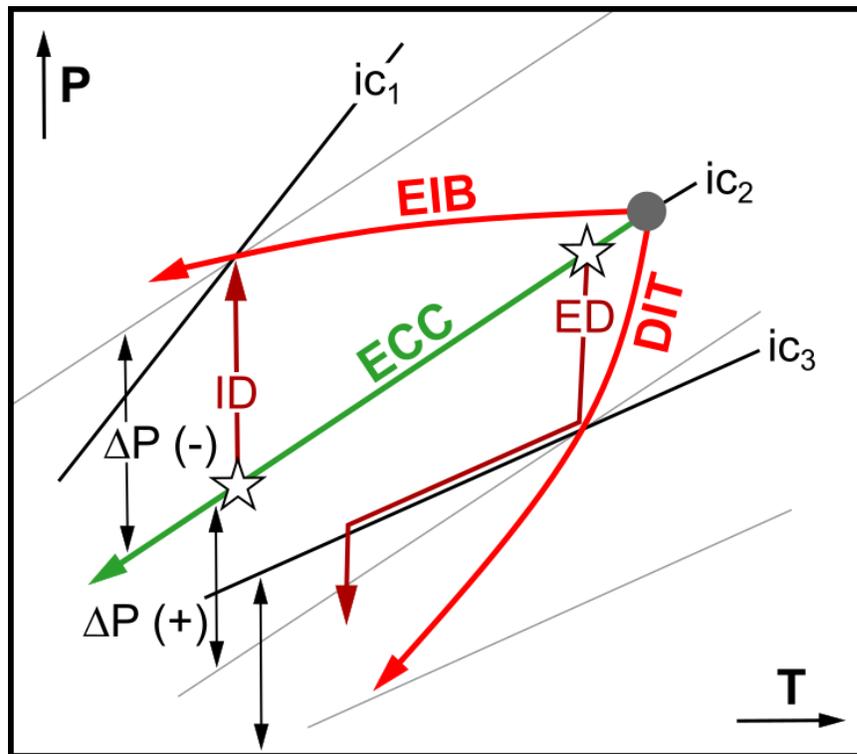


Figura 2.14: Regímenes principales de modificación de inclusiones fluidas, durante condiciones retrógradas, en función de la presión y temperatura. Modificado de Van den Kerkhof & Hein (2001).

Las fugas parciales, pueden afectar considerablemente la composición del fluido de una inclusión (Van den Kerkhof & Hein, 2001). La alta polaridad de las moléculas de H₂O, la convierten en un compuesto mucho más móvil, en comparación con la fase de vapor, por lo tanto, durante una decrepitación, las inclusiones típicamente pierden H₂O y se enriquecen en compuestos gaseosos, como CO₂, CH₄ y N₂ (Bakker & Jansen, 1990; Hall & Sterner, 1993). Además, las salinidades de las inclusiones, suelen sufrir cambios importantes, durante procesos de modificación de inclusiones fluidas (Hall & Wheeler, 1992).

Las inclusiones afectadas por procesos de modificación, suelen distinguirse por sus formas y superficies irregulares y por estar rodeadas de inclusiones fluidas diminutas, denominadas *neonate inclusions* (Figura 2.15d), formadas por los mismos procesos de modificación (Figura 2.15d; Tarantola et al., 2012; Sun et al., 2020). Las microfracturas desarrolladas por procesos de modificación, suelen extenderse lejos de la inclusión fluida, evidenciando procesos posteriores de estiramiento o decrepitación (Figura 2.15; Sun et al., 2020).

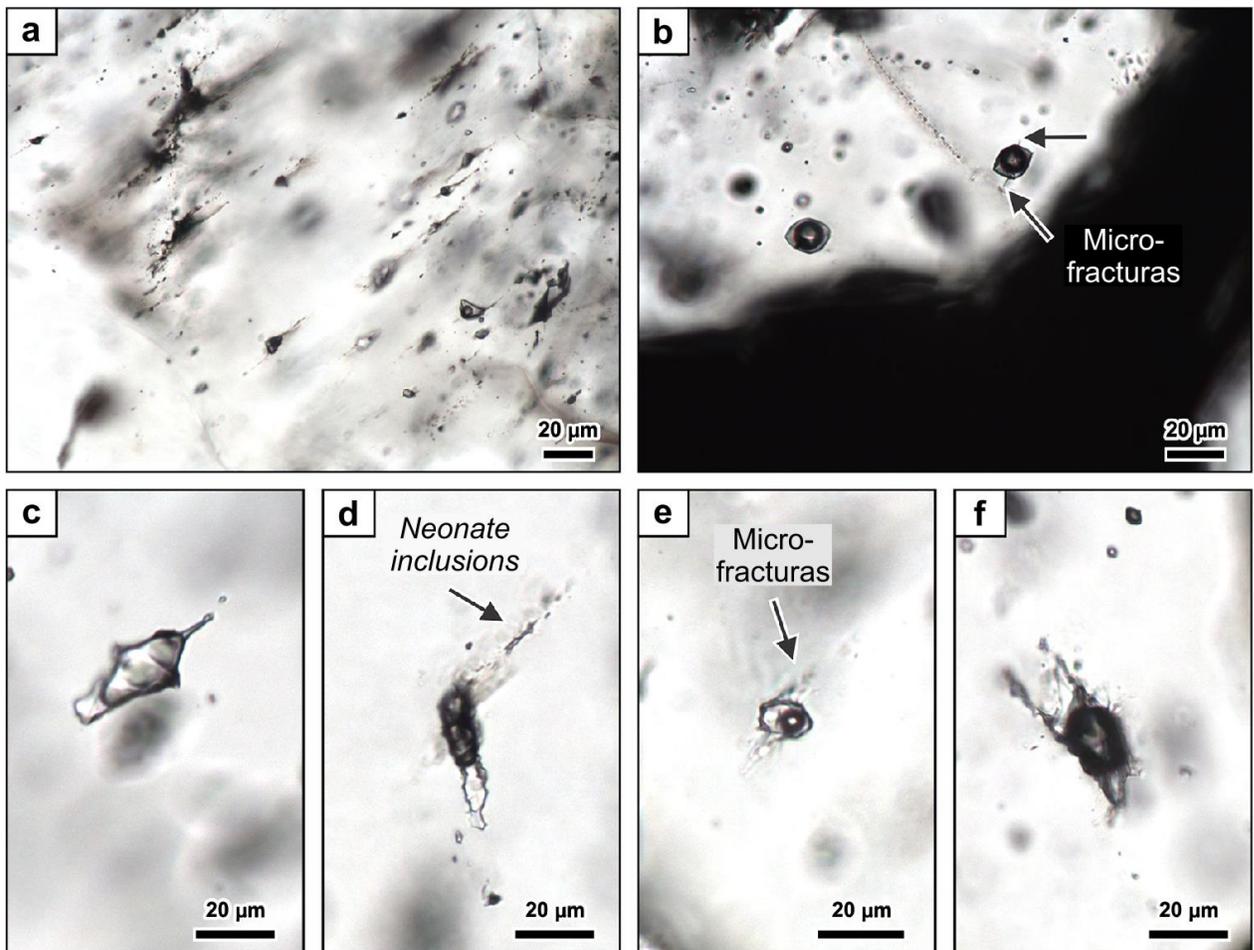


Figura 2.15: Inclusiones fluidas afectadas por procesos de modificación: a) Inclusiones fluidas de forma muy irregular, con microfracturas que se extienden lejos de las inclusiones. b) Inclusión rica en vapor con dos microfracturas. c) Inclusión rica en vapor de forma irregular. d) Inclusión rica en vapor de superficies muy irregulares, mostrando un arreglo planar de neonate inclusions, el cual, emana hacia afuera de la inclusión. e) Inclusión con precipitación de halita, exhibiendo dos microfracturas que se extienden hacia afuera de la inclusión. f) Inclusión rica en vapor de superficies muy irregulares, presentando diversas microfracturas que emanan de la inclusión. Todas las imágenes fueron tomadas con luz polarizada. Extraído de Sun et al. (2020).

2.3 Modelo de Becker et al. (2019)

2.3.1 Introducción

Durante los últimos 50 años, se han realizado centenares de estudios sobre inclusiones fluidas, en una amplia variedad de depósitos pórfido cupríferos. En general, estos estudios, han permitido demostrar una variación espacial, en las características de las inclusiones fluidas, dentro de cada depósito (Bodnar, 1995; Rusk et al., 2008a; Bodnar et al., 2014) y han señalado que, las inclusiones fluidas, se describen de buena forma, en el sistema H₂O-NaCl (Bodnar, 1995). En efecto, al utilizar datos P-V-T-X (presión-volumen-temperatura-composición) mediante el sistema H₂O-NaCl, es posible determinar la relación de fases presentes a temperatura ambiente, para cualquier condición P-T-X dada (Bodnar, 1982, 1983, 2003). Dicho de otro modo, se puede predecir el tipo de inclusión fluida presente, en cada zona del depósito.

Becker et al. (2019), presentan un modelo que describe la variación espacial y temporal, en las relaciones de fase a temperatura ambiente de las inclusiones fluidas, durante la cristalización de un plutón, que captura los procesos y condiciones que más se asocian con la mineralización pórfido cuprífera. Este modelo, en resumidas cuentas, permite estimar el momento y la ubicación, en los cuales, las inclusiones fluidas probablemente quedaron atrapadas. Por consiguiente, la petrografía de inclusiones fluidas, en muestras recolectadas en diversos sectores adyacentes al pórfido Carmen de Andacollo, será una guía para determinar la ubicación relativa de las muestras dentro del depósito, lo que proporcionará vectores, hacia la zona con mayor potencial de albergar mineralización cuprífera.

2.3.2 Parámetros Principales del Modelo

Cristalización del Plutón

El modelo de Becker et al. (2019), se basa en la cristalización de un plutón de composición intermedia, el cual, se extiende desde un cuerpo batolítico en profundidad, hasta niveles superficiales, donde intruye su pila volcánica (área gris, Figura 2.16). La historia de cristalización del plutón, se puede observar en la Figura 2.16 y se explica a continuación:

Durante la cristalización, el plutón se compone de tres fases: una fase fundida subsaturada (área roja, Figura 2.16), una fase fundida saturada (área naranja, Figura 2.16) y una fase cristalizada (área marrón claro, Figura 2.16). La fase fundida subsaturada, se encuentra dentro de la isoterma de 1000 °C y corresponde a la masa fundida que aún no ha alcanzado la saturación de H₂O. La fase fundida saturada, se extiende desde el límite S₁, S₂ o S₃ (dependiendo de la etapa de cristalización), hasta la isoterma de 1000° C y corresponde a la masa fundida que se encuentra saturada en H₂O. Dentro de esta zona, también denominada caparazón saturado en H₂O (Becker et al., 2019), la fase acuosa monofásica se exsuelve de la masa fundida y en efecto, coexisten la masa fundida saturada en H₂O, la fase acuosa monofásica y cristales, cuyas cantidades, disminuyen hacia la isoterma de 1000 °C (Becker et al., 2019). La fase cristalizada, se extiende desde los límites originales del plutón (línea continua gruesa S₀, Figura 2.16), hasta el límite S₁, S₂ o S₃ (dependiendo de la etapa de cristalización) y corresponde a la masa fundida que ha cristalizado en su totalidad.

La etapa A (Figura 2.16A), representa un episodio temprano en la historia de cristalización, poco después de que la masa fundida ha alcanzado la saturación de H₂O. Las etapas B y C (Figura 2.16B, C), representan episodios con una mayor cristalización de la masa fundida, lo que se traduce, en la disminución de tamaño y la migración a mayor profundidad, de las zonas correspondientes a la fase fundida subsaturada y la fase fundida saturada. La etapa D (Figura 2.16D), representa las condiciones presentes cuando se ha logrado la cristalización completa de la masa fundida y el plutón ha cristalizado en su totalidad. En esta etapa final, el plutón se compone únicamente de la fase cristalizada.

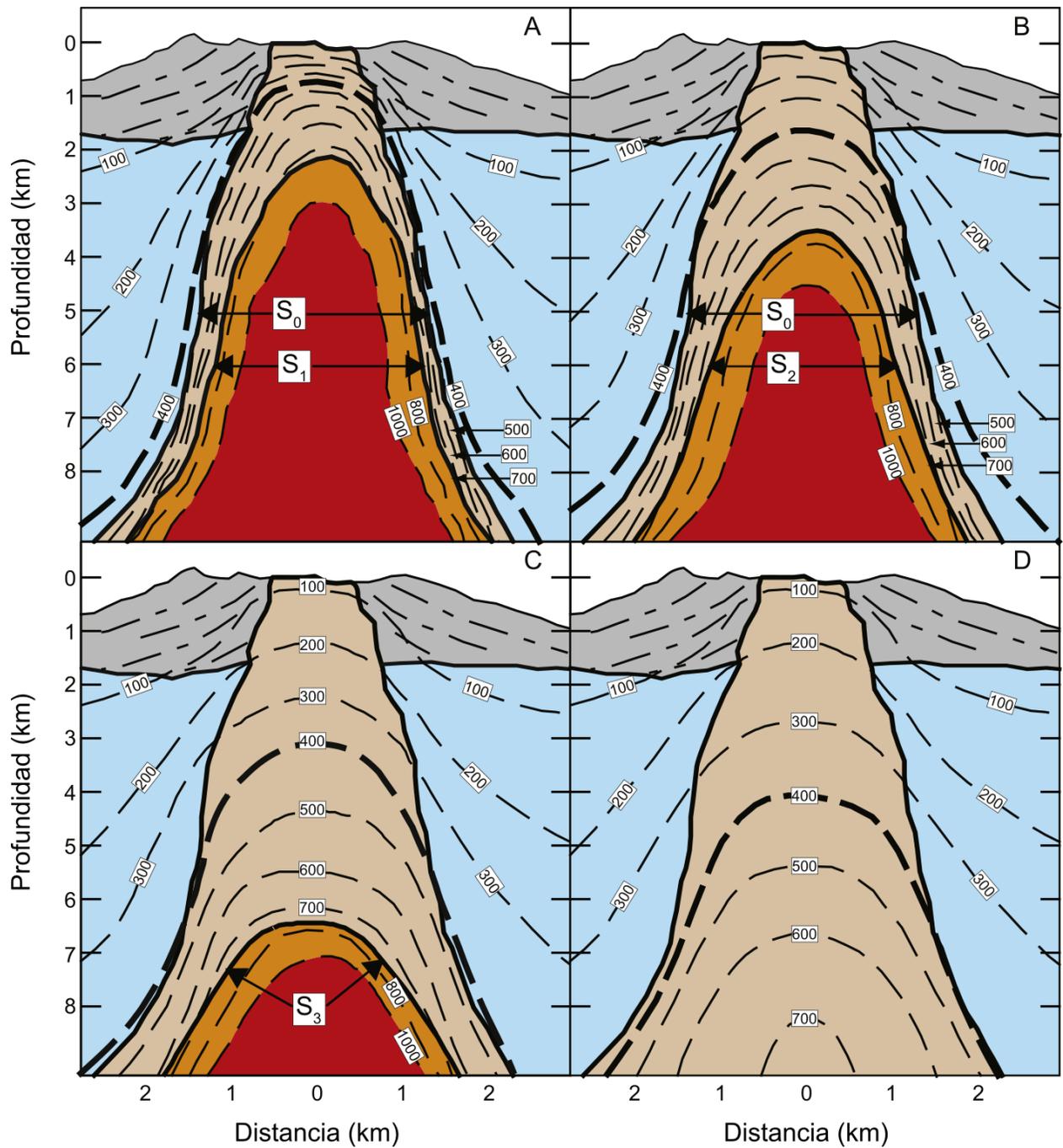


Figura 2.16: Historia idealizada de la cristalización del plutón. El área celeste representa a la roca caja. Extraído de Becker et al. (2019).

Isotermas

El modelo de Becker et al. (2019), utiliza datos de temperatura correspondientes a los modelos de Burnham (1979, 1997) y de Knapp & Norton (1981), para definir la distribución y topología de las isotermas (líneas discontinuas etiquetadas, Figura 2.16), durante la cristalización del plutón. Cabe mencionar que, estos modelos de enfriamiento hidrotermal (Burnham 1979, 1997; Knapp & Norton, 1981), presentan diferencias en sus condiciones iniciales de cristalización y, consecuentemente, en sus isotermas. Por esta razón, las isotermas presentes en el modelo de Becker et al. (2019), deben considerarse como aproximadas.

Presión

De acuerdo con Fournier (1999), la zona de transición frágil-dúctil, se encuentra próxima a los 400 °C, en los sistemas magmático-hidrotermales. Siguiendo esta premisa, el modelo de Becker et al. (2019), define la isoterma de 400 °C (línea discontinua gruesa, Figura 2.16), como el límite entre las condiciones hidrostáticas (zona frágil) y litostáticas (zona dúctil). Tomando en cuenta lo anterior, el modelo de Becker et al. (2019), contempla un gradiente de presión de 10 MPa/km con una densidad fluida de 1 g/cm³, en la zona frágil y un gradiente de presión de 30 MPa/km con una densidad rocosa de 3 g/cm³, en la zona dúctil, con el fin de estimar la presión en una ubicación dada.

Sistema H₂O-NaCl

Los fluidos magmáticos producidos en los depósitos pórfido cupríferos, son mayoritariamente salmueras (Roedder & Bodnar, 1997; Student & Bodnar, 1999; Bodnar et al., 2014), cuyas salinidades, típicamente oscilan entre un 5 y 15%, en peso equivalente de NaCl (Bodnar, 1995; Audétat et al., 2008; Lecumberri-Sanchez et al., 2013). Conforme a este supuesto, el modelo de Becker et al. (2019), asume que, la fase acuosa exsuelta de la masa fundida, presenta una salinidad de 10%, en peso equivalente de NaCl, la cual, permanece constante durante toda la cristalización del plutón. En consecuencia, el modelo de Becker et al. (2019), está representado por

el sistema H₂O-NaCl (Figura 2.17), válido para fluidos con salinidades de 10%, en peso equivalente de NaCl. El sistema H₂O-NaCl y cada uno de sus campos de estabilidad de fase, se encuentran bajo condiciones P-T-X típicas del entorno pórfido cuprífero (Becker et al., 2019).

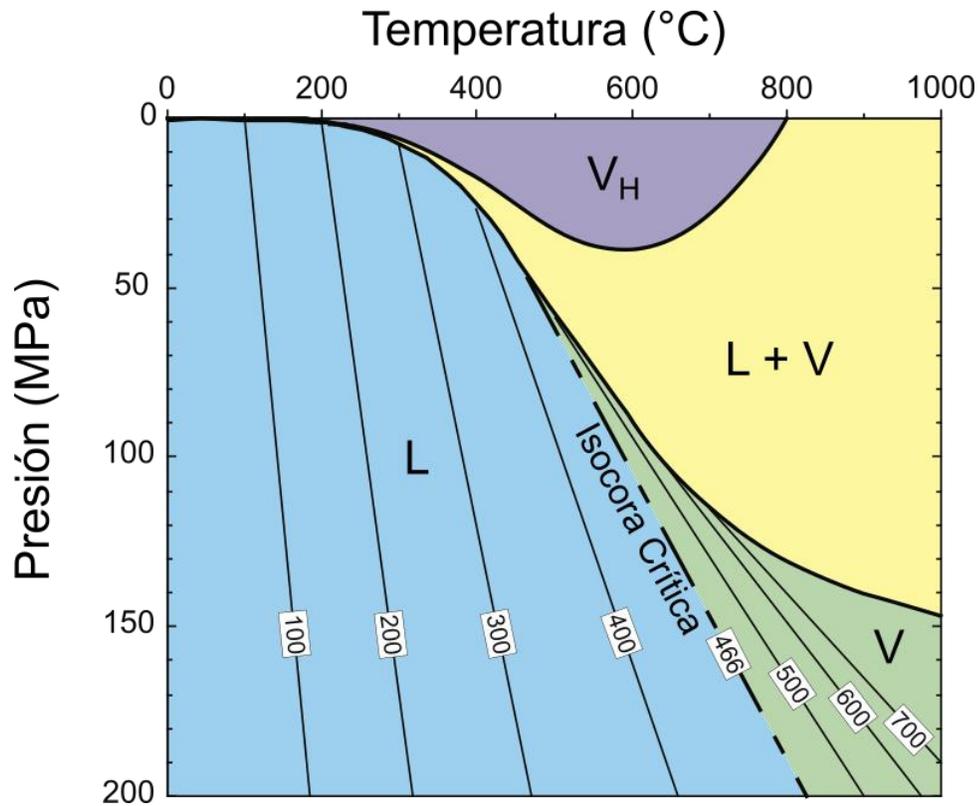


Figura 2.17: Diagrama de estabilidad de fases correspondiente al sistema H₂O-NaCl. L: campo líquido; V: campo de vapor; V_H: campo de vapor saturado en halita; L+V: campo de líquido + vapor. Modificado de Becker et al. (2019).

El sistema H₂O-NaCl, comprende 4 campos de estabilidad de fase: tres regiones monofásicas representadas por los campos líquido (campo celeste, Figura 2.17), vapor (campo verde, Figura 2.17) y vapor saturado en halita (campo morado, Figura 2.17), y una región bifásica representada por el campo líquido + vapor (campo amarillo, Figura 2.17). El campo monofásico líquido, es estable a bajas temperaturas y no se ve mayormente afectado por la presión. Por el contrario, el campo monofásico de vapor, es estable a altas temperaturas y principalmente bajo condiciones de alta presión. A su vez, el campo monofásico de vapor saturado en halita (Fournier, 1987), es estable a temperaturas intermedias y presiones bajas. En estas tres regiones monofásicas, la fase acuosa monofásica es estable (Becker et al., 2019). El campo bifásico líquido + vapor, es

estable a altas temperaturas y generalmente bajo presiones intermedias. En esta región bifásica, la fase acuosa monofásica se separa para dar lugar al fluido bifásico o fluido hipersalino inmisible (Fournier, 1999), el cual, es estable (Becker et al., 2019).

Procesamiento de Datos

Una vez definidos los parámetros del modelo, Becker et al. (2019), desarrollaron un código numérico (Becker, 2007), que predice la relación de fases presentes a temperatura ambiente de las inclusiones fluidas, en el sistema H₂O-NaCl, a partir de la temperatura, presión y composición (salinidad) de los fluidos, en un lugar dado en el tiempo y el espacio. El código numérico, opera de la siguiente forma:

1. Para cualquier lugar dado en el tiempo y el espacio, el código calcula la presión del fluido, en función de su profundidad.
2. A partir de las condiciones P-T-X del fluido, el código define su densidad y campo de estabilidad de fase.
3. El código calcula la salinidad y temperatura de homogenización de la(s) fase(s) presente(s).
4. El código obtiene la relación de fases presentes a temperatura ambiente de las inclusiones fluidas.

Los datos obtenidos a partir del código numérico, se aplicaron en el modelo de Becker et al. (2019) de la siguiente manera:

1. Los campos de estabilidad de fase, se calcularon a lo largo de cada isoterma de la Figura 2.16, para luego ser mapeados en la Figura 2.18, conservando el patrón de colores utilizado en la Figura 2.17.
2. Las inclusiones fluidas, se caracterizaron a lo largo de 5 perfiles verticales, distribuidos desde los flancos hasta el centro del plutón (trazos verticales 1-5, Figura 2.18).

2.3.3 Evolución Espacial y Temporal de los Campos de Estabilidad de Fase

La evolución de los campos de estabilidad de fase (sistema H₂O-NaCl, Figura 2.17), a través de la cristalización del plutón (Figura 2.16), correspondiente al modelo de Becker et al. (2019), se puede observar en la Figura 2.18 y se explica a continuación:

Durante la etapa A de cristalización (Figura 2.18A), las condiciones de presión y temperatura, en la cumbre del plutón, son tales que, el fluido que se exsuelve de la masa fundida, se encuentra en el campo monofásico de vapor saturado en halita (área morada, Figura 2.18). A mayor profundidad, justo por debajo del campo monofásico de vapor saturado en halita, el fluido que se exsuelve de la masa fundida, se encuentra en el campo bifásico líquido + vapor (área amarilla, Figura 2.18), el cual, se extiende a lo largo de los flancos del plutón, alcanzando niveles profundos, donde se intercala entre dos porciones, en las cuales, el campo monofásico de vapor (área verde, Figura 2.18) es estable.

Posteriormente, en la etapa B de cristalización (Figura 2.18B), la exsolución de fluidos ocurre a mayor profundidad, lo que se traduce, en la disminución de tamaño del campo monofásico de vapor saturado en halita, debido a las condiciones de mayor presión. Estas nuevas condiciones, generan que el campo bifásico líquido + vapor, se concentre a profundidades intermedias y pierda su estabilidad en los niveles profundos. Por el contrario, el campo monofásico de vapor, aumenta de tamaño, expandiéndose a través de los flancos del plutón, hacia menores profundidades.

Después, en la etapa C de cristalización (Figura 2.18C), las condiciones de alta presión, provocan que el campo monofásico de vapor saturado en halita y el campo bifásico líquido + vapor, dejen de ser estables y desaparezcan. Por lo tanto, el fluido que se exsuelve de la masa fundida, se encuentra en el campo monofásico de vapor, el cual, se presenta rodeando la fase fundida subsaturada (área roja, Figura 2.18). Las condiciones presentes en esta etapa, hacen posible que el fluido monofásico de vapor, al migrar hacia menores profundidades, pase desde el campo

monofásico de vapor hacia el campo monofásico líquido (área celeste, Figura 2.18), sin interceptar el campo bifásico líquido + vapor (Heinrich et al., 2004; Williams-Jones & Heinrich, 2005).

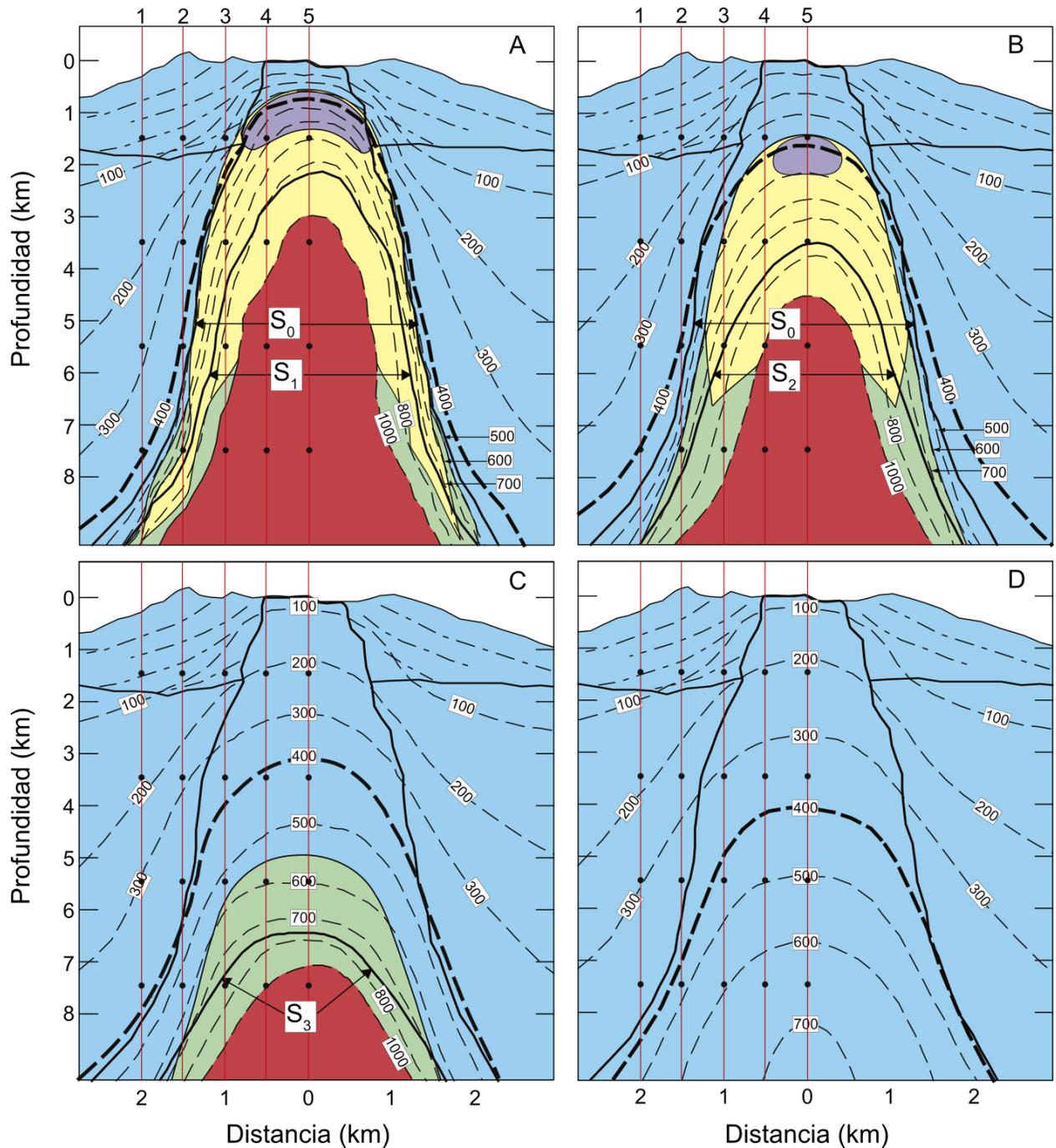


Figura 2.18: Historia idealizada de la cristalización del plutón, en función de los campos de estabilidad de fase correspondientes al sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$. Extraído de Becker et al. (2019).

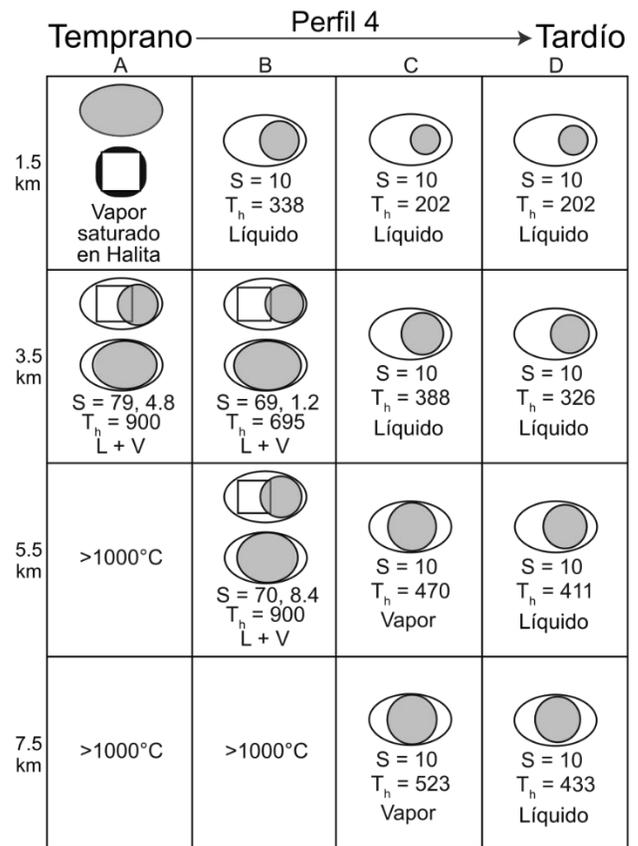
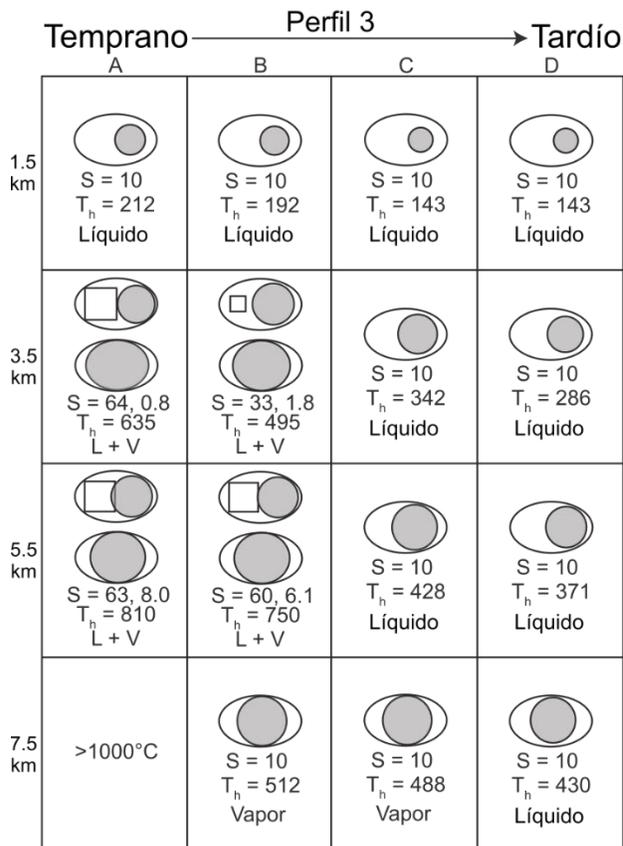
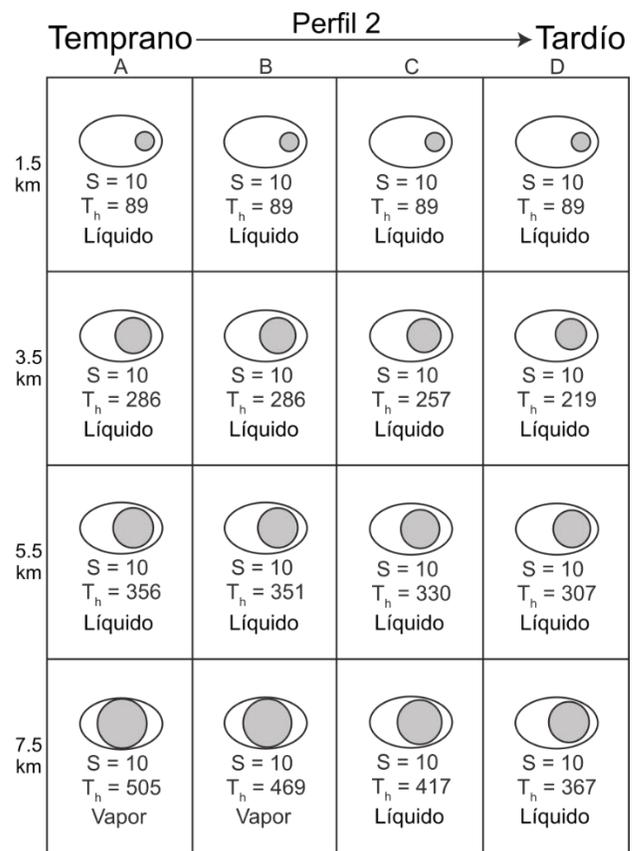
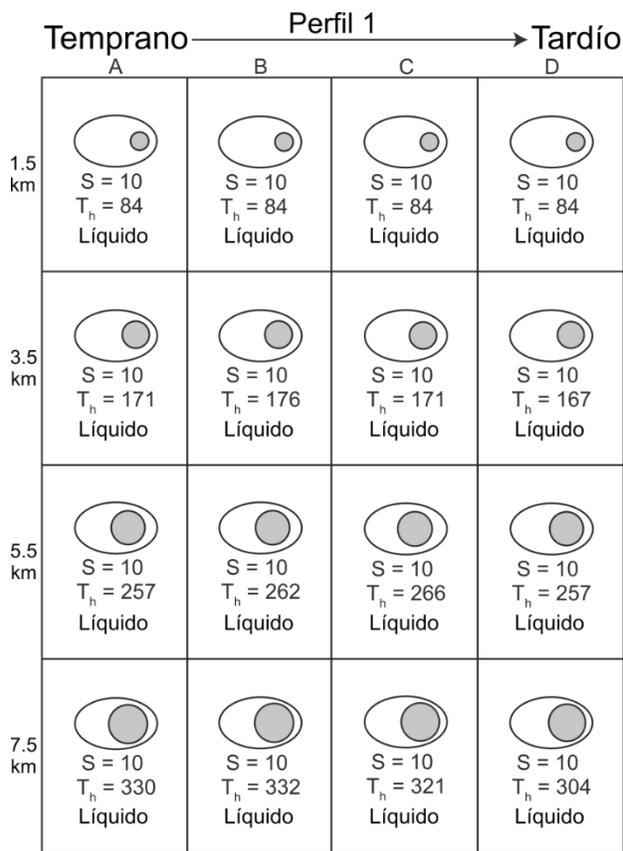
Finalmente, en la etapa D de cristalización (Figura 2.18D), la última gota de fluido que se exsuelve de la masa fundida, se localiza únicamente en el campo monofásico líquido. Como se menciona anteriormente, el campo monofásico líquido, es estable a bajas temperaturas, por ende, siempre se encuentra en regiones distales al plutón.

2.3.4 Distribución Espacial y Temporal de las Inclusiones Fluidas

La variación espacial y temporal en las características de las inclusiones fluidas, se presenta en la Figura 2.19, conforme con el modelo de Becker et al. (2019). La información de las inclusiones fluidas (Figura 2.19), se dispone a través de cinco perfiles verticales trazados en la Figura 2.18, los cuales, abarcan 4 profundidades (1.5, 3.5, 5.5 y 7.5 km), durante las 4 etapas de cristalización del plutón. Para cualquier etapa y profundidad dada, se muestra la relación de fases presentes a temperatura ambiente (apariencia), la salinidad (S) y la temperatura de homogenización (Th) de las inclusiones fluidas, incluyendo, además, el campo de estabilidad de fase en donde el fluido fue atrapado. En resumidas cuentas, cada campo de estabilidad de fase, dará origen a diferentes tipos de inclusiones fluidas:

Los fluidos que son atrapados en el campo monofásico de vapor saturado en halita, dan origen a inclusiones ricas en vapor saturadas en halita, las cuales, caracterizarían las zonas poco profundas de los depósitos tipo pórfido (Bodnar, 1982, 1995; Lecumberri-Sanchez et al., 2013). En estas inclusiones, la halita generalmente permanece oculta por la fase de vapor. A pesar de ello, las inclusiones ricas en vapor saturadas en halita, se distinguen por presentar ~100% de fase de vapor a temperatura ambiente (perfiles 4A y 5B, Figura 2.19; Becker et al., 2019). Becker et al. (2019), no obtuvieron datos de salinidad ni temperatura de homogenización para estas inclusiones.

Los fluidos que atraviesan el campo bifásico líquido + vapor, se componen de una fase líquida de alta salinidad, en equilibrio con una fase de vapor de baja densidad (Fournier, 1999). Por lo tanto, el atrapamiento del fluido, se traduce en inclusiones ricas en líquido saturadas en halita coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (perfiles 3A, 3B, 4A, 4B, 5A y 5B, Figura 2.19).



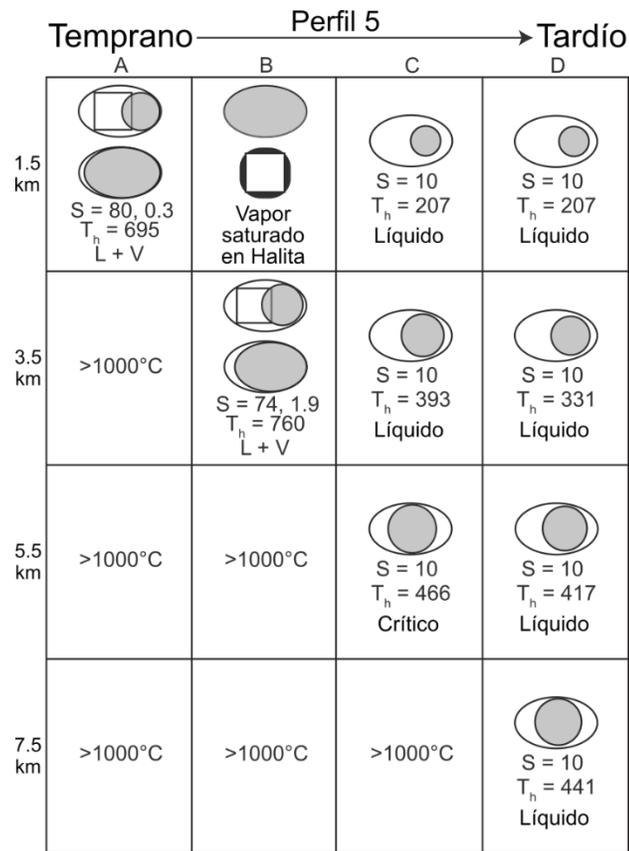


Figura 2.19: Variación espacial y temporal en las características de las inclusiones fluidas. Los círculos o elipses sombreados en gris, representan la fase de vapor, los cuadrados sin relleno representan la halita y el área restante corresponde a la fase líquida. Extraído de Becker et al. (2019).

Como se puede ver en las etapas A y B de la Figura 2.18, el campo bifásico líquido + vapor, se ciñe a las inmediaciones del plutón. Por consiguiente, las inclusiones ricas en líquido saturadas en halita, probablemente representan una ubicación dentro o cerca del plutón (Becker et al., 2019).

Los fluidos que son exsueles a grandes profundidades, seguramente quedan atrapados en el campo monofásico de vapor, por lo cual, dan lugar a inclusiones fluidas ricas en vapor, que típicamente tienen entre un 60 y 70% de fase de vapor a temperatura ambiente (perfiles 2A, 2B, 3B, 3C y 4C, Figura 2.19). En algunas zonas profundas, las condiciones son tales que, la fase de vapor se encuentra muy cerca de la isocora crítica (Figura 2.17), lo que da origen a inclusiones ricas en vapor, que muestran un comportamiento de homogenización crítico (perfil 5C, Figura 2.19; Cline & Bodnar, 1994; Bodnar, 1995).

Los fluidos que quedan atrapados en el campo monofásico líquido, producen inclusiones fluidas ricas en líquido, las cuales, caracterizan las regiones alejadas del plutón. En estas zonas distales representadas por los perfiles 1 y 2 (Figura 2.18), el campo monofásico líquido, permanece estable durante toda la cristalización del plutón, por lo tanto, todas las inclusiones fluidas a través de estos dos perfiles, corresponden a inclusiones ricas en líquido (excepto a los 7.5 km de los perfiles 2A y 2B, Figura 2.19). Durante la etapa C de cristalización (Figura 2.18C), las inclusiones ricas en líquido, suelen frecuentar las porciones ya cristalizadas del plutón (perfiles 3C, 4C y 5C, Figura 2.19) y a menudo contienen minerales hijos opacos, que habitualmente se identifican como calcopirita (Zolensky & Bodnar, 1982; Anthony et al., 1984; Mavrogenes & Bodnar, 1994). En el instante anterior a la cristalización completa del plutón (Figura 2.18D), sólo se forman inclusiones ricas en líquido (etapa D, Figura 2.19), las cuales, son prácticamente indistinguibles de las inclusiones generadas por fluidos de origen externo, durante la etapa hidrotermal posterior (Becker et al., 2019).

3. MARCO GEOLÓGICO

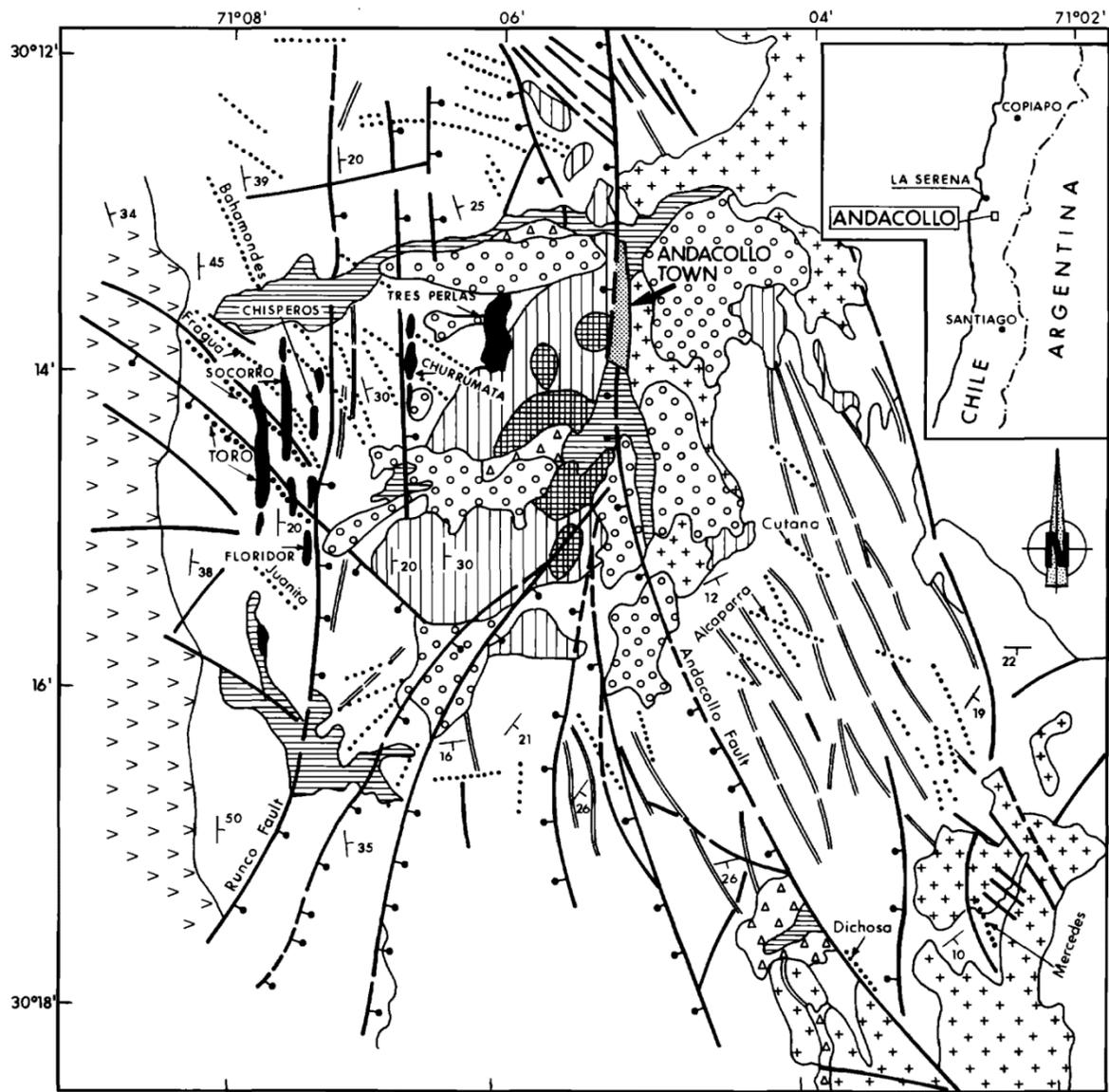
3.1 Geología General del Distrito Minero Andacollo

El distrito minero Andacollo, yace sobre la cuenca Andacollo, una depresión NS delimitada por fallas y parcialmente rellenada por gravas del Terciario (Oyarzun et al., 1996). La geología del distrito (Figura 3.1), consiste principalmente de una sucesión volcánica correspondiente a la Formación Quebrada Marquesa (Oyarzun et al., 1996), la cual, sobreyace a la Formación Arqueros, sucesión volcánica-sedimentaria, que aflora en el sector occidental del distrito (Reyes, 1991).

En el sector noreste del distrito, un intrusivo de carácter regional, denominado intrusivo de Tablalalume, intruye la Formación Quebrada Marquesa (Llaumett et al., 1975). En el centro del distrito, aflora un intrusivo semejante a un stock, que corresponde a un pórfido tonalítico (Figura 3.1; Llaumett et al., 1975; Oyarzun et al., 1996). Este intrusivo, denominado pórfido Carmen de Andacollo, se encuentra mineralizado y alterado, y conforme con Llaumett et al. (1975), estaría espacial y genéticamente relacionado con la mineralización presente en el distrito.

En un principio, a partir del crecimiento de la minería artesanal y el conocimiento de los lineamientos geomorfológicos principales, se logró plantear la presencia de dos sistemas estructurales principales, en el distrito minero Andacollo (Reyes, 1991). No obstante, la profundización del rajo de Carmen de Andacollo, ha dejado en evidencia la existencia de un nuevo modelo estructural, que se correlaciona apropiadamente con los diferentes eventos de deformación regional. Este modelo, elaborado por Nilo et al. (2015), reconoce tres de los cuatro sistemas estructurales que se identifican actualmente a escala distrital: compresivo N30°W (Aptiano-Albiano), transpresivo N60°W (Albiano-Cenomaniano) y compresivo EW (Campaniano).

El distrito, comprende una gran variedad de depósitos, donde se incluyen: placeres auríferos, ubicados en la vecindad del pórfido Carmen de Andacollo; vetas auríferas, localizadas al noroeste, oeste y sureste del distrito; vetas ricas en mercurio, restringidas al sureste del distrito;



LEYENDA

- | | | | | |
|-------------------------------|---|--|--|--|
| TERCIARIO
Y
CUATERNARIO |  | DEPÓSITOS ALUVIALES |  | DIORITA/TONALITA |
| |  | GRAVAS |  | ALTERACIÓN HIDROTHERMAL
(ASOCIADA AL PÓRFIDO) |
| |  | GRAVAS AURÍFERAS |  | MINERALIZACIÓN DE ORO
TIPO MANTO |
| CRETÁCICO
INFERIOR |  | FORMACIÓN QUEBRADA MARQUESA
IGNIMBRITAS VOLCÁNICAS
ANDESÍTICAS Y DACÍTICAS,
Y CALIZAS |  | PÓRFIDO CUPRÍFERO |
| |  | FORMACIÓN ARQUEROS |  | CONTACTO LITOLÓGICO |
| |  | BRECHAS VOLCÁNICAS |  | FALLA NORMAL |
| | | |  | DIQUES |
| | | |  | VETAS |
| | | |  | RUMBO Y MANTEO |

Figura 3.1: Mapa geológico del distrito minero Andacollo. Extraído de Oyarzun et al. (1996).

estratoligados de oro y plata, situados en el sector occidental del distrito; y un pórfido cuprífero del Cretácico (pórfido Carmen de Andacollo), emplazado en el centro del distrito, a partir del cual, se extrae cobre, oro y molibdeno (Oyarzun et al., 1996).

El depósito Carmen de Andacollo, según sus características de alteración-mineralización, se puede clasificar como un depósito híbrido, dado que, en su parte oriental, presenta características de depósitos pórfido cupríferos, mientras tanto, en su parte occidental, muestra rasgos de depósitos estratoligados o tipo manto (Araya et al., 2012).

3.2 Estratigrafía Distrital

3.2.1 Rocas Estratificadas

Formación Arqueros (Necomiano)

La Formación Arqueros, corresponde a la unidad estratigráfica más antigua del distrito minero Andacollo. Esta formación, aflora en la parte occidental del distrito (Figura 3.1; Reyes, 1991) y consiste de una secuencia de rocas volcánicas, de composición andesítica-basáltica, cuyo color varía de gris oscuro a pardo oscuro, presentando intercalaciones sedimentarias marinas, que comprenden principalmente calizas, areniscas y lutitas, de colores ocre, pardo anaranjado y verde (Emparan & Pineda, 2006). En el distrito minero Andacollo, la formación está dominada por brechas volcánicas y calizas, cuyas brechas, se constituyen de bloques angulares y una matriz rica en arcilla (Müller, 1986). La Formación Arqueros, no ostenta base expuesta y subyace a la Formación Quebrada Marquesa, a través de un sistema de fallas de relevo, conformado por las fallas El Álamo y El Cobre (Emparan & Pineda, 2006).

Formación Quebrada Marquesa (Hauteriviano – Albiano Temprano)

La Formación Quebrada Marquesa, abarca casi la totalidad del distrito minero Andacollo. Posee un rumbo NS, con manteos de 30°E, en los sectores de Toro y Socorro y de 10°E, en el sector de Tres Perlas (Figura 3.1; Reyes, 1991). La formación, consiste de una secuencia de flujo rítmico, cuya composición varía entre andesítica, dacítica y riolítica (Reyes, 1991), presentando una unidad heterogénea en la parte superior, que comprende principalmente calizas, brechas, conglomerados y flujos andesíticos (Müller, 1986). La Formación Quebrada Marquesa, está intruida por el intrusivo de Tablalalume y sobreyace a la Formación Arqueros, mediante un sistema de fallas de relevo (Emparan & Pineda, 2006).

La Formación Quebrada Marquesa, se distribuye en 6 miembros, donde dos de ellos, el miembro Cerro Toro y el miembro Andacollo, comprenden las rocas que hospedan la principal mineralización de Au y Cu del distrito minero Andacollo (Llaumett, 1983; Müller, 1986). El miembro Cerro Toro, está conformado por cuatro unidades volcánicas rítmicas, donde cada una de las cuales, comienza con andesitas oscuras, seguidas de flujos volcánicos dacíticos, brechas de flujo andesíticas o capas delgadas de riolita (Llaumett, 1983; Müller, 1986). El miembro Andacollo, sobreyace al miembro Cerro Toro y consiste de una secuencia de andesitas, dacitas y brechas de flujo andesíticas (Llaumett, 1983; Müller, 1986).

3.2.2 Intrusivos

Todas las rocas intrusivas del distrito minero Andacollo, forman parte de un gran cuerpo batolítico, que aflora a lo largo de 50 km en dirección NS (Reyes, 1991). Este batolito, corresponde al intrusivo de Tablalalume.

Intrusivo de Tablalalume (Cretácico Inferior Tardío)

Corresponde a un batolito compuesto por rocas granodioríticas, tonalíticas y dioríticas, que se encuentra en el sector noreste del distrito minero Andacollo, cubriendo un área aproximada de 4 x 6 km² (Figura 3.1; Llaumett et al., 1975; Emparan & Pineda, 2006). En el centro del distrito, Llaumett et al. (1975), identifican un pórfido tonalítico de 2 km², mineralizado y alterado hidrotermalmente, denominado pórfido Carmen de Andacollo, el cual, estaría espacial y genéticamente relacionado con la mineralización presente en el distrito. Llaumett et al. mencionan que: “No se ha observado al pórfido Carmen de Andacollo intruyendo al intrusivo de Tablalalume, por otro lado, en ocasiones hay similitudes petrográficas.” (1975:60). Por ende, estos autores sugieren que, el pórfido Carmen de Andacollo podría ser una fase del intrusivo de Tablalalume.

El intrusivo de Tablalalume, presenta dos facies principales: a) diorita cuarcífera de anfíbol-biotita, expuesta tanto al norte como al sur del distrito minero Andacollo y b) granodiorita de anfíbol-biotita, expuesta solo al norte del distrito (Emparan & Pineda, 2006). La facie b), presenta una edad U-Pb en circón de 103,3±0,9 Ma, que correspondería a la etapa de cristalización del intrusivo (Emparan & Pineda, 2006). Este batolito, intruye las rocas de la Formación Quebrada Marquesa y representa un evento intrusivo anterior al emplazamiento final de aquella secuencia estratigráfica (Oyarzun et al., 1996).

Intrusivos Occidentales vs Orientales

Llaumett et al. (1975), señalan que al oeste de la falla Andacollo, las intrusiones ocurren como apófisis (parte saliente o cúpula de un batolito) y cuerpos alargados de textura porfírica, mientras que, al este de la misma falla, se encuentra el pórfido Carmen de Andacollo, el cual, exhibe una textura fanerítica-porfírica. Con base en lo anterior, estos autores plantean que los intrusivos occidentales, probablemente sean el resultado de intrusivos más cercanos a la superficie (con respecto al pórfido Carmen de Andacollo), cuyo origen se deba a un plutón félsico localizado bajo el yacimiento en profundidad, presentando características mineralógicas y texturales similares al pórfido Carmen de Andacollo.

3.3 Estructuras y Lineamientos

3.3.1 Evolución Estructural del Distrito Minero Andacollo

La evolución tectónica del distrito minero Andacollo, da inicio en el Triásico, donde un proceso de subducción (Parra & Yañez, 1988) con dirección hacia el E, dio lugar a estructuras regionales sinestrales de rumbo N60°W, las cuales, hasta el día de hoy están presentes (Nilo et al., 2015). Una vez finalizado el proceso de subducción, la descompresión posterior, originó estructuras extensionales de dirección NS (Caddey & Ponce, 2004).

Durante el periodo comprendido entre el Jurásico y el Cretácico Inferior, se formó un par arco-cuenca, caracterizado por eventos de intenso volcanismo y sedimentación, a partir de los cuales, se moldearon las formaciones que conforman el distrito minero Andacollo (Nilo et al., 2015). Posteriormente, entre el Aptiano y el Albiano, se produjo una variación en la dirección de subducción, que generó un nuevo régimen compresivo de rumbo N30°W, ocasionando la reactivación de las estructuras sinestrales (Sistema de fallas El Álamo-Andacollo; Nilo et al., 2015).

Entre el Albiano y el Cenomaniano, se desarrolló un periodo extensional en el distrito, que concluye con el emplazamiento del intrusivo de Tablalalume (Nilo et al., 2015). Poco después, producto de un régimen transpresivo sinistral de dirección N60°W y con subducción oblicua, se formó un sistema de fallas sinestrales de rumbo N30°W (Nilo et al., 2015).

Durante el Campaniano, se llevó a cabo un periodo compresivo de orientación EW (Emparan & Pineda, 2006), que originó un sistema de fallas de rumbo de dirección NE (Sistema de fallas La Caldera-El Toro), el cual, dada su temporalidad, corresponde al sistema de fallas mejor preservado del distrito (Nilo et al., 2015).

En el principio del Mioceno, comienza un proceso de horizontalización en la placa de Nazca, que conlleva a un importante cambio en el régimen de subducción (Nilo et al., 2015), provocando así, una intensa compresión en la corteza continental (Pardo et al., 2000), lo cual, se asocia a movimientos compresivos en el sistema de fallas NE desarrollado en el Campaniano (Nilo et al., 2015).

3.3.2 Estructuras Locales

A continuación, se describen los principales sistemas de fallas presentes en la mina Carmen de Andacollo, según Nilo et al. (2015). Las fallas se pueden observar en la Figura 3.2.

Sistema de Fallas Andacollo-Central-Hermosa

Presenta rumbo NS y manteos que van desde los 70° a 80°W, con potencias oscilando entre métricas (falla Hermosa) y decamétricas (falla Andacollo). Este sistema, forma parte del sistema estructural El Álamo-Andacollo, el cual, se desarrolló como resultado de los procesos compresivos del Aptiano-Albiano. Se plantea que, el sistema de fallas Andacollo-Central-Hermosa, estaría asociado con la mineralización principal del distrito minero Andacollo, dado que, habría permitido la intrusión de los diques de pórfidos mineralizados y la génesis de la mayoría de las vetas auríferas.

Sistema de Fallas Carmen-Stan-Twila

De rumbo N60°W y manteos entre los 70° y 85°S, con potencias variando desde decimétricas (falla Stan) a decamétricas (falla Twila, donde se observa salbanda de orden métrico). Este sistema, forma parte del sistema de fallas sinestras, el cual, se originó como resultado del régimen transpresivo sinestral, durante el Albiano-Cenomaniano. Se plantea que, la compresión del sistema de fallas Andacollo-Central-Hermosa, habría provocado el desarrollo extensional del sistema de fallas Carmen-Stan-Twila.

Sistema de Fallas El Churque-El Toro

Presenta un rumbo que oscila entre N30°-40°E, manteos que van desde los 70° a 85°N y potencias métricas. Se caracteriza como un conjunto de fallas de rumbo, con una extensión hacia el NW. Corresponde al sistema más tardío del yacimiento Carmen de Andacollo, de manera que, corta a todos los sistemas de fallas y los deforma con movimiento normal dextral. Este sistema, forma parte del sistema estructural La Caldera-El Toro, el cual, se desarrolló como resultado de los procesos compresivos del Campaniano, en un periodo posterior a la mineralización. El sistema de fallas El Churque-El Toro, muestra un fuerte control posicional de los bloques mineralizados, dado que, a través de los planos de falla, pone en contacto rocas con alteración-mineralización hipógena, con rocas afectadas por procesos supérgenos, es decir, movimientos verticales de cientos de metros.

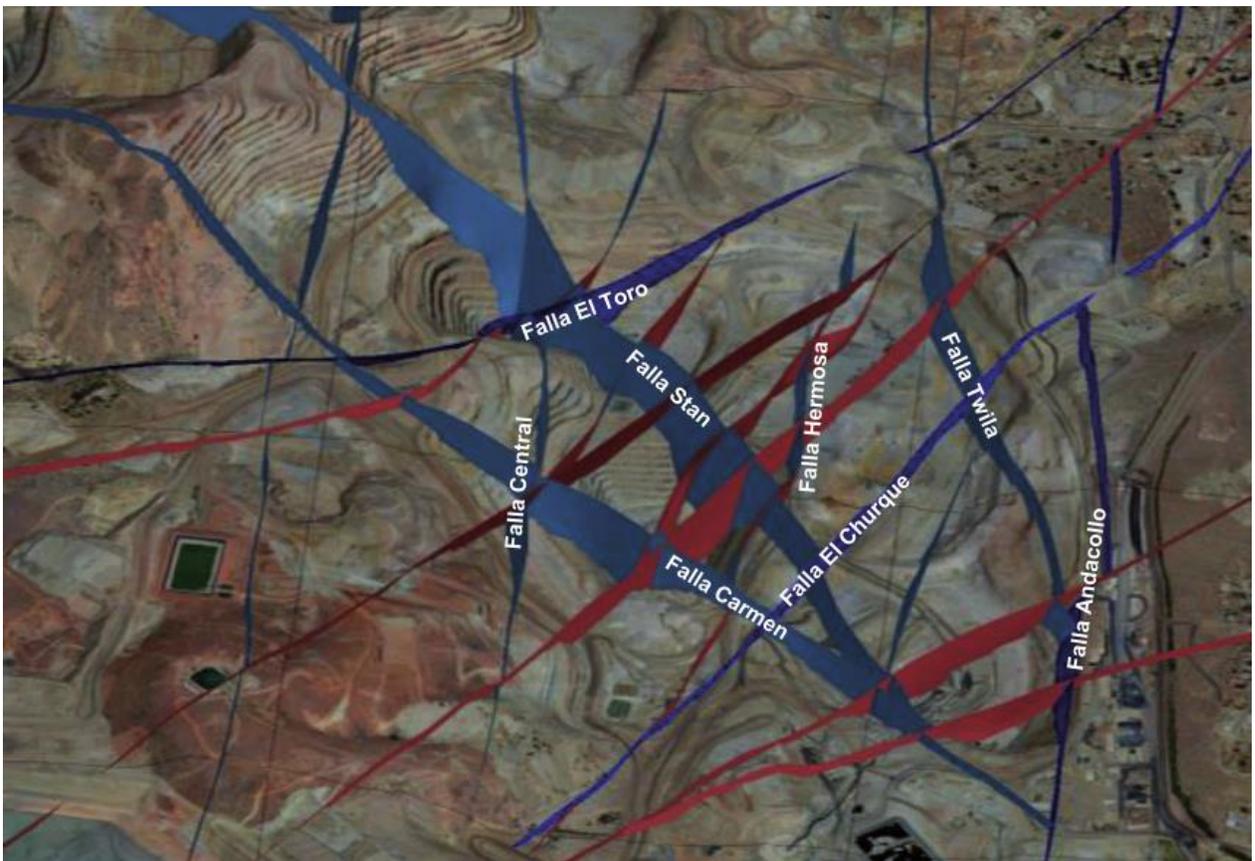


Figura 3.2: Fallas principales del yacimiento Carmen de Andacollo. Extraído de Nilo et al. (2015).

3.4 Alteración Hidrotermal del Yacimiento Carmen de Andacollo

A partir del estudio de sondajes, mapeos geológicos y labores subterráneas, Llaumett et al. (1975), caracterizaron los principales minerales de alteración, asociados a la alteración hidrotermal del yacimiento Carmen de Andacollo (Figura 3.1), la cual, se desarrolla preferentemente en rocas volcánicas andesíticas (Llaumett et al., 1975). Estos autores, dividen la alteración hidrotermal, en hipógena y supérgena.

3.4.1 Alteración Hipógena

En función de la presencia, abundancia y distribución de los minerales de alteración, Llaumett et al. (1975), subdividen la alteración hipógena, en las siguientes asociaciones minerales: (1) biotita-feldespato potásico, (2) feldespato potásico-cuarzo-sericita y (3) cuarzo-sericita.

Biotita-Feldespato Potásico (Zona de Alteración Potásica)

Esta asociación mineral, se desarrolla en las zonas más profundas del yacimiento, donde la roca alterada, se caracteriza por sus colores grisáceos, con tonalidades pardas a verdosas y una leve pigmentación de su masa fundamental (Llaumett et al., 1975). La biotita, suele presentar un color verde parduzco y comúnmente ocurre de forma diseminada, abarcando entre un 50 a 90% de la masa fundamental, donde normalmente se presenta junto con feldespato potásico y cuarzo intersticial (Llaumett et al., 1975). Los fenocristales de feldespato potásico, no han sufrido procesos de reemplazo y se observan intactos sobre la masa fundamental (Llaumett et al., 1975). El rutilo, típicamente se encuentra asociado con biotita y otros minerales ferromagnesianos (Llaumett et al., 1975). Además, son frecuentes las vetillas de cuarzo y clorita, con halos de feldespato potásico (Llaumett et al., 1975).

Feldespato Potásico-Cuarzo-Sericita (Zona de Transición Potásica-Fílica)

Se presenta a profundidades intermedias, dando paso a la zona de alteración potásica en profundidad y a la zona de alteración fílica en las partes poco profundas (Llaumett et al., 1975). Las rocas alteradas por esta asociación mineral, muestran un color gris blanquizco y se caracterizan por estar parcialmente obliteradas (Llaumett et al., 1975). La alteración, se exhibe como un mosaico conformado por granos de cuarzo, feldespato potásico y sericita, cuya proporción mineralógica es la siguiente: cuarzo 30-50%, feldespato potásico 30-40% y sericita 10-30% (Llaumett et al., 1975). De vez en cuando, se presentan vetillas de feldespato potásico y sericita (Llaumett et al., 1975).

Cuarzo-Sericita (Zona de Alteración Fílica)

Esta zona de alteración, se localiza en las partes poco profundas del yacimiento y se encuentra alrededor de la zona de transición potásica-fílica (Llaumett et al., 1975). La alteración que afecta las rocas, es muy pervasiva y corresponde a un mosaico conformado por granos de cuarzo y sericita (Llaumett et al., 1975). El feldespato potásico, está completamente reemplazado por sericita y abundante cuarzo (Llaumett et al., 1975). Es característica la presencia de vetillas de cuarzo y sericita, con halos sericíticos intensos (Llaumett et al., 1975).

3.4.2 Alteración Supérgena

La alteración supérgena, sobreyace a la alteración hipógena y se encuentra en las partes superficiales del yacimiento. Corresponde a una zona limonitizada de color blanquecino, que abarca un área de 5 x 0.6-3 km² (Llaumett et al., 1975). Las soluciones ácidas, producto de la oxidación de grandes cantidades de pirita, desarrollaron una fuerte zona de lixiviación, caracterizada por rocas limonitizadas de colores blanco, amarillo, rojo y marrón (Llaumett et al., 1975). En la zona de alteración supérgena, típicamente se observan productos de alteración silíceo, jasperioides (reemplazo silíceo de la roca huésped) y zonas con alteración argílica (Llaumett et al., 1975).

3.5 Mineralización del Yacimiento Carmen de Andacollo

El yacimiento Carmen de Andacollo, contiene reservas minerales probadas y probables de 1 Mt a 0.19% Cu (lixiviación en pilas) y 301.5 Mt a 0.31% Cu y 0.1 g/t Au (molino), y recursos minerales adicionales de 9.3 Mt a 0.38% Cu (lixiviación en pilas, medido), 27.8 Mt a 0.15% Cu (lixiviación en pilas, indicado), 41.9 Mt a 0.29% Cu y 0.11 g/t Au (molino, medido), 303.7 Mt a 0.25% Cu y 0.09 g/t Au (molino, indicado) y 60.7 Mt a 0.25% Cu y 0.08 g/t Au (molino, inferido; Teck Resources Limited, 2021).

La mineralización, se distribuye en un área aproximadamente circular de 1.5 x 1.25 km², que está cortada por la falla Andacollo, en su parte oriental (Figura 3.1; Llaumett et al., 1975). La mineralización, normalmente ocurre de forma diseminada y se hospeda en un 85% en rocas volcánicas alteradas (Llaumett et al., 1975). Llaumett et al. (1975), lograron distinguir una zona de lixiviación levemente mineralizada, una zona de enriquecimiento secundario y una zona de mineralización primaria (Figura 3.3).

3.5.1 Zona de Lixiviación

Se encuentra a profundidades someras, comúnmente por debajo de las gravas aluviales, presentando un espesor promedio que alcanza los 30 m (Figura 3.3; Llaumett et al., 1975). Esta zona, se constituye de abundantes limonitas y ostenta una ley promedio de 0.07% Cu (Llaumett et al., 1975). En algunos sectores de la zona de lixiviación, se hallan restos de vetillas de calcosina rodeadas por minerales de óxido, los cuales, según Llaumett et al. (1975), serían la evidencia de un primer evento de enriquecimiento, cuya meteorización, habría proporcionado mineral para la zona de enriquecimiento secundario.

3.5.2 Zona de Enriquecimiento Secundario

Subyace a la zona de lixiviación, mediante un contacto que suele ser repentino y sobreyace a la zona de mineralización primaria, a través de un contacto que generalmente es gradual, alcanzando una potencia media de 40 m (Figura 3.3; Llaumett et al., 1975). La zona de enriquecimiento secundario, corresponde a la principal zona de mena del yacimiento, caracterizándose por la presencia de pirita, calcosina y calcopirita, con cantidades variables de hematita, magnetita y rutilo, y cantidades menores de covelina, molibdenita y tetraedrita; mostrando leyes que varían entre 0.6 y 1.5% Cu (Llaumett et al., 1975). Además, se incluyen minerales como cuprita, calcotriquita (variedad de la cuprita), malaquita, crisocola y chalcantita, este último, producido por la acción del agua subterránea y presentándose como capas azules sobre las paredes de faenas subterráneas (Llaumett et al., 1975).

La calcosina, se compone principalmente de la fase djurleita ($\text{Cu}_{1.97}\text{S}$; Córdova, 1973) y típicamente ocurre como reemplazo de la pirita y calcopirita, exhibiéndose en los bordes y fracturas de estos minerales, o como finos recubrimientos en vetillas de pirita (Llaumett et al., 1975). La calcopirita, comúnmente ocurre como granos individuales, aunque también suele presentarse como inclusiones globulares en la pirita (Llaumett et al., 1975). La covelina, se forma debido a procesos de post enriquecimiento, ocurriendo como producto de reemplazo y oxidación de la calcosina y calcopirita (Llaumett et al., 1975). En general, la pirita se halla reemplazada por calcosina y covelina, tanto en vetillas de 0.2 a 20 mm de espesor, como en su forma diseminada (Llaumett et al., 1975). Los sulfuros previamente mencionados, se distribuyen de la siguiente manera: pirita 80%, calcosina 12%, calcopirita 6% y covelina 2%; cuyos sulfuros de Cu, muestran la siguiente proporción: calcosina 55%, calcopirita 35% y covelina 10% (Llaumett et al., 1975).

3.5.3 Zona de Mineralización Primaria

Se encuentra bajo la zona de enriquecimiento secundario, extendiéndose hasta unos 100 m por debajo de esta zona (Figura 3.3; Llaumett et al., 1975). La zona de mineralización primaria, se constituye principalmente de pirita y calcopirita, contemplando leyes que oscilan entre 0.3 y 0.8%

Cu (Llaumett et al., 1975). Además, se presentan cantidades variables de hematita, cantidades subordinadas de magnetita y rutilo, y cantidades menores de bornita, molibdenita, pirrotina y cubanita (Llaumett et al., 1975).

La calcopirita, suele ocurrir de dos maneras: (1) como inclusiones gotiformes en la pirita, en paragénesis con pirrotina y/o cubanita y (2) como cristales individuales de forma anhedral; representando así, dos eventos de mineralización, siendo la segunda manera de ocurrencia, posterior, más abundante y, en consecuencia, más fundamental en la mineralización cuprífera (Llaumett et al., 1975). La pirita, es por lejos el sulfuro más abundante y comúnmente se halla diseminada o en vetillas de 0.2 a 30 mm de espesor (Llaumett et al., 1975). La hematita y la magnetita, generalmente aparecen juntas y de forma diseminada, donde la hematita, normalmente exhibe inclusiones de calcopirita (Llaumett et al., 1975). El rutilo, normalmente ocurre de forma granular o prismática y frecuentemente se observa asociado a biotita secundaria (Llaumett et al., 1975). La bornita, es escasa y ocurre como exsolución de la calcopirita (Llaumett et al., 1975). La molibdenita, se presenta como vetillas discontinuas de 1 a 2 cm de espesor y de vez en cuando, se encuentra junto a cuarzo y sericita (Llaumett et al., 1975).

El núcleo de la zona de mineralización primaria, se caracteriza por la asociación pirita-calcopirita-hematita±magnetita, la cual, ostenta las leyes más altas de Cu y Mo, con una razón pirita:calcopirita que varía entre 1:1 y 4:1 (Llaumett et al., 1975). Alrededor del núcleo de mineralización primaria, se presenta la asociación pirita-calcopirita, cuyas leyes de Cu y Mo son menores y las razones de pirita:calcopirita son mayores, oscilando entre 4:1 y 9:1 (Llaumett et al., 1975). La zona externa de la zona de mineralización primaria, se identifica por su abundancia de pirita y escasez de calcopirita, mostrando razones de pirita:calcopirita que van desde 9:1, alcanzando valores superiores a 20:1 (Llaumett et al., 1975).

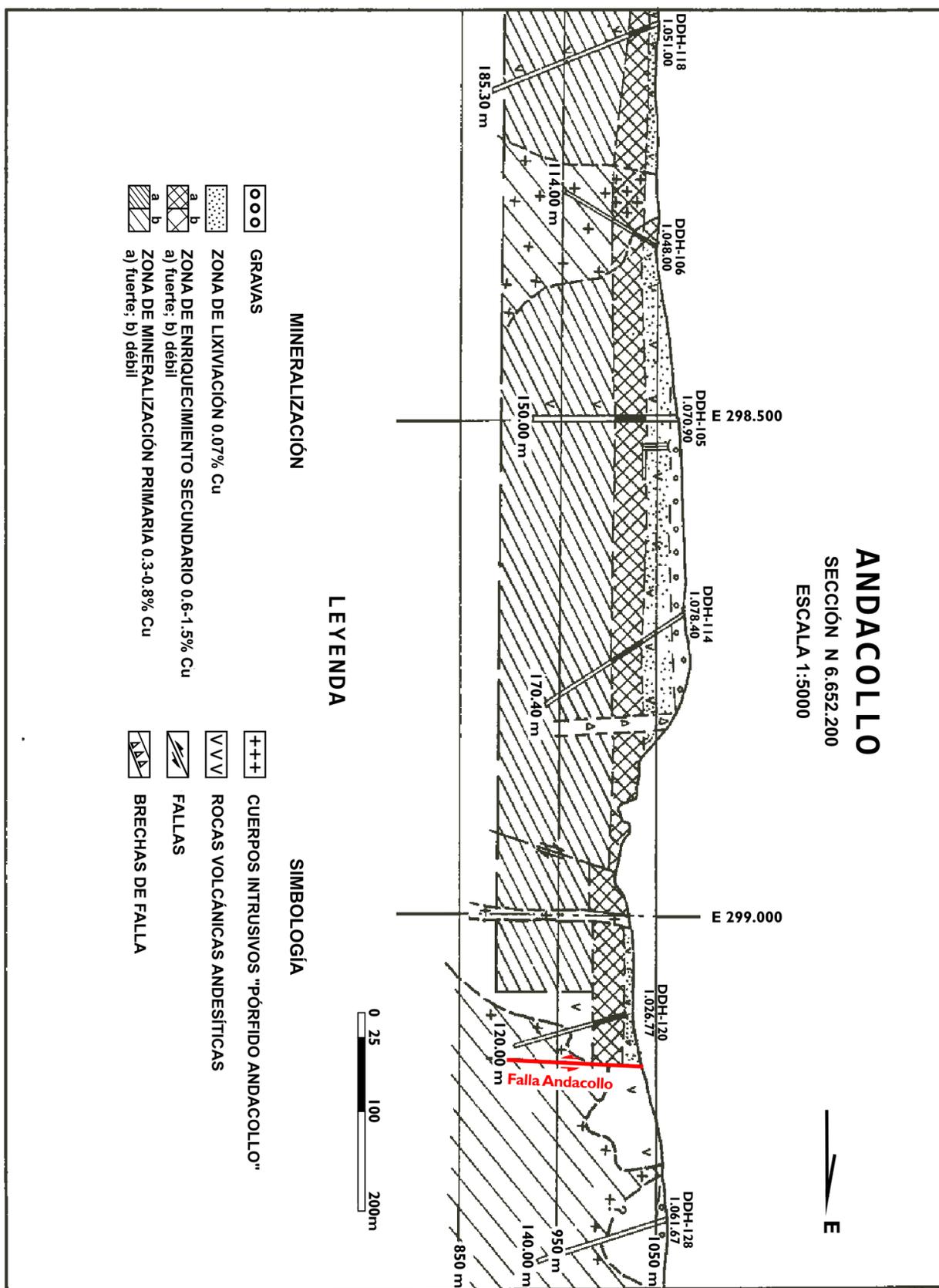


Figura 3.3: Perfil supérgeno del yacimiento Carmen de Andacollo. Extraído de Llaumett et al. (1975).

4. METODOLOGÍA

El trabajo, se realiza a partir de muestras de sondaje extraídas y proporcionadas por Teck Resources Chile Limitada, en el yacimiento Carmen de Andacollo, por lo tanto, no fue necesaria una campaña de terreno.

4.1 Preparación de *Quickplates*

Las muestras, son enviadas al laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, con el fin de elaborar *quickplates*, cortes transparentes con espesores entre los 70 y 100 μm , con un bajo trabajo de desgaste, por lo que se deben revestir con una gota de aceite de inmersión, con un índice de refracción cercano al del mineral huésped que atrapó las inclusiones fluidas que se quieren estudiar. En el presente estudio, el mineral huésped corresponde a cuarzo, por ello, se utiliza un aceite de inmersión estándar, con un índice de refracción cercano al de este mineral ($n = 1.51$). Sobre el aceite, se coloca un cubreobjeto de vidrio de 24 x 40 mm, el cual, esparce el aceite y genera una capa delgada entre la muestra y el cubreobjeto, permitiendo así, la visualización de las inclusiones fluidas al homogenizar el relieve del cuarzo.

La técnica de preparación de *quickplates*, fue elaborada y descrita por Goldstein & Reynolds (1994), la cual, se detalla a continuación. En primer lugar, se selecciona un área de 21 x 35 mm, en una cara plana fresca de la muestra de interés. Idealmente, esta área debe ser perpendicular a la pared de la vetilla, con el fin de estudiar la temporalidad de la mineralización. Luego, se procede a cortar el área de interés, utilizando una sierra con disco de corte diamantada y enfriada por agua, con el objetivo de obtener una caluga o paralelepípedo de roca, con dimensiones ideales de 21 x 35 x 15 mm. A continuación, se debe desgastar la superficie de interés con carburo de silicio en polvo (grano 120), con la finalidad de obtener una superficie completamente plana y uniforme, eliminando toda irregularidad. Después, se sumerge la caluga en un baño ultrasónico, inmersa en agua por 1 minuto, para eliminar los residuos de carburo de silicio e impurezas remanentes en la muestra. Posteriormente, utilizando resina, se adhiere un portaobjeto de vidrio previamente desgastado con carburo de silicio, a la caluga. Una vez adherido el portaobjeto y

secada la resina, se corta la caluga de forma paralela al portaobjeto de vidrio, dejando un grosor ideal inferior a 1 mm. Finalmente, se desgasta la superficie de roca expuesta con carburo de silicio, hasta obtener un espesor aproximado entre los 70 y 100 μm . Una vez logrado este paso, se limpia el corte con un baño ultrasónico de 1 minuto.

Del proceso de fabricación mencionado previamente, se obtuvieron 66 *quickplates*, a los cuales, se les realizó petrografía de inclusiones fluidas.

4.2 Petrografía de Inclusiones Fluidas

El estudio petrográfico de inclusiones fluidas, se realizó en el microscopio óptico Olympus BX53 (Figura 4.1), perteneciente al Departamento de Geología (FONDEQUIP EQM140009 “Microtermometría de Inclusiones Fluidas”) de la Universidad de Chile y ubicado en el Laboratorio de Inclusiones Fluidas y Vítreas.

El procedimiento, consistió en observar y describir detalladamente los *quickplates* ya fabricados, labor que se enfocó, en primer lugar, en la caracterización de vetillas, con base en la clasificación de vetillas de Gustafson & Hunt (1975; ver capítulo 2.1.6) y, posteriormente, en la caracterización de las inclusiones fluidas contenidas en los cristales de cuarzo de las vetillas previamente caracterizadas. Esto, con el objetivo de obtener una relación en el espacio-tiempo de la composición de los fluidos contenidos en las inclusiones fluidas.

La caracterización de vetillas, se realizó principalmente con base en la mineralogía (ganga y mena), la presencia y tipo de halo, y la relación temporal relativa entre ellas. Es importante mencionar que, solo se caracterizaron vetillas con contenidos de cuarzo, dado que corresponde al mineral huésped ideal para llevar a cabo una correcta petrografía de inclusiones fluidas.

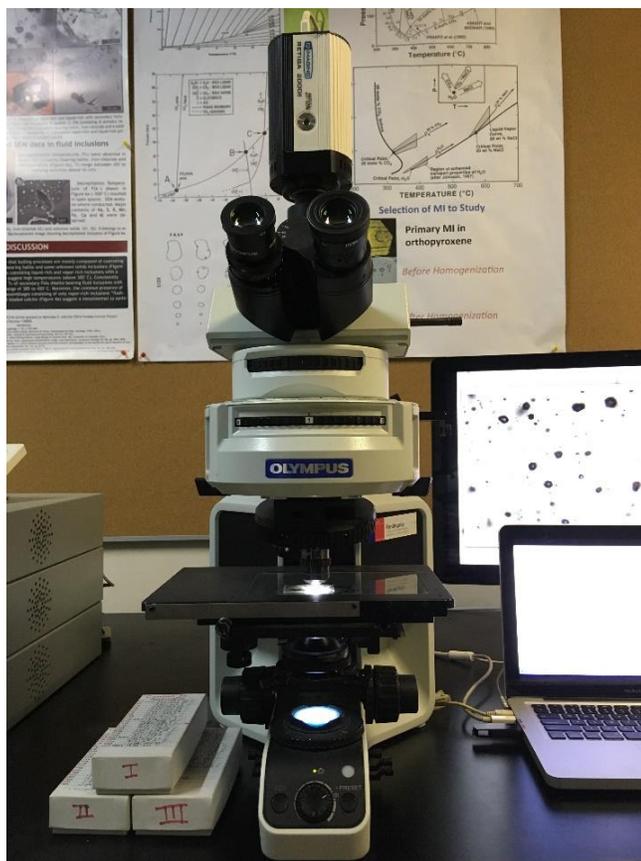


Figura 4.1: Microscopio óptico Olympus BX53.

Debido a que las características que permiten distinguir genéticamente a las inclusiones fluidas, son muy ambiguas y dependientes de la forma cristalina del mineral, las inclusiones fluidas, solo se caracterizaron descriptivamente, es decir, según la relación de fases presentes a temperatura ambiente. Para ello, primeramente, se identificaron arreglos de inclusiones fluidas (FIAs), y de acuerdo al estado de las inclusiones que los conformaban, se determinaba si el FIA era viable para la caracterización. Si el FIA contenía inclusiones sin indicios de decrepitación y con tamaños adecuados para la descripción petrográfica, se proseguía con la caracterización de las inclusiones fluidas. Dada la importancia de la ebullición como mecanismo eficaz para la precipitación de Cu (Drummond & Ohmoto, 1985; Henley & Brown, 1985) y de acuerdo al modelo de Becker et al. (2019; ver capítulo 2.3), se establece la búsqueda de 5 tipos de FIAs:

Tipo L+V: Inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor, atrapadas en el campo bifásico líquido + vapor e indicando una clara evidencia de ebullición.

Tipo L_{H+V}: Inclusiones ricas en líquido saturadas en halita coexistiendo con inclusiones ricas en vapor, atrapadas en el campo bifásico líquido + vapor e indicando una clara evidencia de ebullición. Las inclusiones ricas en vapor, presentan entre un 75 y 95% de fase vapor.

Tipo V_H: Inclusiones ricas en vapor saturadas en halita, atrapadas en el campo monofásico de vapor saturado en halita e indicando una clara evidencia de ebullición intensa o *flashing*. Estas inclusiones contienen ~100% de fase vapor.

Tipo V: Inclusiones ricas en vapor, atrapadas en el campo monofásico de vapor e indicando una clara evidencia de ebullición intensa o *flashing*. Estas inclusiones, se componen entre un 55 a 75% de fase vapor.

Tipo L: Inclusiones ricas en líquido, atrapadas en el campo monofásico líquido. Dado que este tipo es el más común, no será considerado en la estadística.

Además, se establece la búsqueda de otros dos tipos de FIAs, en función de su mineral hijo:

Tipo Cp: Inclusiones con precipitación de calcopirita; las cuales, al asociarse a etapas tempranas, serían el reflejo de la fase acuosa monofásica que se exsolvió del magma, conforme con Becker et al. (2019). En consecuencia, las inclusiones tipo Cp, serían un indicador de fluidos ricos en Cu, S y otros componentes mineralizadores.

Tipo H: Inclusiones con precipitación de halita, atrapadas ya sea en el campo bifásico líquido + vapor o en el campo monofásico de vapor saturado en halita. Las inclusiones tipo H, indican fluidos de alta salinidad, estrechamente asociados con la zona mineral, en depósitos pórfido de Cu (Roedder & Bodnar, 1997).

4.3 Modelamiento 3D: *Software* Asgard

Con los datos obtenidos a partir de la petrografía de inclusiones fluidas, se utilizó el *software* Asgard para modelar y correlacionar toda la información obtenida, con el fin de establecer vectores hacia la mineralización cuprífera.

El *software* Asgard, corresponde a una herramienta de modelado minero desarrollada por CODE MINING, empresa especializada en el desarrollo de *softwares* de minería. A partir de sondajes compositados, esta herramienta permite realizar un estudio exploratorio de datos y generar una representación tridimensional de los sondajes. En consecuencia, el modelamiento 3D, entrega una visualización de la variación espacial, en las características de las inclusiones fluidas.

5. RESULTADOS

5.1 Petrografía de Inclusiones Fluidas

5.1.1 Caracterización de Vetillas

De un total de 66 muestras analizadas petrográficamente, 43 (65%) de ellas evidenciaban vetillas A, 30 (45%) muestras exhibían vetillas B y 13 (20%) presentaban vetillas D. El detalle de los resultados se presenta en la sección de anexos. A continuación, se describen las principales características de los tres tipos de vetillas encontrados durante el análisis petrográfico.

Vetillas A. Corresponden a las vetillas más abundantes, presentes en el 65% de las muestras analizadas (Figura 5.1). Las vetillas A, presentaban mineralización y se caracterizaban por la abundante presencia de cuarzo granular, mostrando oquedades en algunas vetillas, con cantidades importantes de calcopirita, pirita y magnetita, y cantidades menores de molibdenita, anhidrita, feldespatos potásico y clorita. Los halos de feldespatos potásico eran comunes. Estas vetillas, solían presentar formas sinuosas e irregulares, sin embargo, formas regulares con límites rectos y paralelos también eran frecuentes. Con respecto a las inclusiones fluidas, las vetillas A, son las que albergan la mayoría de los FIAs (65%), dentro de los cuales, los más abundantes son el tipo L+V (70%), seguido por el tipo H (63%) y el tipo V (33%; Tabla 5.1).

Vetillas B. Se encuentran en casi la mitad (45%) de las muestras analizadas (Figura 5.2). Las vetillas B, presentaban mineralización y se caracterizaban por mostrar grandes cantidades de cuarzo granular, molibdenita generalmente en los bordes y calcopirita principalmente de forma disseminada, con cantidades menores de anhidrita, pirita y clorita, y trazas de bornita y magnetita. No presentaban halos de alteración. En general, mostraban formas planares con límites rectos y paralelos, no obstante, formas sinuosas y con bandeamiento también estaban presentes. En relación a las inclusiones fluidas, las vetillas B, alojan el 45% de los FIAs, siendo los más abundantes los tipos L+V y H (ambos con un 73%), seguidos por los tipos V y Cp (ambos con un 23%; Tabla 5.1).

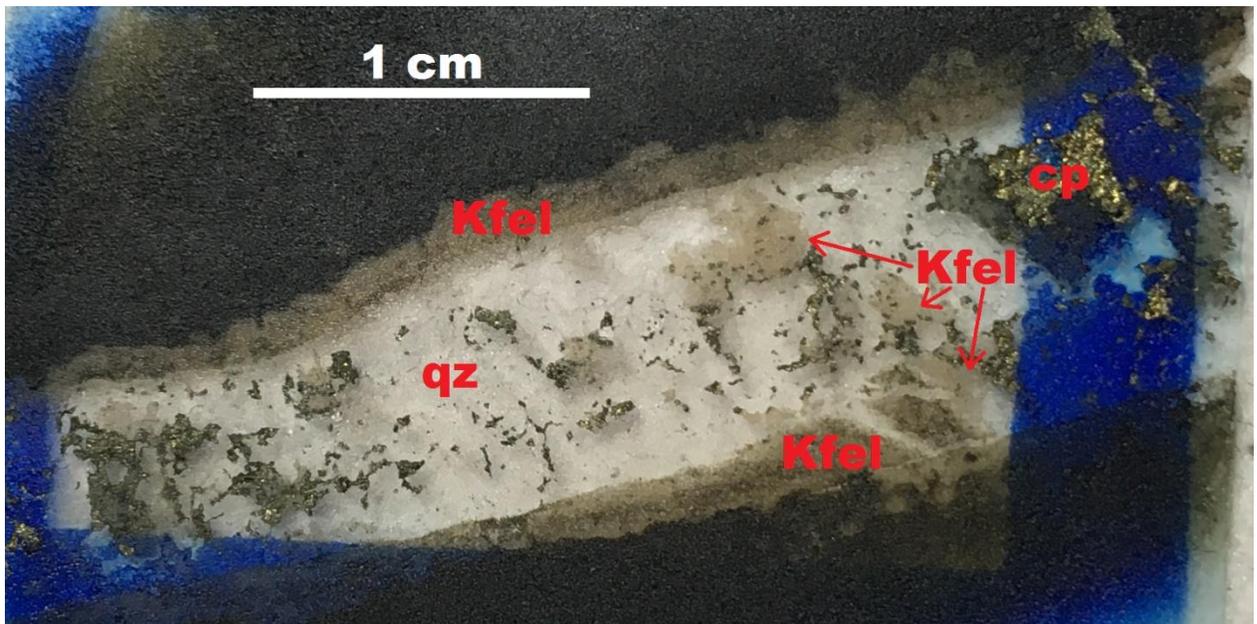


Figura 5.1: Vetilla A con abundante cuarzo (qz), calcopirita (cp) diseminada y feldespato potásico (Kfel). También presenta un halo de feldespato potásico. Muestra DDH1234/580.95.

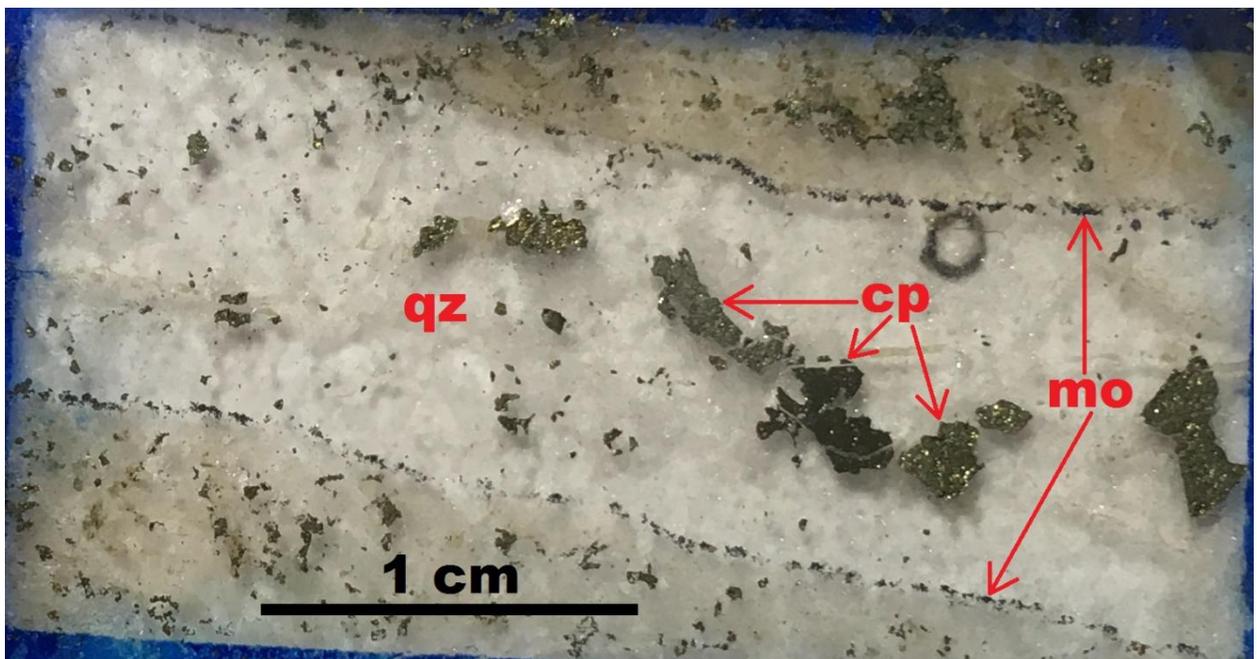


Figura 5.2: Vetilla B con abundante cuarzo (qz), calcopirita (cp) diseminada y molibdenita (mo) en los bordes. Muestra DDH1234/588.95.

Vetillas D. Corresponden a las vetillas más escasas, presentes en el 20% de las muestras analizadas (Figura 5.3). Las vetillas D, no presentaban mineralización y se caracterizaban principalmente por las grandes cantidades de pirita, con cantidades menores de cuarzo, clorita, calcopirita y sericita. Los halos de sericita eran característicos. Estas vetillas, solían presentar formas muy regulares, con límites más rectos y paralelos que las vetillas A y B. En cuanto a las inclusiones fluidas, las vetillas D, son las que albergan la menor cantidad de FIAs (20%), dentro de los cuales, los más abundantes son el tipo H (69%), continuado por el tipo L+V (62%) y el tipo Cp (31%; Tabla 5.1).

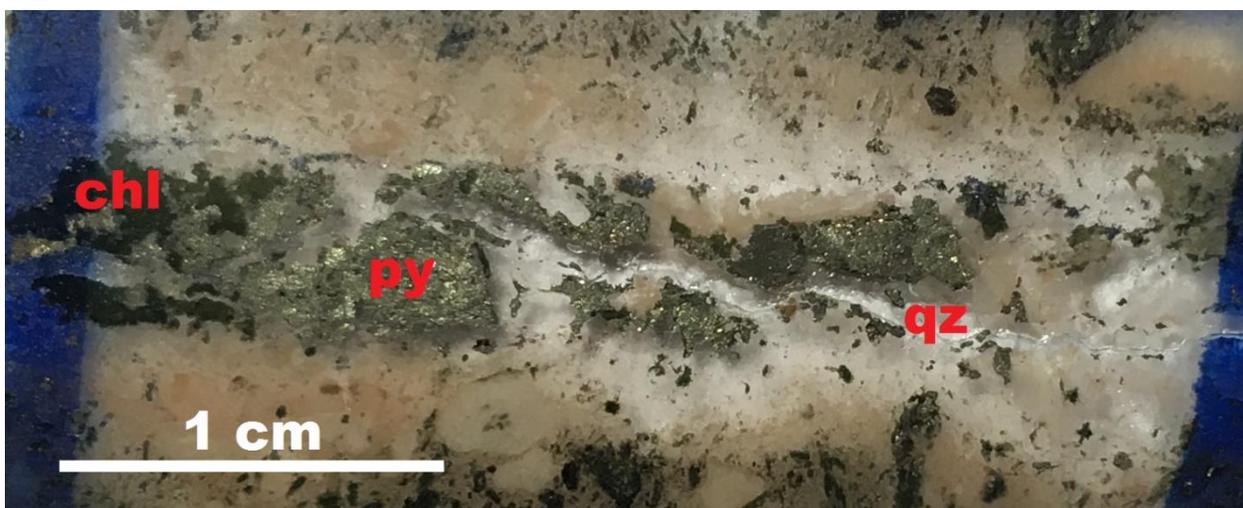


Figura 5.3: Vetilla D con abundante pirita (py), alteración de clorita (chl) y cantidades menores de cuarzo (qz). Muestra DDH1234/357.2.

Tabla 5.1: Vetillas y sus porcentajes, con respecto al tipo de FIA que atraparon. En colores azul y rojo se señalan los mayores y menores porcentajes, respectivamente. El porcentaje de cada tipo de FIA fue calculado con respecto al número total de muestras correspondiente a cada vetilla.

	L+V	L _H +V	V _H	V	Cp	H
Vetilla A	70%	21%	16%	33%	26%	63%
Vetilla B	73%	13%	13%	23%	23%	73%
Vetilla D	62%	23%	15%	23%	31%	69%
Total	68%	18%	15%	26%	24%	64%

5.1.2 Caracterización de Inclusiones Fluidas

En general, las inclusiones fluidas se encontraban bien preservadas en la mayoría de las muestras. No obstante, dos muestras no presentaban arreglos de inclusiones fluidas (FIAs). Adicionalmente, en un número no menor de muestras, las inclusiones se hallaban frecuentemente decrepitadas y/o mostraban tamaños promedios inferiores al μm , lo cual, dificultó o hizo imposible su petrografía.

De un total de 66 muestras analizadas petrográficamente, 45 (68%) de ellas evidenciaban FIAs tipo L+V, 42 (64%) exhibían FIAs tipo H, 17 (26%) muestras presentaban FIAs tipo V, 16 (24%) mostraban FIAs tipo Cp, 12 (18%) muestras enseñaban FIAs tipo L_H+V y 10 (15%) presentaban FIAs tipo V_H. El detalle de los resultados se presenta en la sección de anexos. A continuación, se describen las principales características de los diferentes tipos de FIAs encontrados durante el análisis petrográfico.

Tipo L+V. Corresponde al tipo de arreglo más abundante (sin considerar el FIA tipo L), presente en el 68% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de ebullición, este tipo de FIA, se caracterizaba por la coexistencia de inclusiones ricas en líquido con inclusiones ricas en vapor (Figura 5.4). En general, las inclusiones presentaban formas ovaladas a esféricas, con superficies suaves y regulares, sin embargo, un número no menor, mostraba formas irregulares con bordes desiguales. En ciertos casos, algunas inclusiones ricas en líquido, exhibían precipitación tanto de halita y/o calcopirita, como de minerales opacos no identificados. En relación al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones ricas en líquido, presentaban entre un 23 y 36%, mientras que, las inclusiones ricas en vapor, mostraban entre un 69 y 92%. Los FIAs tipo L+V, fueron atrapados en su mayoría en vetillas A (67%) y vetillas B (49%), y en menor cantidad en vetillas D (18%; Tabla 5.2).

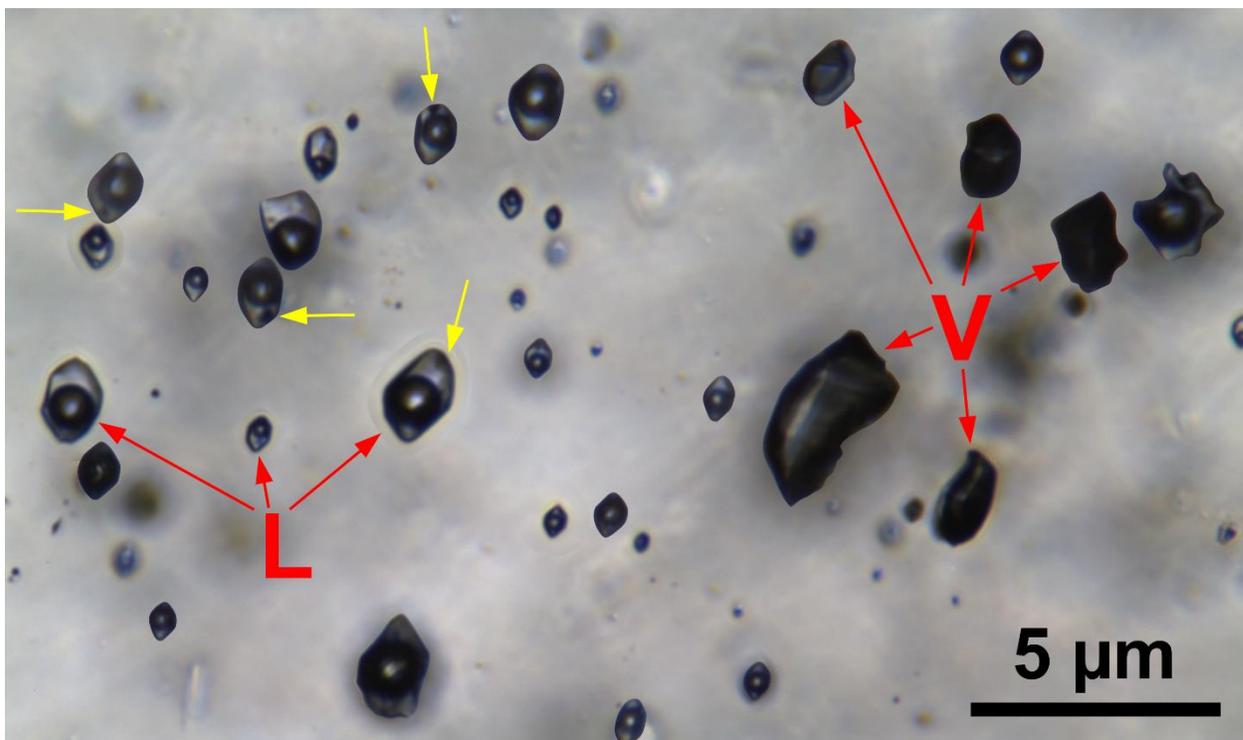


Figura 5.4: FIA tipo L+V: inclusiones ricas en líquido (L) coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (V). Con flechas color amarillo, se indican inclusiones con minerales opacos, posiblemente calcopirita. Muestra DDH1241/408.8, FIA 12-A.

Tipo L_H+V . Presente en el 18% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de ebullición de alta salinidad, este tipo de arreglo, se caracterizaba por la coexistencia de inclusiones ricas en líquido saturadas en halita con inclusiones ricas en vapor (Figura 5.5). Por lo común, las inclusiones ricas en vapor, presentaban formas ovaladas con bordes bien definidos, mientras que, las inclusiones con precipitación de halita, se caracterizaban por presentar formas cuadradas y rectangulares. No obstante, algunos arreglos mostraban inclusiones con formas irregulares. En ciertas ocasiones, las inclusiones con precipitación de halita, exhibían precipitación de calcopirita y/u otros minerales hijos no identificados. Con respecto al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones ricas en líquido saturadas en halita, presentaban entre un 12 y 18%, mientras que, las inclusiones ricas en vapor, mostraban entre un 72 y 95%. Los FIAs tipo L_H+V , fueron atrapados principalmente en vetillas A (75%) y en menor cantidad en vetillas B (33%) y vetillas D (25%; Tabla 5.2).

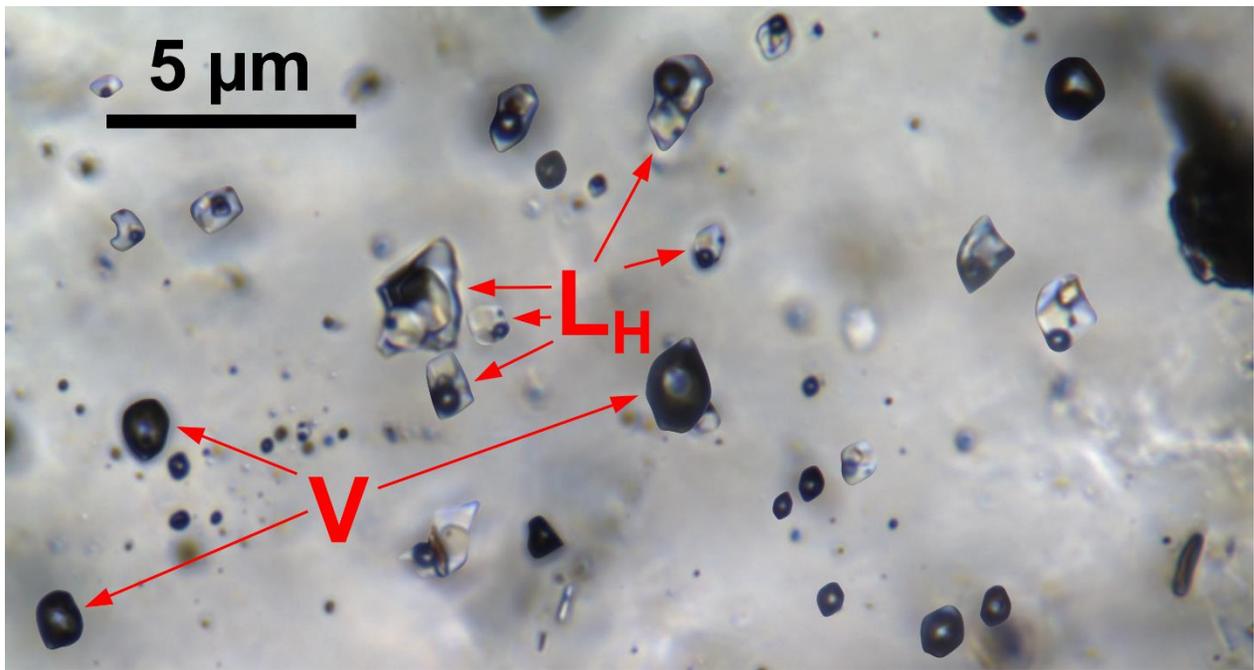


Figura 5.5: FIA tipo L_H+V : inclusiones ricas en líquido saturadas en halita (L_H) coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (V). La mayoría de las inclusiones con precipitación de halita, presentan más de un mineral hijo. Muestra DDH1241/408.8, FIA 17-A.

Tipo V_H . Corresponde al tipo de arreglo más escaso, presente en solo el 15% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de ebullición intensa o *flashing*, este tipo de FIA, se caracterizaba por tener inclusiones ricas en vapor saturadas en halita, con burbujas que ocupaban aproximadamente la totalidad de la inclusión (~100% de fase vapor; Figura 5.6). Habitualmente, las inclusiones presentaban formas esféricas a ovaladas, con superficies lisas y regulares, aunque un número no menor, mostraba superficies irregulares. En relación al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones presentaban entre un 91 y 100%. Los FIAs tipo V_H , fueron atrapados principalmente en vetillas A (70%) y en menor cantidad en vetillas B (40%) y vetillas D (20%; Tabla 5.2).

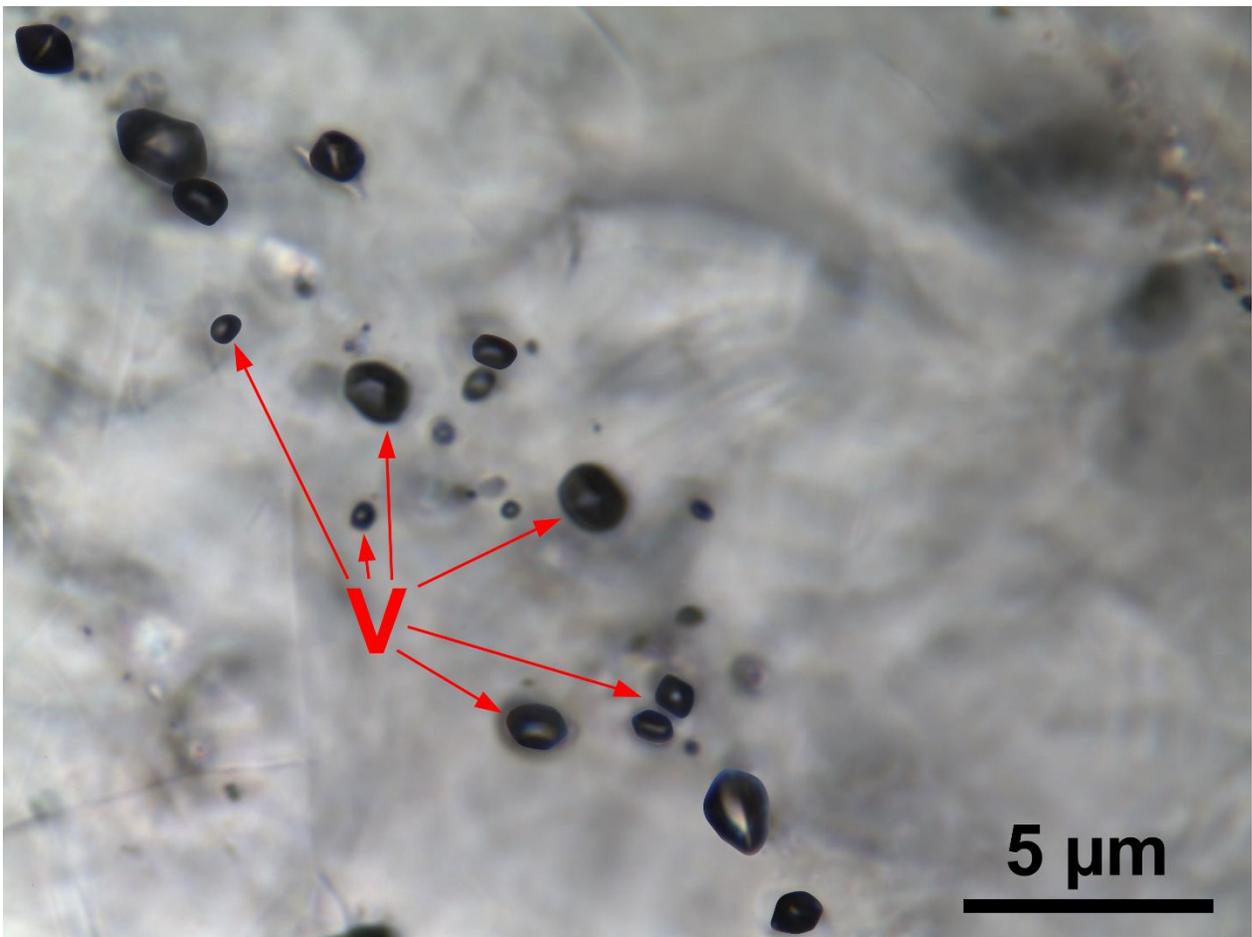


Figura 5.6: FIA tipo V_H : únicamente inclusiones ricas en vapor (V), con burbujas ocupando aproximadamente el 100% de la inclusión. Muestra NNV1708/016, FIA 1-B.

Tipo V. Presente en el 26% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de ebullición intensa o *flashing*, este tipo arreglo, se caracterizaba por contener inclusiones ricas en vapor, con burbujas que ocupaban menos del 90% del total de la inclusión (<90% de fase vapor; Figura 5.7). En su mayoría, las inclusiones presentaban formas esféricas a ovaladas, con bordes que variaban de suaves y regulares a irregulares, sin embargo, algunas mostraban formas semicuadradas e irregulares. En algunos casos, las inclusiones se encontraban coexistiendo con una pequeña cantidad de inclusiones con precipitación de halita (muy pocas para considerarlas del tipo L_H+V). Con respecto al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones presentaban entre un 68 y 92%. Los FIAs tipo V, fueron atrapados principalmente en vetillas A (82%) y en menor cantidad en vetillas B (41%) y vetillas D (18%; Tabla 5.2).



Figura 5.7: FIA tipo V: solamente inclusiones ricas en vapor (V). Con flechas color amarillo, se indican dos inclusiones con minerales hijos: la superior muestra un mineral opaco (posiblemente calcopirita) y la inferior presenta halita. Muestra DDH1241/294.15, FIA 7-A.

Tipo L. Corresponde al tipo de arreglo más abundante, presente en el 92% de las muestras analizadas. Debido a que no se asocia a un proceso fisicoquímico de importancia, este tipo de arreglo, no es considerado en la estadística. Este tipo de FIA, se caracterizaba por contener únicamente inclusiones ricas en líquido (Figura 5.8). En general, las inclusiones ricas en líquido, se presentaban en miríadas, mostrando formas ovaladas, esféricas e irregulares, no obstante, un número no menor, solía exhibir formas alargadas, rectangulares y cuadradas. Las superficies, por lo común, variaban desde suaves y bien definidas, hasta rugosas e irregulares. Comúnmente, las inclusiones evidenciaban precipitación de calcopirita y, en algunos casos, presentaban precipitación de halita y/u otros minerales hijos, por lo cual, ciertos FIAs tipo L, también se consideran tipo Cp y tipo H. En relación al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones presentaban entre un 19 y 31%. Los FIAs tipo L, fueron atrapados en su mayoría en vetillas A (62%) y vetillas B (49%), y en menor cantidad en vetillas D (21%; Tabla 5.2).

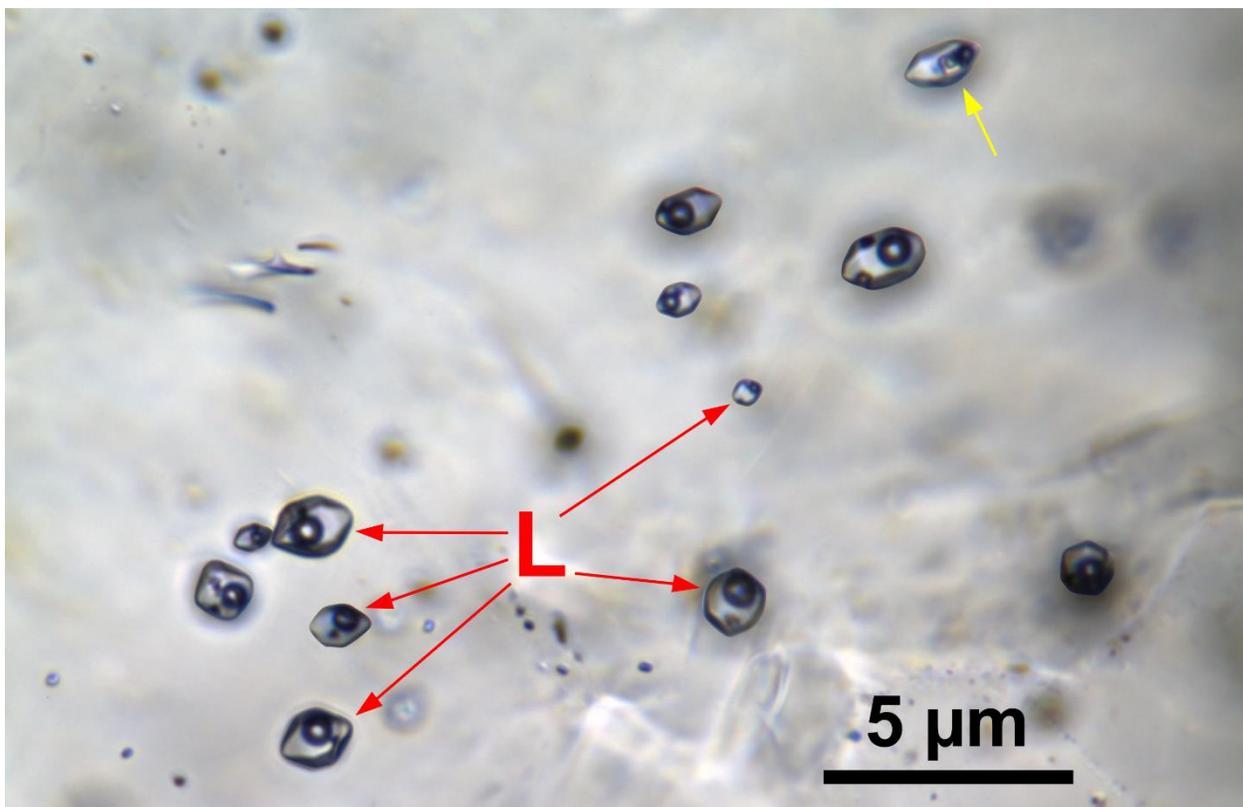


Figura 5.8: FIA tipo L: únicamente inclusiones ricas en líquido (L). Casi todas exhiben minerales opacos, posiblemente calcopirita. Con flecha color amarillo, se señala una inclusión con precipitación de halita. Muestra DDH1241/116.1, FIA 10-A.

Tipo Cp. Presente en el 24% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de mineralización cuprífera, este tipo de arreglo, se caracterizaba por tener inclusiones fluidas con precipitación de calcopirita (Figura 5.9). Por lo común, las inclusiones se presentaban en formas ovaladas a esféricas, con bordes regulares a irregulares, aunque algunas mostraban formas cuadradas, en especial las que exhibían precipitación de halita. Habitualmente, las inclusiones evidenciaban precipitación de halita y/u otros minerales hijos, por lo tanto, ciertos FIAs tipo Cp, también se consideran tipo H. Con respecto al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones presentaban entre un 19 y 29%. Los FIAs tipo Cp, fueron atrapados principalmente en vetillas A (69%) y en menor cantidad en vetillas B (44%) y vetillas D (25%; Tabla 5.2).

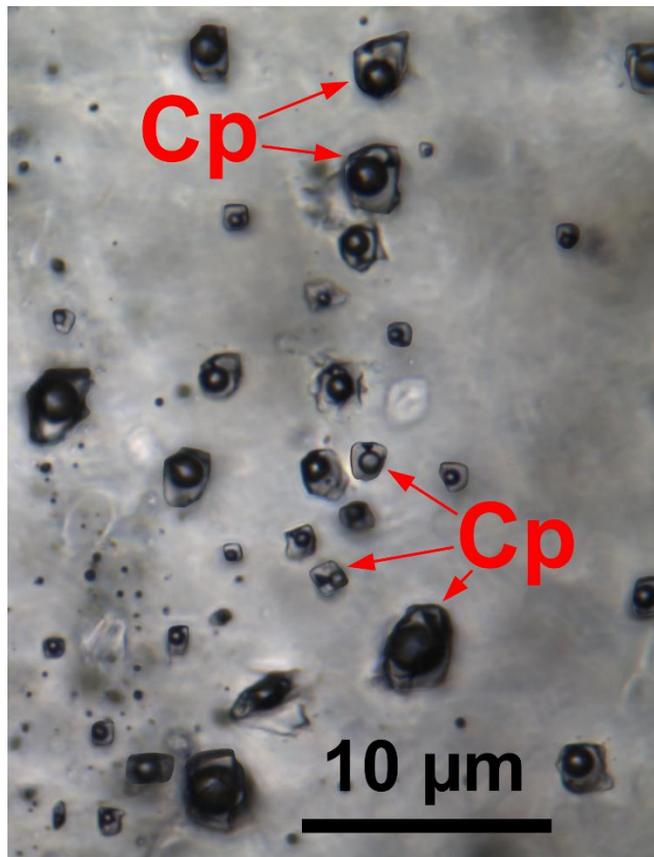


Figura 5.9: FIA tipo Cp: inclusiones con precipitación de calcopirita (Cp). La calcopirita como mineral hijo, se caracteriza por su forma triangular y tonalidad opaca. Debido al pequeño tamaño de la calcopirita, frecuentemente su forma no se puede apreciar correctamente, no obstante, si la inclusión presenta un mineral hijo opaco, es probable que se trate de calcopirita. En el presente caso, dado que en algunas inclusiones se exhibe la forma triangular característica de la calcopirita, es muy probable que los minerales opacos en el resto de las inclusiones, también correspondan a calcopirita. Muestra DDH1234/341.1, FIA 7-A.

Tipo H. Presente en el 64% de las muestras analizadas. Asociado a procesos de mineralización cuprífera, este tipo de FIA, se caracterizaba por tener inclusiones fluidas con precipitación de halita (Figura 5.10). En su mayoría, las inclusiones se presentaban en formas cuadradas, semicuadradas e irregulares, con superficies que variaban de rectas y lisas a irregulares, sin embargo, un número no menor, mostraba formas ovaladas. En algunos casos, las inclusiones exhibían precipitación de calcopirita y/u otros minerales hijos no identificados, por lo cual, ciertos FIAs tipo H, también se consideran tipo Cp. En relación al porcentaje de fase vapor (burbuja), en promedio, las inclusiones presentaban entre un 9 y 13%. Los FIAs tipo H, fueron atrapados en su mayoría en vetillas A (64%) y vetillas B (52%), y en menor cantidad en vetillas D (21%; Tabla 5.2).

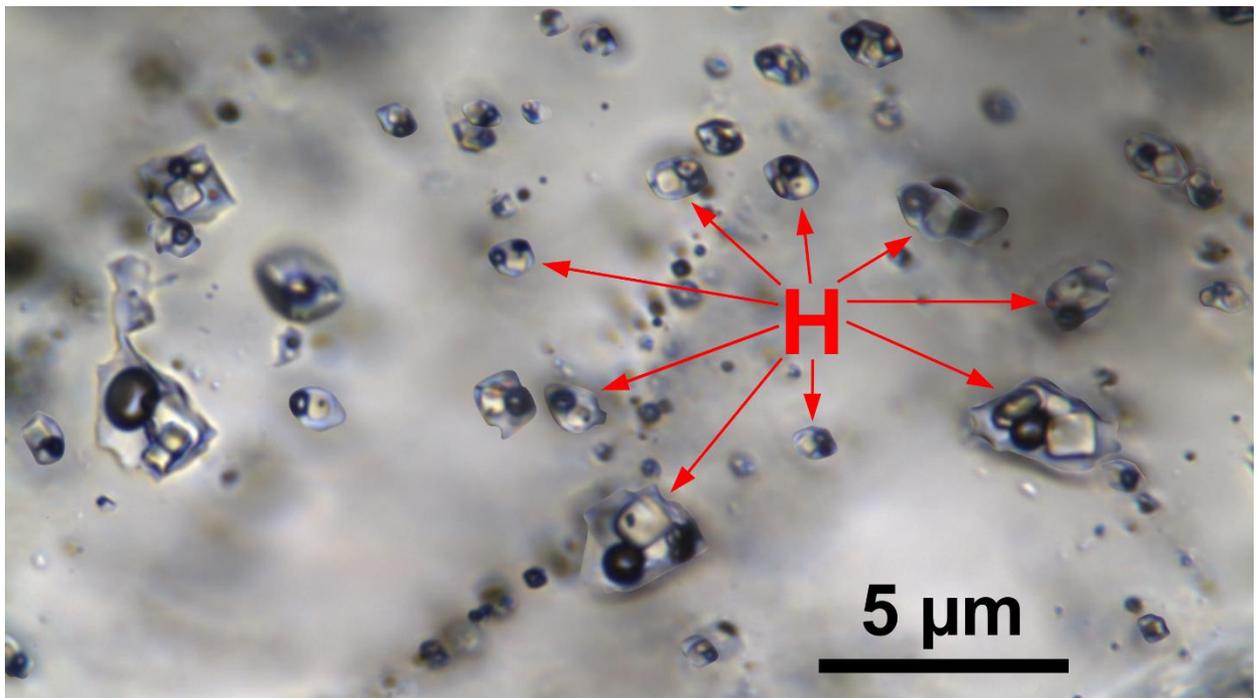


Figura 5.10: FIA tipo H: inclusiones con precipitación de halita (H). La halita como mineral hijo, se caracteriza por su forma cuadrada y mostrarse incolora. La mayoría de las inclusiones, presenta otros minerales hijos además de halita. Muestra DDH1234/452.67, FIA 7-A.

Tabla 5.2: Tipos de FIAs y sus porcentajes, con respecto a la vetilla en que fueron atrapados. En colores azul y rojo se señalan los mayores y menores porcentajes, respectivamente. El porcentaje de cada vetilla fue calculado con respecto al número total de muestras correspondiente a cada tipo de FIA.

	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
L+V	67%	49%	18%
L _H +V	75%	33%	25%
V _H	70%	40%	20%
V	82%	41%	18%
Cp	69%	44%	25%
H	64%	52%	21%
Total	65%	45%	20%

5.2 Modelamiento 3D

A partir de la base de datos, referente a los sondajes realizados en el yacimiento Carmen de Andacollo, junto con la información generada, con base en la caracterización de inclusiones fluidas (Tabla A.2, Anexos), se logró generar una representación tridimensional de los sondajes, en función de cada tipo de arreglo de inclusiones fluidas (FIA). Para ello, se realizó una serie de pasos, los cuales, se detallan a continuación.

En primer lugar, se hizo un modelamiento tridimensional, con base únicamente en el número de sondaje (Figuras 5.11 y 5.12). Esto, con la finalidad de determinar la relación espacial que se cumple entre las perforaciones.

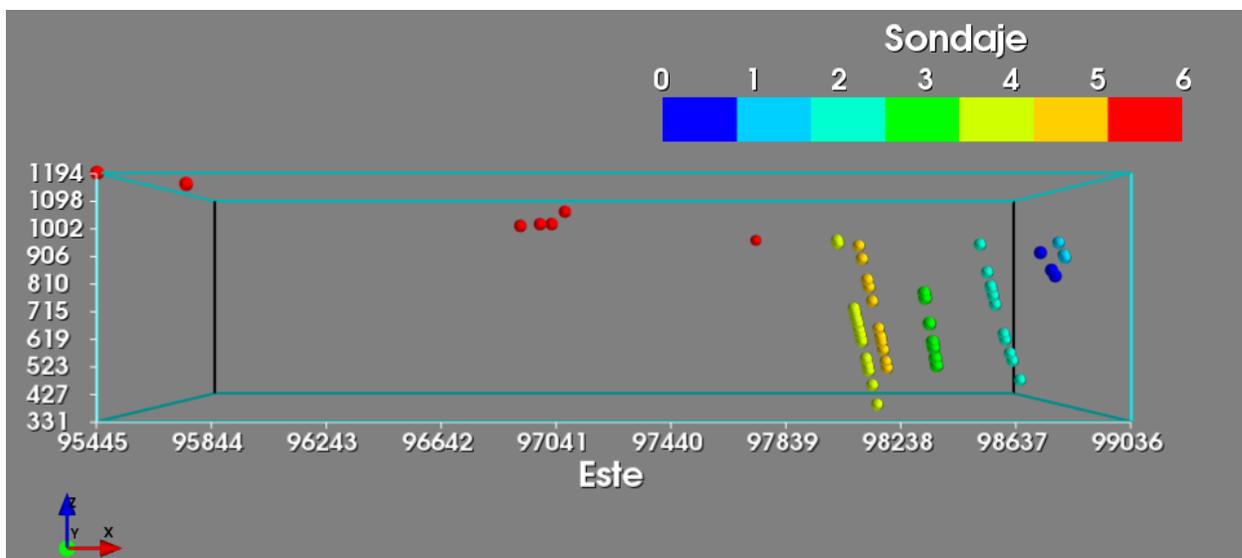


Figura 5.11: Representación 3D de los sondajes: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color naranja); y de las muestras superficiales NNV1708 (6, color rojo). Vista en perfil.

Como se contempla en las Figuras 5.11 y 5.12, a excepción de las muestras superficiales NNV1708 (6, color rojo), todos los sondajes se encuentran muy próximos uno del otro, por lo tanto, para un mejor modelamiento de los datos, se decidió excluir las muestras superficiales NNV1708. Luego, se llevó a cabo la representación tridimensional de los sondajes seleccionados (Figura 5.13),

en función de cada tipo de FIA (Figuras 5.14, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22 y 5.24), la cual, es apoyada por gráficos de profundidad para una mejor interpretación de los datos generados (Figuras 5.15, 5.17, 5.19, 5.21, 5.23 y 5.25). En anexos, se presentan los modelamientos espaciales rotados 180°.

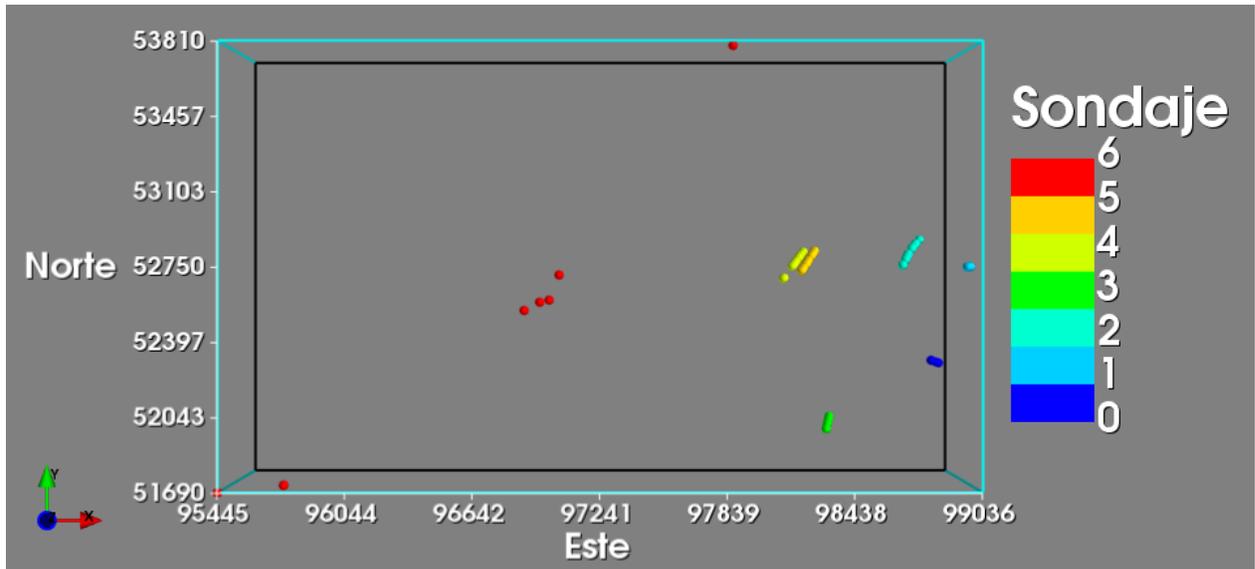


Figura 5.12: Representación 3D de los sondajes con vista en planta. Para los sondajes, se conserva el esquema de color empleado en la Figura 5.11.

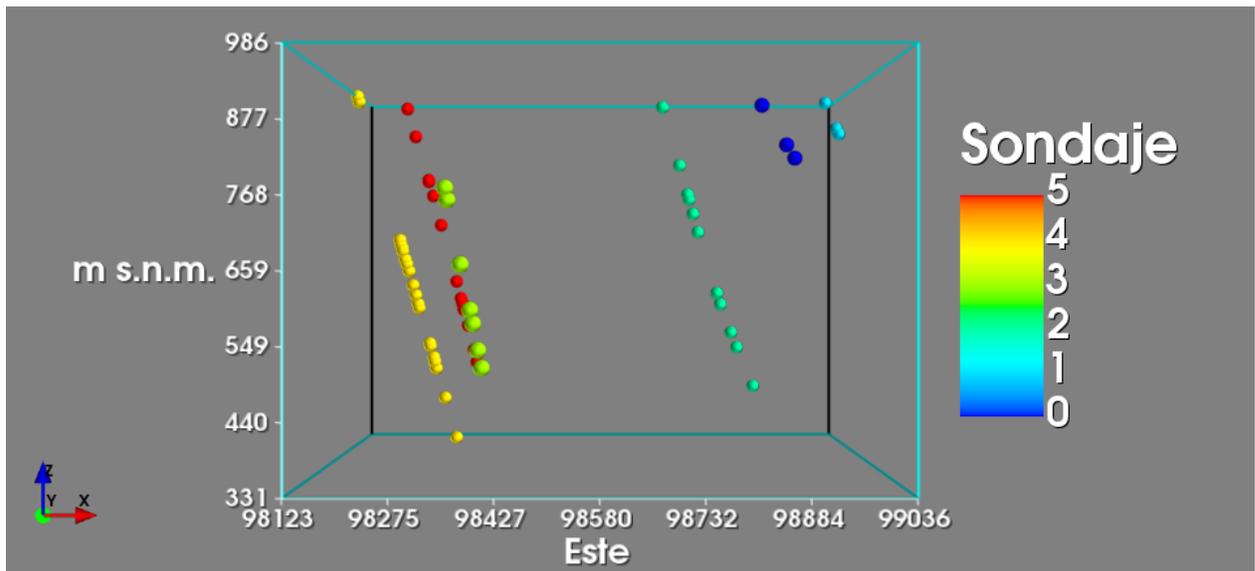


Figura 5.13: Representación 3D de los sondajes seleccionados: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color rojo). Vista en perfil.

FIAs Tipo L+V

Se observa una gran concentración de FIAs tipo L+V, en el sector occidental (izquierda) de la representación tridimensional. También se aprecia otra concentración, en el sector oriental (derecha), no obstante, de menor tamaño y con mayor dispersión (Figura 5.14). La mayoría de los arreglos tipo L+V, se encuentran entre los 700 y 800 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), una cantidad importante se halla entre los 900 y 1000 m s.n.m. y, el resto, en general, se sitúa entre los 400 y 700 m s.n.m., con una leve disminución al aumentar la altitud (Figura 5.15).

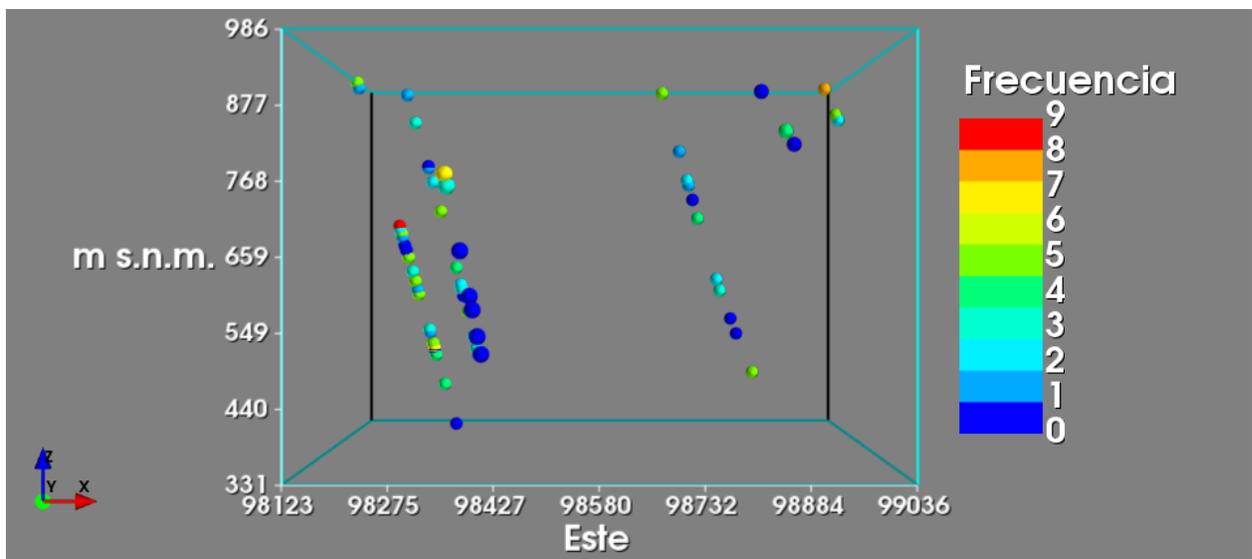


Figura 5.14: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo L+V. Vista en perfil.

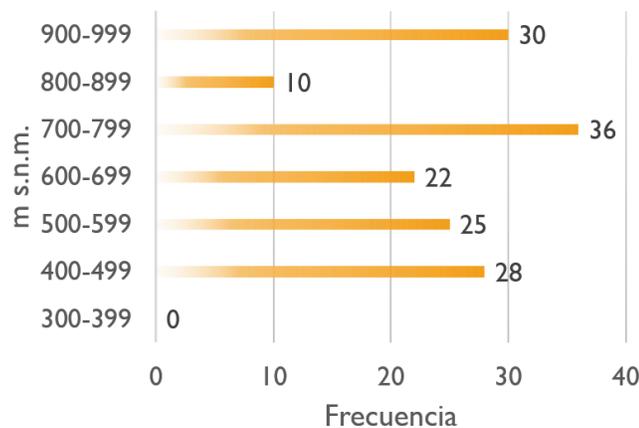


Figura 5.15: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo L+V, en función de la profundidad.

FIAs Tipo L_H+V

Los arreglos tipo L_H+V , se disponen en el sector occidental, entre los 600 y 800 m s.n.m., y en el sector oriental, entre los 700 y 1000 m s.n.m. (Figura 5.16). La gran mayoría de los FIAs tipo L_H+V , se encuentran entre los 700 y 800 m s.n.m. y, el resto, en su mayoría, se hallan entre los 800 y 1000 m s.n.m., con una pequeña cantidad entre los 600 y 700 m s.n.m. (Figura 5.17).

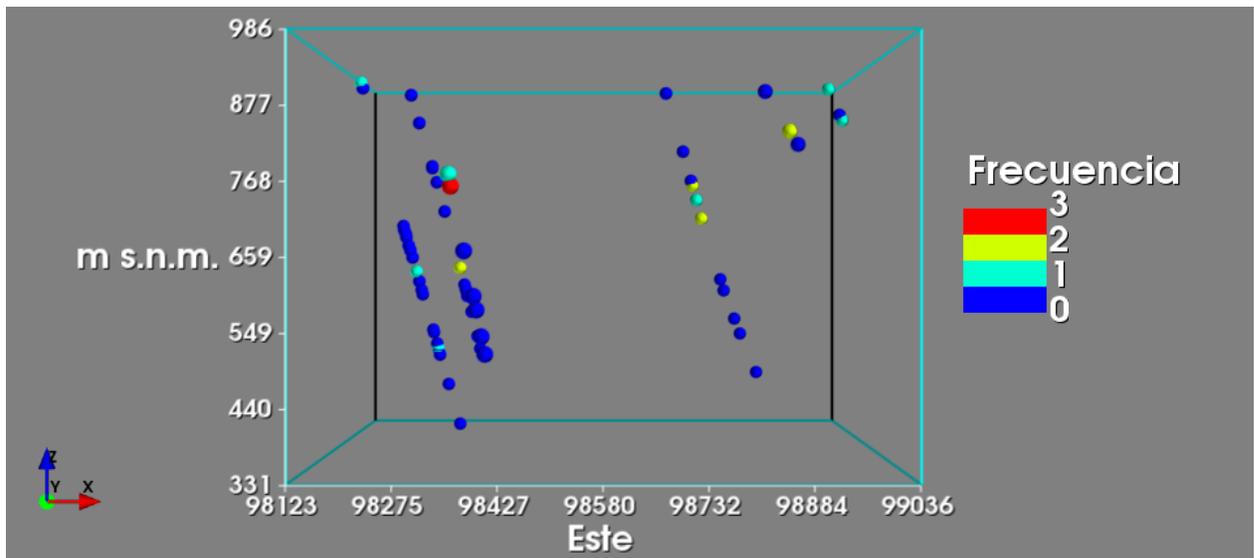


Figura 5.16: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo L_H+V . Vista en perfil.

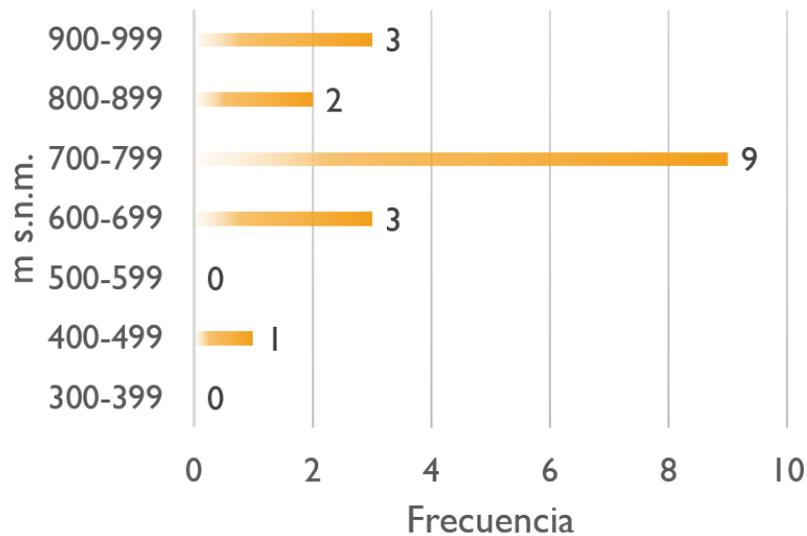


Figura 5.17: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo L_H+V , en función de la profundidad.

FIAs Tipo V_H

Los FIAs tipo V_H , se distribuyen en un marcado lineamiento, situado a una profundidad intermedia en el sector occidental y que asciende hacia el sector oriental (Figura 5.18). En general, los arreglos tipo V_H , se ubican entre los 700 y 1000 m s.n.m., predominando entre los 700 y 800 m s.n.m. (Figura 5.19). Una pequeña cantidad se encuentra entre los 500 y 600 m s.n.m., correspondiente a dos arreglos que se hallan en la zona profunda del sector occidental.

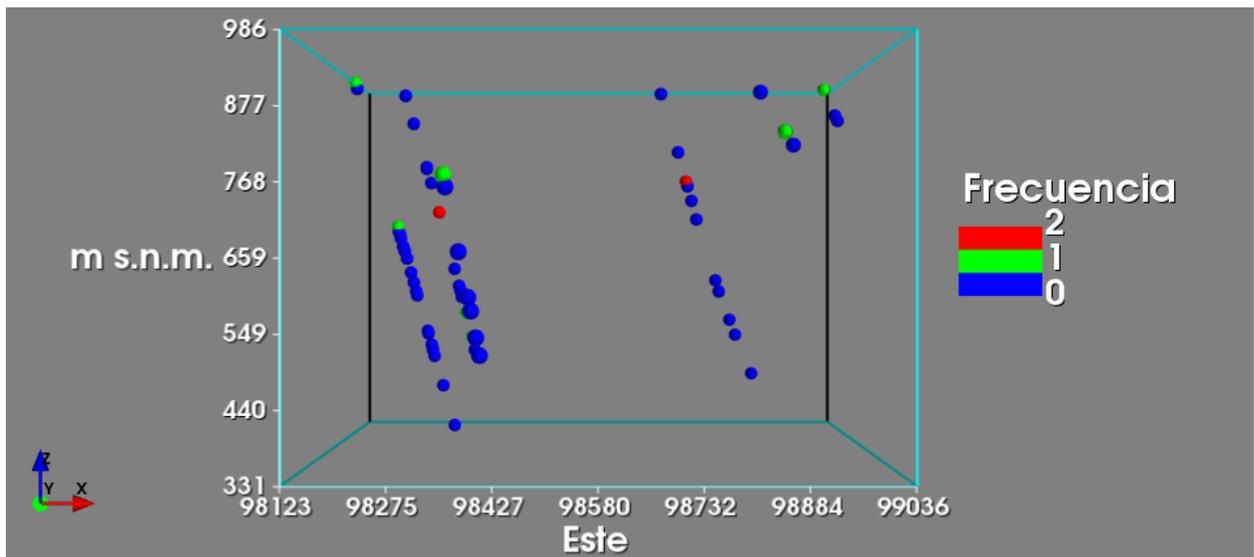


Figura 5.18: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIA tipo V_H . Vista en perfil.

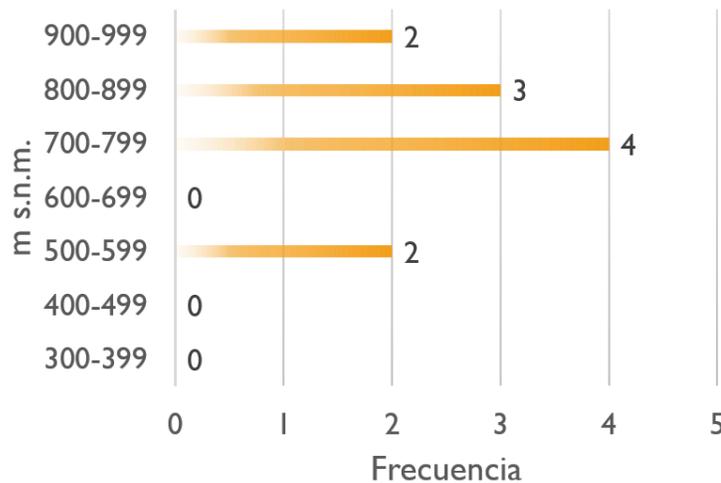


Figura 5.19: Gráfico mostrando la distribución de los FIA tipo V_H , en función de la profundidad.

FIAs Tipo V

Se aprecian dos concentraciones de arreglos tipo V; la de mayor tamaño situada a una profundidad intermedia y la restante ubicada cerca de la superficie (Figura 5.20). La mayoría de los FIAs tipo V, se encuentra entre los 700 y 800 m s.n.m., sin embargo, un número importante se halla entre los 800 y 1000 m s.n.m. (Figura 5.21).

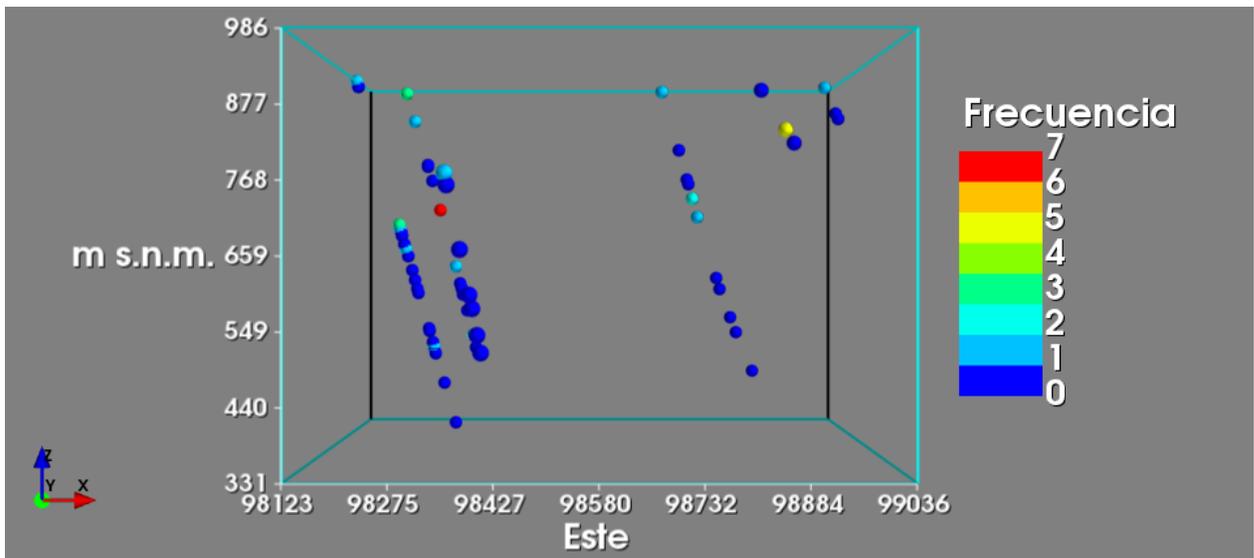


Figura 5.20: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo V. Vista en perfil.

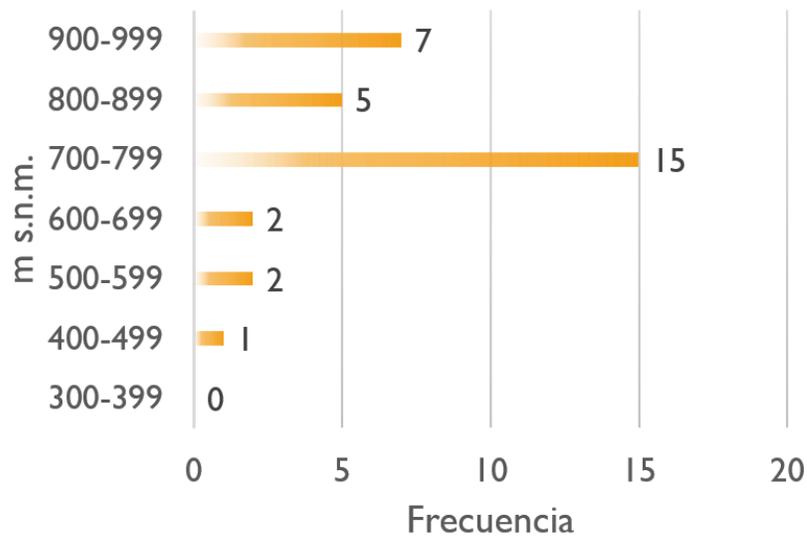


Figura 5.21: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo V, en función de la profundidad.

FIAs Tipo Cp

Se observa una concentración de FIAs tipo Cp, en el sector occidental de la representación tridimensional. También se aprecia otra concentración, en el sector oriental, no obstante, de menor tamaño (Figura 5.22). La mayoría de los arreglos tipo Cp, se situán entre los 500 y 600 m s.n.m., no obstante, dos importantes grupos se ubican entre los 600 y 700 m.s.n.m, y entre los 900 y 1000 m s.n.m. (Figura 5.23).

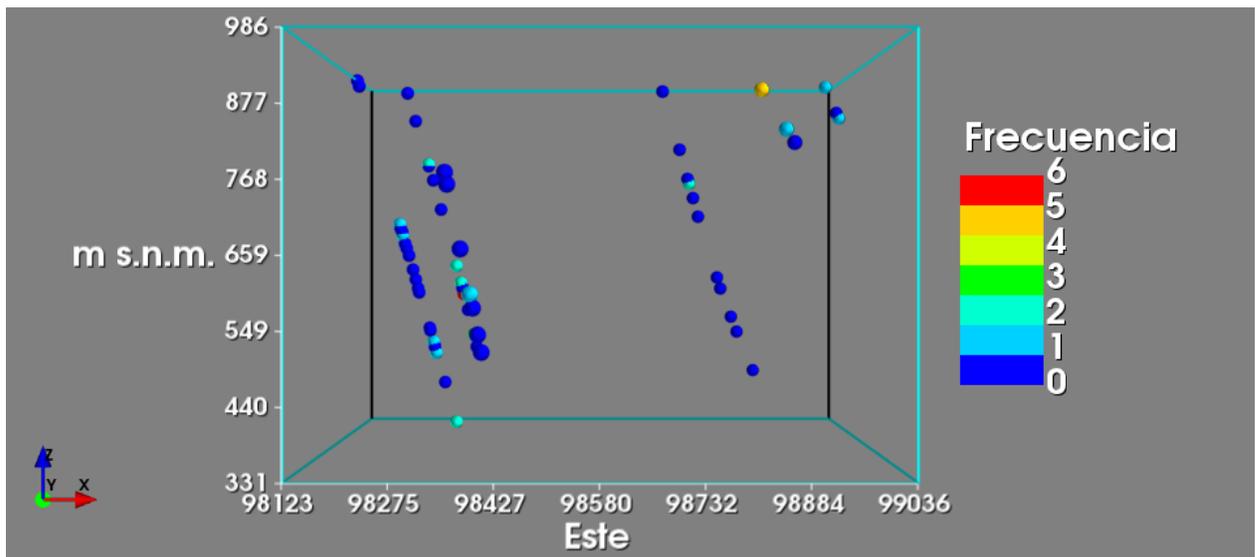


Figura 5.22: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo Cp. Vista en perfil.

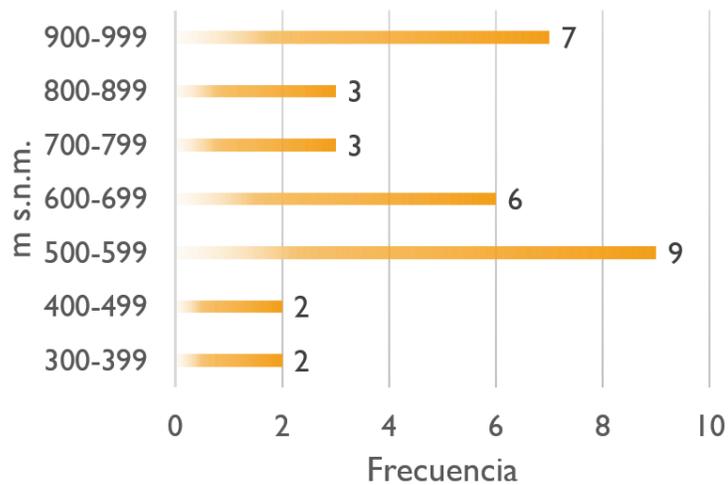


Figura 5.23: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo Cp, en función de la profundidad.

FIAs Tipo H

Como se contempla en la representación tridimensional (Figura 5.24), los arreglos tipo H, se encuentran en casi todas las muestras, sin embargo, la mayoría se concentra en el sector occidental. En general, la mayoría de los FIAs tipo H, se hallan entre los 500 y 800 m s.n.m., predominando entre los 700 y 800 m s.n.m. Una moderada cantidad se sitúa entre los 900 y 1000 m s.n.m. (Figura 5.25).

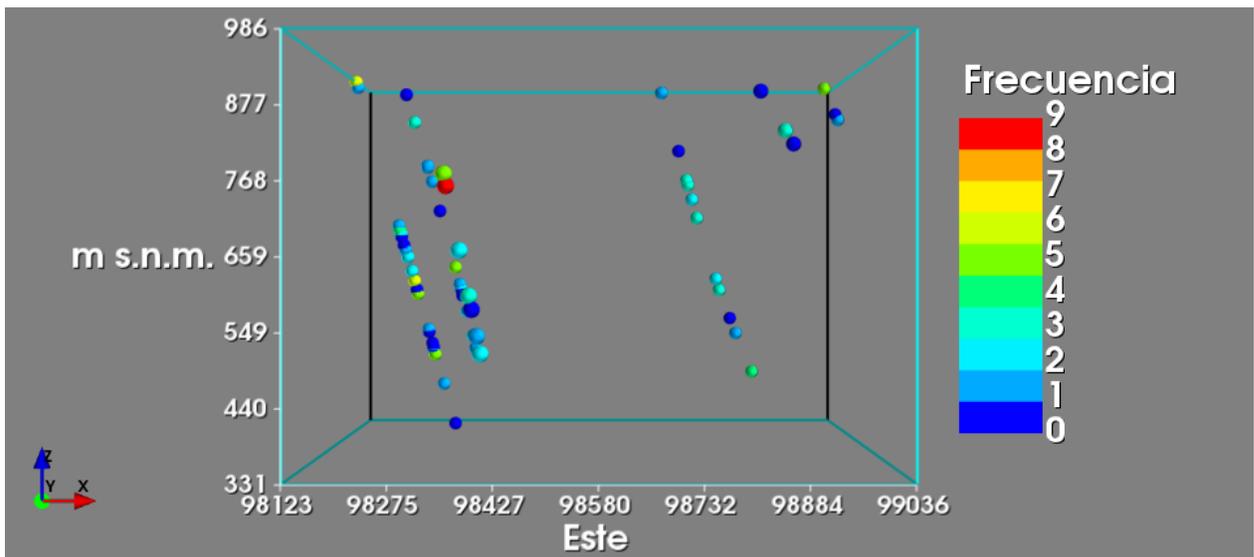


Figura 5.24: Representación 3D de los sondajes, en función de los FIAs tipo H. Vista en perfil.

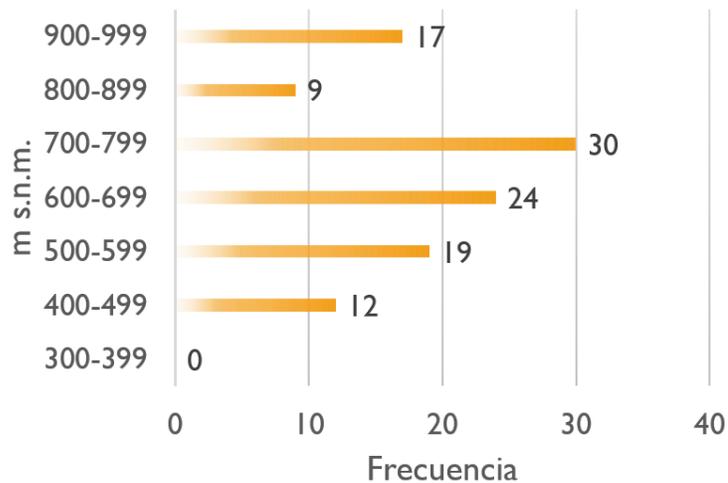


Figura 5.25: Gráfico mostrando la distribución de los FIAs tipo H, en función de la profundidad.

6. DISCUSIONES

6.1 Relaciones Temporales

6.1.1 Vetillas

Los resultados de la petrografía, muestran que las inclusiones fluidas, se hospedan principalmente en vetillas A y vetillas B, con una pequeña porción atrapada en vetillas D, sugiriendo que la zona de estudio, estaría dominada por una secuencia de alteración-mineralización de temporalidad temprana, según lo mencionado por Gustafson & Hunt (1975). De acuerdo con Sillitoe (2010), las vetillas A, estarían asociadas a una etapa magmática tardía (zona potásica), cuyo emplazamiento, se produjo en un ambiente semidúctil, con temperaturas entre los 800 a 600 °C. Esto, explicaría las formas sinuosas e irregulares observadas en las vetillas A. Las vetillas B, representarían una etapa transicional (zona de transición potásica-fílica; Sillitoe, 2010), es decir, se encontrarían ligadas a un régimen que varía de dúctil a frágil, con temperaturas cercanas a los 400 °C, lo que daría a entender la variedad de formas (desde sinuosas a rectas y planares) presente en estas vetillas. Conforme con Sillitoe (2010), las vetillas D, se relacionan con la etapa hidrotermal tardía (zonas de alteración fílica y argílica), dentro de un ambiente frágil, con temperaturas inferiores a los 400 °C, lo que explicaría las formas rectas y planares, junto con la abundante cantidad de pirita.

6.1.2 Inclusiones Fluidas

Los resultados de la petrografía, señalan un amplio dominio por parte de los arreglos de inclusiones fluidas (FIAs) tipo L+V y tipo H, ambos pertenecientes al campo bifásico líquido + vapor (Figura 2.17). De acuerdo con Fournier (1999), la mineralización temprana en la zona potásica, tendría lugar a partir de un fluido bifásico (Figura 2.6), compuesto por una fase líquida de alta salinidad, en equilibrio con una fase de vapor de baja densidad. Esto es apoyado por Bodnar et al. (1985a) y Becker et al. (2019), quienes sugieren que, durante las etapas iniciales de cristalización, la fase acuosa monofásica exsuelta a partir de la masa fundida, se separa

inmediatamente, produciendo salmuera en equilibrio con vapor de baja salinidad. Estas aseveraciones, permiten sustentar el atrapamiento del fluido bifásico o inmiscible, en las etapas iniciales de cristalización, lo que se traduce, en FIAs conformados por inclusiones ricas en líquido de moderada a alta salinidad, coexistiendo con inclusiones ricas en vapor de baja salinidad, es decir, FIAs tipo L+V o tipo L_H+V , este último si hay precipitación de halita. Este fluido bifásico, también es en parte responsable del atrapamiento de los FIAs tipo H, compuestos únicamente por inclusiones fluidas con precipitación de halita.

Otro punto importante a considerar, es la presencia de los arreglos tipo V_H , la cual, a pesar de su escasez, juega un rol fundamental con respecto a la temporalidad del sistema. Conforme con el modelo de Becker et al. (2019), los FIAs tipo V_H , pertenecen al campo monofásico de vapor saturado en halita (Figura 2.17), estable a temperaturas intermedias y presiones bajas, condiciones posibles solo en las etapas iniciales de cristalización (etapas A y B, Figura 2.18), en vista de que, en etapas tardías, las temperaturas no son lo suficientemente altas para cumplir con las condiciones de estabilidad. Exactamente lo mismo sucede con el campo bifásico líquido + vapor (Figura 2.17; etapas A y B, Figura 2.18).

Conforme con Sillitoe (2010), los pórfidos tempranos, albergan la mineralización de mayor grado en la mayoría de los depósitos y normalmente se encuentran menos mineralizados a medida que se vuelven más tardíos. Puesto que la precipitación de calcopirita en los arreglos tipo Cp es sinónimo de mineralización cuprífera (Mavrogenes & Bodnar, 1994; Becker et al., 2019), es posible asociar los FIAs tipo Cp a etapas tempranas de mineralización.

6.2 Vectores de Mineralización

Según autores como Eastoe (1978), Bodnar (1995), Frei (1995) y Ulrich et al. (2001), entre los 700 y 550 °C, el líquido hipersalino junto con el vapor de baja densidad, dan comienzo a la formación de la zona potásica y a la precipitación mineral, en los depósitos de tipo pórfido. No obstante, conforme con Ulrich et al. (2001), Redmond et al. (2004), Landtwing et al. (2005),

Klemm et al. (2007) y Rusk et al. (2008a), en muchos depósitos pórfido cupríferos, el enfriamiento del fluido bifásico ocurre entre ~550 y 350 °C, donde la reacción del fluido bifásico con la roca huésped, provocaría la precipitación de Cu. Todo esto permite sugerir que, los FIAs tipo L+V, tipo L_H+V y tipo H, estén estrechamente asociados a la mineralización cuprífera, al albergar el fluido bifásico o inmisible, en el interior de las inclusiones fluidas que los conforman. Según Becker et al. (2019), las inclusiones de los arreglos previamente mencionados, a menudo contienen un mineral hijo de calcopirita (FIAs tipo Cp). Entonces, al considerar que la zona de estudio se asocia a una temporalidad temprana y conforme con Becker et al. (2019), se puede sugerir que, los fluidos atrapados en los FIAs tipo Cp, representan fluidos ricos en Cu, S y otros componentes mineralizadores. Por consiguiente, los FIAs tipo Cp, también estarían asociados con la mineralización cuprífera.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: con Halita (FIAs Tipo H)

Roedder & Bodnar (1997), llegaron a la conclusión de que la presencia de inclusiones con precipitación de halita, está muy asociada con la zona de mineralización en los depósitos pórfido de Cu, lo que es consistente con estudios realizados por autores como Theodore & Nash (1973), Moore & Nash (1974), Redmond et al. (2004), Landtwing et al. (2010) y Lecumberri-Sanchez et al. (2013). De esta manera, las inclusiones que presentan halita, se vuelven un pilar fundamental al momento de definir guías de localización, hacia las zonas más probables de albergar mineralización cuprífera. En el presente trabajo, los FIAs tipo H, se encuentran en el 64% de las muestras analizadas, sugiriendo una potencial mineralización en la zona de estudio. La representación tridimensional (Figura 5.24), muestra que la mayoría de los arreglos tipo H, se concentra en el sector occidental, entre los 500 y 800 m s.n.m. (Figura 5.25), indicando que en aquella región (zona color azul, Figura 6.1), se presentarían las mayores probabilidades de encontrar mineralización. Es importante destacar que, esta zona podría extenderse hacia el sector oriental, producto de que el sondaje DDH1149 (2, color verde agua, Figura 5.13), presenta un número importante de FIAs tipo H. Por ello, se sugiere llevar a cabo una perforación entre los sondajes DDH1149 y DDH1155 (3, color verde, Figura 5.13), con la finalidad de definir mejor la región de potencial mineralización.

El gráfico de profundidad (Figura 5.25), muestra que los arreglos tipo H se distribuyen en una amplia gama de profundidades, reflejando el hecho de que los FIAs tipo H, pertenezcan tanto al campo monofásico de vapor saturado en halita (zonas poco profundas), como al campo bifásico líquido + vapor (zonas intermedias a profundas). Lo anterior, también refleja una concordancia con la distribución espacial que muestra el modelo de Becker et al. (2019; etapas A y B, Figura 2.18).

Con respecto al modelo de Becker et al. (2019), las inclusiones que contienen halita, se ciñen a las inmediaciones del plutón (etapas A y B, Figura 2.18; perfiles 3A, 3B, 4A, 4B, 5A y 5B, Figura 2.19). Esta observación sugiere que, la zona seleccionada como principal carta para la exploración (zona color azul, Figura 6.1), probablemente representa una ubicación dentro o cerca del plutón.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: Ricas en Líquido + Ricas en Vapor (Tipo L+V)

Drummond & Ohmoto (1985) y Henley & Brown (1985), señalan que, en las condiciones adecuadas, la ebullición puede ser un mecanismo de precipitación mineral muy poderoso, siendo el más efectivo de muchos sistemas hidrotermales. Esto permite sugerir que, los arreglos tipo L+V, también pueden ser de gran utilidad al momento de definir vectores de mineralización. En el trabajo actual, los FIAs tipo L+V, se encuentran en el 68% de las muestras analizadas, lo que sugiere una alta probabilidad de mineralización en la zona de estudio. Como se contempla en el modelado tridimensional (Figura 5.14), la mayor parte de los arreglos tipo L+V, se concentra en el sector occidental, entre los 700 y 800 m s.n.m. (Figura 5.15), apuntando a esa región (zona color verde, Figura 6.1) como una de las favoritas para la búsqueda de mineralización. Cabe señalar que, a niveles superficiales (900 a 1000 m s.n.m., Figura 5.15), se dispone una gran cantidad de FIAs tipo L+V, lo cual, podría ser indicador de una posible mineralización epitermal generada bajo condiciones de ebullición o *boiling*, conforme con lo mencionado por Moncada & Bodnar (2012) y Moncada et al., (2012).

Al comparar la distribución espacial de los arreglos tipo L+V, con la distribución espacial exhibida por el campo bifásico líquido + vapor del modelo de Becker et al. (2019; etapas A y B, Figura 2.18), se puede observar una gran similitud, puesto que, en ambos casos, la distribución espacial abarca niveles desde someros hasta profundos del sistema.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: Ricas en Líquido con Halita + Ricas en Vapor (Tipo L_H+V)

Nash (1976), Bodnar (1981) y Bodnar et al. (1985a), mencionan que, la coexistencia entre las inclusiones ricas en líquido saturadas en halita y las inclusiones ricas en vapor, es casi omnipresente en estos depósitos (pórfidos de Cu), ya que está estrechamente asociada con el proceso de mineralización y se ha utilizado como herramienta de exploración, en la búsqueda de nuevos depósitos. Así, los FIAs tipo L_H+V , juegan un importante rol en la exploración de los depósitos pórfido cupríferos. Si bien, los arreglos tipo L_H+V , son limitados en cantidad (presentes en el 18% del total de muestras), su distribución puede contribuir a una mejor definición de las zonas potenciales para la mineralización. La representación tridimensional (Figura 5.16), muestra que los FIAs tipo L_H+V , se concentran tanto en el sector occidental (entre los 600 y 800 m s.n.m.), como en el sector oriental (entre los 700 y 1000 m s.n.m.), con la gran mayoría ubicándose entre los 700 y 800 m s.n.m. (Figura 5.17), catalogando aquellas regiones, dentro de las cuales se presentarían posibilidades de albergar mineralización (zonas color amarillo, Figura 6.1). No obstante, la poca profundidad de los sondajes DDH0845 (0, color azul, Figura 5.13) y DDH0912 (1, color celeste, Figura 5.13), hace difícil demostrar que el sector oriental pueda hospedar mineralización.

Al comparar la distribución espacial de los arreglos tipo L_H+V , con la distribución espacial exhibida por el campo bifásico líquido + vapor del modelo de Becker et al. (2019; etapas A y B, Figura 2.18), se puede ver una cierta semejanza, dado que, tanto los FIAs tipo L_H+V como el campo al que pertenecen, se concentran a profundidades intermedias.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: con Calcopirita (Tipo Cp)

Resultados experimentales obtenidos por Mavrogenes & Bodnar (1994), muestran altas concentraciones de Cu, en inclusiones fluidas con contenidos de calcopirita, pertenecientes a depósitos de tipo pórfido, apoyando lo sugerido por Becker et al. (2019). Por lo tanto, los arreglos tipo Cp, juegan un importante papel en la búsqueda de zonas con mineralización. Como se contempla en el modelado tridimensional (Figura 5.22), los FIAs tipo Cp, se concentran principalmente en la parte profunda del sector occidental, entre los 500 y 700 m s.n.m. (Figura 5.23), catalogando aquel sector como una de las regiones que reúne altas probabilidades de hospedar mineralización (zona color negro en sector occidental, Figura 6.1). También, se observa una pequeña concentración en el sector oriental, sobre los 750 m s.n.m. aproximadamente (zona color negro en sector oriental, Figura 6.1), lo que sustenta el hecho de que aquella zona podría albergar mineralización, no obstante, como se mencionó anteriormente, faltan muchos datos para probar aquello.

Si bien, los arreglos tipo Cp no se asocian a ningún campo de estabilidad, Becker et al. (2019), señalan que, las inclusiones que presentan halita a menudo exhiben calcopirita, lo que explicaría la correlación de profundidades, entre los FIAs tipo H (500 y 800 m s.n.m.) y tipo Cp (500 y 700 m s.n.m.). Además, Becker et al. (2019), mencionan que, a mayores profundidades (con respecto al campo bifásico líquido + vapor), las inclusiones atrapadas en los campos monofásicos líquido y vapor, frecuentemente presentan calcopirita, lo que daría a entender por qué los arreglos tipo Cp, se concentran a mayores profundidades que los otros tipos de arreglos, en el sector occidental.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: Ricas en Vapor con Halita (FIAs Tipo V_H)

Aunque, este tipo de FIA no se asocia directamente con la mineralización, autores como Bodnar (1982, 1995) y Lecumberri-Sanchez et al. (2013), sostienen que, caracterizarían las porciones más someras de los sistemas de pórfido. Esto sugiere que los arreglos tipo V_H, indicarían las zonas que sobreyacen a las regiones de mineralización. A pesar de que corresponden al tipo de

FIA más escaso (presentes en el 15% del total de muestras), los FIAs tipo V_H , se distribuyen en un marcado lineamiento, situado a una profundidad intermedia en el sector occidental y que asciende hacia el sector oriental (Figura 5.18), localizándose principalmente en las partes poco profundas (sobre los 700 m s.n.m., Figura 5.19) de la zona estudiada, sugiriendo una posible mineralización, en los sectores occidental y oriental, bajo los 700 y los 800 a 900 m s.n.m., respectivamente (bajo líneas discontinuas color rojo, Figura 6.1).

Al comparar esta distribución con la mostrada en el modelo de Becker et al. (2019; etapas A y B, Figura 2.18), se cumple que, en ambos casos, los arreglos tipo V_H , se presentan en las partes superiores del sistema.

Arreglos de Inclusiones Fluidas: Ricas en Vapor (FIAs tipo V)

Al igual que los FIAs tipo V_H , los FIAs tipo V, tampoco se relacionan directamente con la mineralización. Becker et al. (2019), mencionan que, las inclusiones ricas en vapor correspondientes al campo monofásico de vapor, caracterizarían las zonas profundas de los sistemas de pórfido, lo que sugiere que, los arreglos tipo V, apuntarían a las zonas que subyacen a los sectores de mineralización. Sin embargo, la representación tridimensional (Figura 5.20) junto con el gráfico de profundidad (Figura 5.21) ponen en manifiesto, que la mayoría de los FIAs tipo V, se encuentra entre los 700 y 800 m s.n.m., con un número importante entre los 800 y 1000 m s.n.m., discrepando con la distribución espacial exhibida en el modelo de Becker et al. (2019; etapas A y B, Figura 2.18). Esta disconformidad, podría derivar en el hecho de que los arreglos tipo V, sean representativos de otro sistema o depósito mineral y no representen a los fluidos del sistema pórfido cuprífero planteado en este estudio. Siguiendo este punto, es probable que los FIAs tipo V, se encuentren asociados a un sistema epitermal desarrollado bajo condiciones de ebullición intensa o *flashing*, según lo mencionado por Moncada & Bodnar (2012) y Moncada et al., (2012).

Tabla 6.1: Intervalos de profundidad para las zonas de probable mineralización, conforme a la distribución espacial mostrada por cada tipo de FIA. Colores de acuerdo con Figura 6.1. Los intervalos se presentan en m s.n.m.

Tipo de FIA	Sector Occidental	Sector Oriental
H	500 – 800	
L+V	700 – 800	
L _H +V	600 – 800	700 – 1000
C _p	500 – 700	750 – 1000
V _H	< 700	< 800 – 900

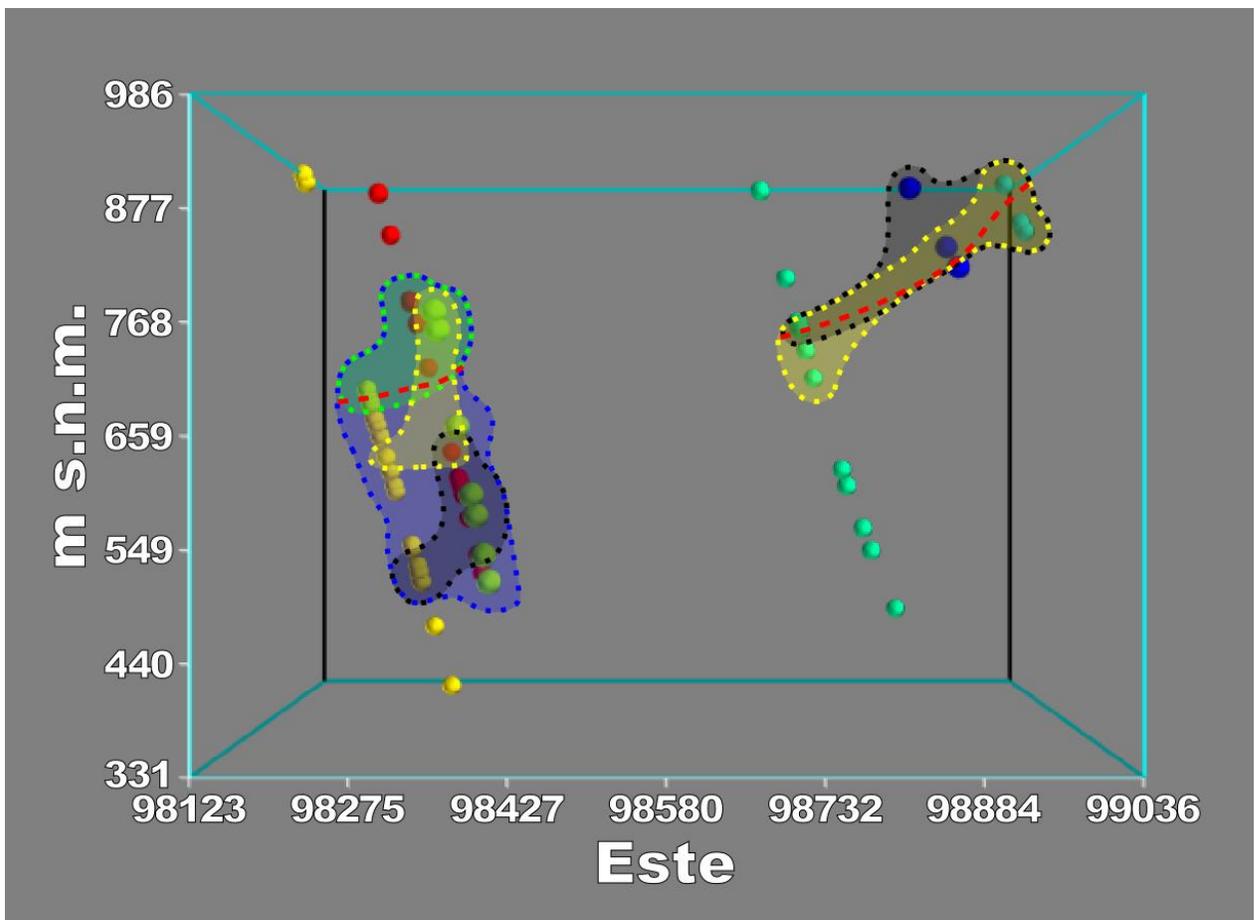


Figura 6.1: Regiones de potencial mineralización, definidas con respecto a la distribución espacial exhibida por los FIAs tipo H (zona color azul), tipo L+V (zona color verde), tipo L_H+V (zonas color amarillo), tipo C_p (zonas color negro) y tipo V_H (bajo líneas discontinuas color rojo). Para una mejor observación de las regiones, guiarse por sus contornos (líneas punteadas). Sondajes: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color rojo). Vista en perfil.

7. CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo, consistió en la caracterización de las relaciones de fase a temperatura ambiente de inclusiones fluidas, asociadas a la mineralización pórfido cuprífera, en el distrito minero Andacollo. Esto, fue llevado a cabo, con el propósito de generar vectores hacia las zonas con mayor potencial de albergar mineralización económica.

La evidencia petrográfica, arrojó que los principales arreglos de inclusiones fluidas, corresponden a los conformados por inclusiones ricas en líquido coexistentes con inclusiones ricas en vapor (FIA tipo L+V, 68%) y los constituidos por inclusiones con precipitación de halita (FIA tipo H, 64%), ambos pertenecientes al campo de inmiscibilidad líquido + vapor y hospedados en su mayoría en vetillas A (65%) y vetillas B (45%), ambas asociadas a la mineralización. Esto, junto con la presencia de los arreglos conformados por inclusiones ricas en vapor saturadas en halita (FIA tipo V_H, 15%) y los constituidos por inclusiones con precipitación de calcopirita (FIA tipo Cp, 24%), permitió concluir que la zona de estudio, se encuentra dominada por una secuencia de alteración-mineralización temprana.

El modelamiento espacial de los diferentes arreglos de inclusiones fluidas, permitió definir varias zonas potenciales para la mineralización cuprífera: los FIAs tipo H, al ser los que se relacionan de forma más estrecha con la mineralización cuprífera, definen la zona con mayor potencial para la mineralización, localizándose en el sector occidental, entre 500-800 m s.n.m.; los FIAs tipo L+V, también estrechamente asociados con la mineralización, demarcan una zona en el sector occidental, entre 700-800 m s.n.m.; los FIAs tipo L_H+V, concretan dos zonas, una en el sector occidental, entre 600-800 m s.n.m. y otra en el sector oriental, entre 700-1000 m s.n.m.; los FIAs tipo Cp, fieles representantes de los fluidos ricos en Cu, definen dos importantes zonas, una en el sector occidental, entre 500-700 m s.n.m. y otra en el sector oriental, entre 750-1000 m s.n.m.; los FIAs tipo V_H, relacionados con las zonas más someras de los sistemas de pórfido, determinan que los sectores occidental y oriental, bajo los 700 y los 800-900 m s.n.m., respectivamente, son factibles para albergar mineralización.

Las zonas definidas, permitieron generar vectores de mineralización, con dirección hacia el sector occidental de la zona de estudio y al examinar los intervalos de profundidad, se puede concluir que, la zona que reúne las mayores probabilidades de albergar mineralización cuprífera, se presenta entre los 600-800 m s.n.m. de este sector, sugiriendo esta región como la carta principal para la exploración minera. Con respecto al sector oriental, a pesar de que también se definieron zonas hipotéticas de mineralización, la menor cantidad de datos lleva a una mayor incertidumbre, por ello, se concluye que se requiere de mayor información para considerar este sector como potencial para la mineralización cuprífera.

Las muestras superficiales NNV1708 (6, color rojo, Figuras 5.11 y 5.12), fueron excluidas del modelamiento espacial, producto de su mala relación espacial con los sondajes y la escasa cantidad de inclusiones fluidas presente en las muestras.

Finalmente, se propone efectuar perforaciones al poniente y al oriente de los sondajes DDH1234 (4, color amarillo, Figura 5.13) y DDH1155 (3, color verde, Figura 5.13), respectivamente, con el motivo de obtener un modelamiento espacial de los datos más acabado y definir mejor la zona de posible mineralización. Además, también se propone profundizar los sondajes DDH0845 (0, color azul, Figura 5.13) y DDH0912 (1, color celeste, Figura 5.13), con el objetivo de determinar si efectivamente el sector oriental goza de una potencial mineralización.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Anthony, E. Y., Reynolds, T. J., & Beane, R. E. 1984. Identification of daughter minerals in fluid inclusions using scanning electron microscopy and energy dispersive analysis. *American Mineralogist*, 69(11–12): 1053–1057.
- Araya, V., Maldonado, A., & Astudillo, J. 2012. Geology of Carmen de Andacollo Deposit. XIII Congreso Geológico Chileno, 13: 25–27.
- Astudillo, N. 2008. Mineralogía magnética y paleomagnetismo en los megayacimientos tipo pórfido cuprífero Chuquicamata y El Teniente, Chile. Tesis de Geología. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 306p.
- Audétat, A., Pettke, T., Heinrich, C. A., & Bodnar, R. J. 2008. The composition of magmatic hydrothermal fluids in barren versus mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5): 877–908.
- Bakker, R. J., & Jansen, J. B. H. 1990. Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, 345(6270): 58–60.
- Beane, R. E., & Titley, S. R. 1981. Porphyry copper deposits; Part II, Hydrothermal alteration and mineralization. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 235–269.
- Becker, S. P. 2007. Fluid Inclusion Characteristics in Magmatic-hydrothermal Ore Deposits. PhD Dissertation. Virginia Tech, Blacksburg. 150p.
- Becker, S. P., Bodnar, R. J., & Reynolds, T. J. 2019. Temporal and spatial variations in characteristics of fluid inclusions in epizonal magmatic-hydrothermal systems: Applications in exploration for porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 204: 240–255.
- Bodnar, R. J. 1981. Use of fluid inclusions in mineral exploration: Comparison of observed features with theoretical and experimental data on ore genesis. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 13: 412.
- Bodnar, R. J. 1982. Fluid inclusions in porphyry-type deposits. State University: Mineral Deposits Research Review for Industry.
- Bodnar, R. J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Economic Geology*, 78(3): 535–542.
- Bodnar, R. J. 1995. Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 23: 139–152.
- Bodnar, R. J. 2003. Introduction to aqueous fluid systems. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 32: 81–99.
- Bodnar, R. J., Burnham, C. W., & Sterner, S. M. 1985a. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1000 °C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(9): 1861–1873.

- Bodnar, R. J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D., & Steele-MacInnis, M. 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. En: Holland, H. D., & Turekian, K. K. (Eds.). Treatise on Geochemistry, Second edition, 13. Oxford, Elsevier. 119–142.
- Bodnar, R. J., Reynolds, T. J., & Kuehn, C. A. 1985b. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 2: 73–97.
- Burnham, C. W. 1979. Magmas and hydrothermal fluids, En: Barnes, H. L. (Eds.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, John Wiley & Sons. 71–136.
- Burnham, C. W. 1997. Magmas and hydrothermal fluids. En: Barnes, H. L. (Eds.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, Wiley & Sons. 63–123.
- Caddey, S., & Ponce, E. 2004. Análisis estructural, Control de la mineralización, Historia de deformación Tectónica y Blancos de Exploración para el Pórfido Cuprífero Carmen de Andacollo, Chile.
- Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile. 267p.
- Candela, P. A. 1991. Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments. *American Mineralogist*, 76(7–8): 1081–1091.
- Candela, P. A. 1992. Controls on ore metal ratios in granite-related ore systems: An experimental and computational approach. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1–2): 317–326.
- Candela, P. A., & Holland, H. D. 1986. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits. *Economic Geology*, 81(1): 1–19.
- Candela, P. A., & Piccoli, P. M. 2005. Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 25–37.
- Cathles, L. M. 1977. An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling. *Economic Geology*, 72(5): 804–826.
- Chávez, W. 2000. Supergene Oxidation of Copper Deposits: Zoning and Distribution of Copper Oxide Minerals. *SEG Newsletter, Society of Economic Geologists*, 41: 10–21.
- Clark, A. H. 1993. Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive?. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 2: 213–283.
- Cline, J. S. 1995. Genesis of porphyry copper deposits: The behavior of water, chloride, and copper in crystalline melts. *Arizona Geological Society Digest*, 20: 69–82.
- Cline, J. S., & Bodnar, R. J. 1994. Direct evolution of a brine from crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, molybdenum deposit. *Economic Geology*, 89(8): 1780–1802.
- Cloos, M. 2001. Bubbling magma chambers, cupolas, and porphyry copper deposits. *International Geology Review*, 43(4): 285–311.

- Córdova, C. 1973. Observaciones mineralógicas preliminares de la muestra Andacollo n. 5. Delft University of Technology.
- Cox, D. P., & Singer, D. A. 1992. Distribution of gold in porphyry copper deposits. U.S. Geological Survey Bulletin, 1877: C1–C14.
- Dewey, J. F. 1980. Episodicity, sequence and style at convergent plate boundaries. Geological Association of Canada Special Paper, 20: 553–573.
- Dilles, J. H. 1987. The petrology of the Yerington batholith, Nevada: Evidence for the evolution of porphyry copper ore fluids. *Economic Geology*, 82(7): 1750–1789.
- Drummond, S., & Ohmoto, H. 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1): 126–147.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., & Inan, E. E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10: 285–314.
- Emparan, C., & Pineda, G. 2006. Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 96. 85p., 1 mapa escala 1:100,000. Santiago.
- Enns, S. G., Thompson, J. F. H., Stanley, C. R., & Lang, J. R. 1995. The Galore Creek porphyry copper-gold deposits, northwestern British Columbia. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Special Volume*, 46: 630–644.
- Fournier, R. O. 1987. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems. En: Decker, R. W., Wright, T. L., Stauffer, P. H. (Eds.). *Volcanism in Hawaii*. vol. 2. Washington, United States Government Printing Office. 1487–1506.
- Fournier, R. O. 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1211.
- Frei, R. 1995. Evolution of mineralizing fluid in the porphyry copper system of the Skouries deposit, northeast Chalkidiki (Greece): Evidence from combined Pb-Sr and stable isotope data. *Economic Geology*, 90(4): 746–762.
- Giggenbach, W. F. 1992. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Economic Geology*, 87: 1927–1944.
- Goldstein, R. H., & Reynolds, J. T. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course*, 31. SEPM. Oklahoma. 213p.
- Gustafson, L. B. 1978. Some major factors of porphyry copper genesis. *Economic Geology*, 73(5): 600–607.
- Gustafson, L. B., & Hunt, J. P. 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5): 857–912.
- Hall, D. L., & Sterner, S. M. 1993. Preferential water loss from synthetic fluid inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(4): 489–500.

- Hall, D. L., & Wheeler, J. R. 1992. Fluid composition and the decrepitation behavior of synthetic fluid inclusions in quartz. PACROFI IV Abstract Volume. Lake Arrowhead, California. 39p.
- Hammarstrom, J. M., Zientek, M. L., Parks, H. L., Dicken, C. L., & the U.S. Geological Survey Global Copper Mineral Resource Assessment Team. 2019. Assessment of undiscovered copper resources of the world, 2015. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5160, 619 p.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., Jr., & Reynolds, T. J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404.
- Heinrich, C. A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study. *Mineralium Deposita*, 39(8): 864–889.
- Heinrich, C. A., Driesner, T., Stefánsson, A., & Seward, T. M. 2004. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits. *Geology*, 32(9): 761–764.
- Henley, R. W., & Brown, K. L. 1985. A practical guide to the thermodynamics of geothermal fluids and hydrothermal ore deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2: 25–44.
- Henley, R. W., & McNabb, A. 1978. Magmatic vapor plumes and groundwater interaction in porphyry copper emplacement. *Economic Geology*, 73(1): 1–20.
- Ishihara, S. 1981. The granitoid series and mineralization. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 458–484.
- Kay, S. M., Godoy, E., & Kurtz, A. 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117(1–2): 67–88.
- Kirkham, R. V. 1971. Intermineral intrusions and their bearing on the origin of porphyry copper and molybdenum deposits. *Economic Geology*, 66(8): 1244–1249.
- Klemm, L. M., Pettke, T., Heinrich, C. A., & Campos, E. 2007. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids. *Economic Geology*, 102(6): 1021–1045.
- Knapp, R. B., & Norton, D. 1981. Preliminary numerical analysis of processes related to magma crystallization and stress evolution in cooling pluton environments. *American Journal of Science*, 281(1): 35–68.
- Landtwing, M. R., Furrer, C., Redmond, P. B., Pettke, T., Guillong, M., & Heinrich, C. A. 2010. The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. III. Zoned copper-gold ore deposition by magmatic vapor expansion. *Economic Geology*, 105(1): 91–118.
- Landtwing, M. R., Pettke, T., Halter, W. E., Heinrich, C. A., Redmond, P. B., Einaudi, M. T., & Kunze, K. 2005. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-

- hydrothermal fluids: The Bingham porphyry. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2): 229–243.
- Lecumberri-Sanchez, P., Newton, M. C., Westman, E. C., Kamilli III, R. J., Canby, V. M., & Bodnar, R. J. 2013. Temporal and spatial distribution of alteration, mineralization and fluid inclusion types in the transitional epithermal-porphyry copper system at Red Mountain, AZ. *Journal of Geochemical Exploration*, 125: 80–93.
- Lindgren, W. 1905. The copper deposits of the Clifton-Morenci district, Arizona. U.S. Geological Survey Professional Paper, 43, 375p.
- Llaumett, P. C. 1983. Geología, mineralización y evaluación de reservas del yacimiento aurífero Andacollo. Sociedad Minera Aurífera Geraldo. La Serena, Chile. 81p.
- Llaumett, P. C., Olcay V. L., Marin B. C, Marquardt L. J., & Reyes F, E. 1975. El yacimiento cobre porfídico “Andacollo” Provincia de Coquimbo, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 2: 56–66.
- Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., & Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. *En*: Moreno, T., & Gibbons, W. (Eds.). *The geology of Chile*. London, The Geological Society. 179–199.
- Mangas, J., & Sierra, J. 1991. Las inclusiones fluidas: método de análisis e interpretación.
- Mavrogenes, J. A., & Bodnar, R. J. 1994. Hydrogen movement into and out of fluid inclusions in quartz: experimental evidence and geologic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 141–148.
- Meyer, C., & Hemley, J. J. 1967. Wall rock alteration. *En*: Barnes, H. L. (Eds.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, Holt, Rinehart and Winston. 166–235.
- Moncada, D., & Bodnar, R. J. 2012. Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. *Open Geosciences*, 4(2): 300–309.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T. J., Rimstidt, J. D., & Bodnar, R. J. 2012. Mineral textures and fluid inclusions petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 114: 20–35.
- Moore, W. J., & Nash, J. T. 1974. Alteration and fluid inclusion studies of the porphyry copper ore body at Bingham, Utah. *Economic Geology*, 69(5): 631–645.
- Müller, R. 1986. Geología y mineralización del distrito aurífero de Andacollo $-30^{\circ}14'30''S$, $71^{\circ}06'30''W$ – IV Región, Chile. La Serena, Universidad La Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Minas. 61p.
- Munz, I. A. 2001. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications. *Lithos*, 55(1–4): 195–212.

- Nash, J. T. 1976. Fluid inclusion petrology – data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S. Geological Survey Professional Paper, 907–D: 1–16.
- Nash, J. T., & Cunningham, C. G., Jr. 1973. Fluid-inclusion studies of the fluorspar and gold deposits, Jamestown district, Colorado. *Economic Geology*, 68(8): 1247–1262.
- Nash, J. T., & Theodore, T. G. 1971. Ore fluids in a porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada. *Economic Geology*, 66(3): 385–399.
- Nilo, M. V., Araya, V., Lagos, R. F., & Schmidt, R. 2015. Structural Geology at Teck Carmen de Andacollo. XIV Congreso Geológico Chileno, 14: 268–271.
- Ossandón, G., Fréaut, R., Gustafson, L. B., Lindsay, D. D., & Zentilli, M. 2001. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report. *Economic Geology*, 96(2): 249–270.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J.A., & Lunar, R. 1996. The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited; a model based on fluid inclusion and geologic evidence. *Economic Geology*, 91(7): 1298–1309.
- Pardo, M., Monfret, T., & Comte, D. 2000. Sismotectónica y distribución de esfuerzos en la zona de subducción subhorizontal de Chile Central (30°S-32°S), utilizando datos telesísmicos. IX Congreso Geológico Chileno, Actas, 2: 459–463.
- Parra, J. C., & Yañez, G. 1988. Provincias magnéticas de Chile Central. *Revista Geológica de Chile*, 15(2): 101–117.
- Pudack, C., Halter, W. E., Heinrich, C. A., & Pettke, T. 2009. Evolution of magmatic vapor to gold-rich epithermal liquid: The porphyry to epithermal transition at Nevados de Famatina, northwest Argentina. *Economic Geology*, 104(4): 449–477.
- Redmond, P. B., Einaudi, M. T., Inan, E. E., Landtwing, M. R., & Heinrich, C. A. 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposits, Utah. *Geology*, 32(3): 217–220.
- Reyes, M. 1991. The Andacollo strata-bound gold deposit, Chile, and its position in a porphyry copper-gold system. *Economic Geology*, 86(6): 1301–1316.
- Richards, J. P. 2000. Lineaments revisited. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 42(1): 14–20.
- Richards, J. P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533.
- Richards, J. P. 2005. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits. En: Porter, T. M. (Eds.). *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*. Adelaide, PGC Publishing. 7–25.
- Roedder, E. 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Economic Geology*, 66(1): 98–118.
- Roedder, E. 1972. Composition of fluid inclusions. En: Michael Fleischer (Eds.). *Data of geochemistry*, 6. U.S. Geological Survey Professional Paper, 440–JJ. 164p.

- Roedder, E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12. Mineralogical Society of America. Washington D. C. 644p.
- Roedder, E., & Bodnar, R. J. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. En: Barnes, H. L. (Eds.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, Wiley & Sons. 657–698.
- Rusk, B. G., Miller, B. J., & Reed, M. H. 2008b. Fluid-inclusion evidence for the formation of Main Stage polymetallic base-metal veins, Butte, Montana, USA. *Arizona Geological Society Digest*, 22: 573–581.
- Rusk, B. G., Reed, M. H., & Dilles, J. H. 2008a. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology*, 103(2): 307–334.
- Rye, R. O. 1993. The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment: The stable isotope perspective. *Economic Geology*, 88(3): 733–752.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Jr., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A., & Barton, M. D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 251–298.
- Shinohara, H. 1994. Exsolution of immiscible vapor and liquid phases from a crystallizing silicate melt: Implications for chlorine and metal transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5215–5221.
- Shinohara, H., & Hedenquist, J. W. 1997. Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines. *Journal of Petrology*, 38(12): 1741–1752.
- Shinohara, H., Kazahaya, K., & Lowenstern, J. B. 1995. Volatile transport in a convecting magma column: Implications for porphyry Mo mineralization. *Geology*, 23(12): 1091–1094.
- Sillitoe, R. H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184–197.
- Sillitoe, R. H. 1988. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(1): 89–108.
- Sillitoe, R. H. 1998. Major regional factors favouring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits. En: Porter, T. M. (Eds.). *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective*. Adelaide, Australian Mineral Foundation. 21–34.
- Sillitoe, R. H. 2000. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13: 315–345.
- Sillitoe, R. H. 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 723–768.
- Sillitoe, R. H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1): 3–41.

- Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10: 315–343.
- Sillitoe, R. H., & Perelló, J. 2005. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 845–890.
- Staude, J. M. G., & Barton, M. D. 2001. Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(10): 1357–1374.
- Student, J. J., & Bodnar, R. J. 1999. Synthetic fluid inclusions XIV: microthermometric and compositional analysis of coexisting silicate melt and aqueous fluid inclusions trapped in the haplogranite-H₂O-NaCl-KCl system at 800 °C and 2000 bars. *Journal of Petrology*, 40(10): 1509–1525.
- Sun, M., Monecke, T., Reynolds, T. J., & Yang, Z. 2020. Understanding the evolution of magmatic-hydrothermal systems based on microtextural relationships, fluid inclusion petrography, and quartz solubility constraints: insights into the formation of the Yulong Cu-Mo porphyry deposit, eastern Tibetan Plateau, China. *Mineralium Deposita*, 1–20.
- Takada, A. 1994. The influence of regional stress and magmatic input on styles of monogenetic and polygenetic volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 99(B7): 13563–13573.
- Takenouchi, S., & Kennedy, G. C. 1964. The binary system H₂O-CO₂ at high temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 262(9): 1055–1074.
- Tarantola, A., Diamond, L. W., Stünitz, H., Thust, A., & Pec, M. 2012. Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress. III: Influence of principal stresses on inclusion density and orientation. *Contributions to mineralogy and petrology*, 164(3): 537–550.
- Teck Resources Limited. 2021. 2020 Annual Information Form.
- Theodore, T. G., & Nash, J. T. 1973. Geochemical and fluid zonation at Copper Canyon, Lander County, Nevada. *Economic Geology*, 68(4): 565–570.
- Tosdal, R. M., & Richards, J. P. 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *Reviews in Economic Geology*, 14: 157–181.
- Ulrich, T., Günther, D., & Heinrich, C. A. 2001. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96: 1743–1774.
- Van den Kerkhof, A. M., & Hein, U. F. 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.
- Viti, C., & Frezzotti, M. L. 2001. Transmission electron microscopy applied to fluid inclusion investigations. *Lithos*, 55(1–4): 125–138.
- von Huene, R., & Scholl, D. W. 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Reviews of Geophysics*, 29(3): 279–316.

- Williams-Jones, A. E., & Heinrich, C. A. 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 100(7): 1287–1312.
- Williams-Jones, A. E., Migdisov, A. A., Archibald, S. M., & Xiao, Z. F. 2002. Vapor-transport of ore metals. *Geochemical Society Special Publication*, 7: 279–305.
- Zolensky, M. E., & Bodnar, R. J. 1982. Identification of fluid inclusion daughter minerals using Gandolfi X-ray techniques. *American Mineralogist*, 67(1–2): 137–141.

9. ANEXOS

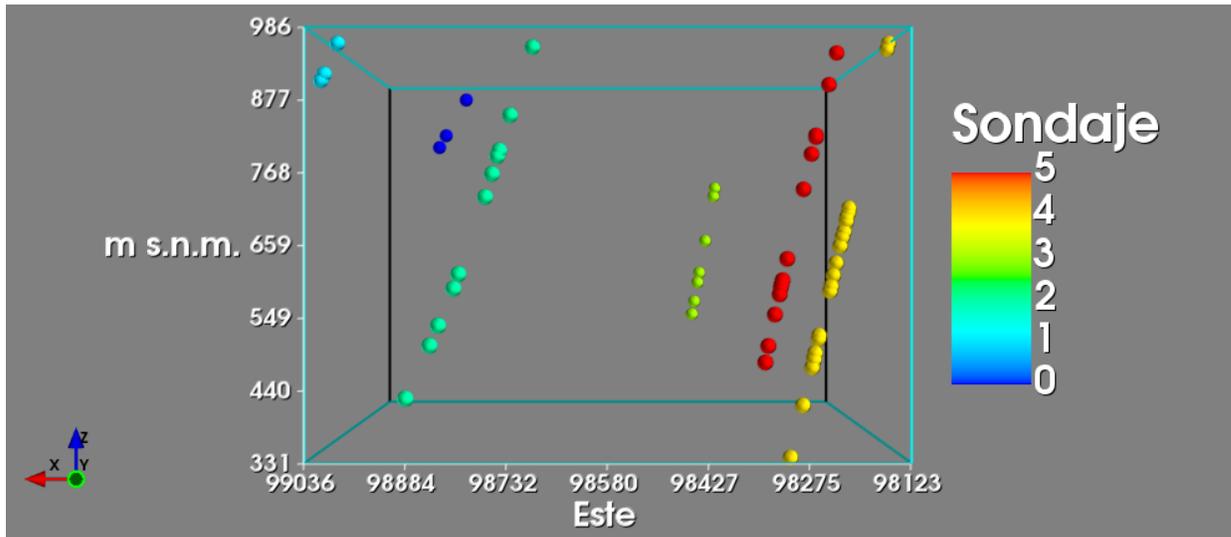


Figura A.1: Representación 3D rotada 180° de los sondajes seleccionados: DDH0845 (0, color azul); DDH0912 (1, color celeste); DDH1149 (2, color verde agua); DDH1155 (3, color verde); DDH1234 (4, color amarillo); DDH1241 (5, color rojo). Vista en perfil.

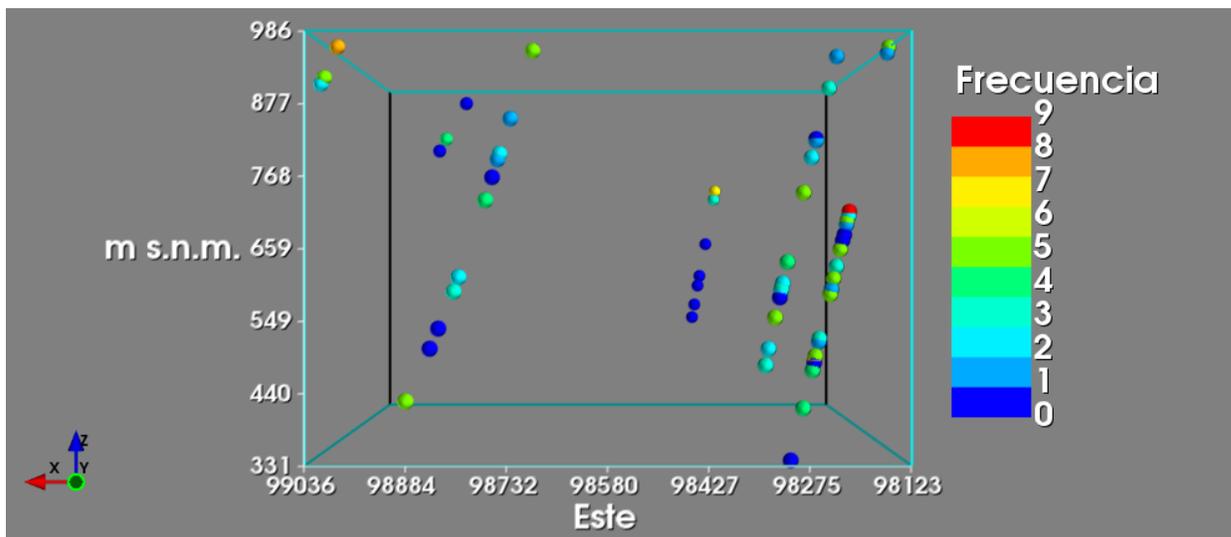


Figura A.2: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo L+V. Vista en perfil.

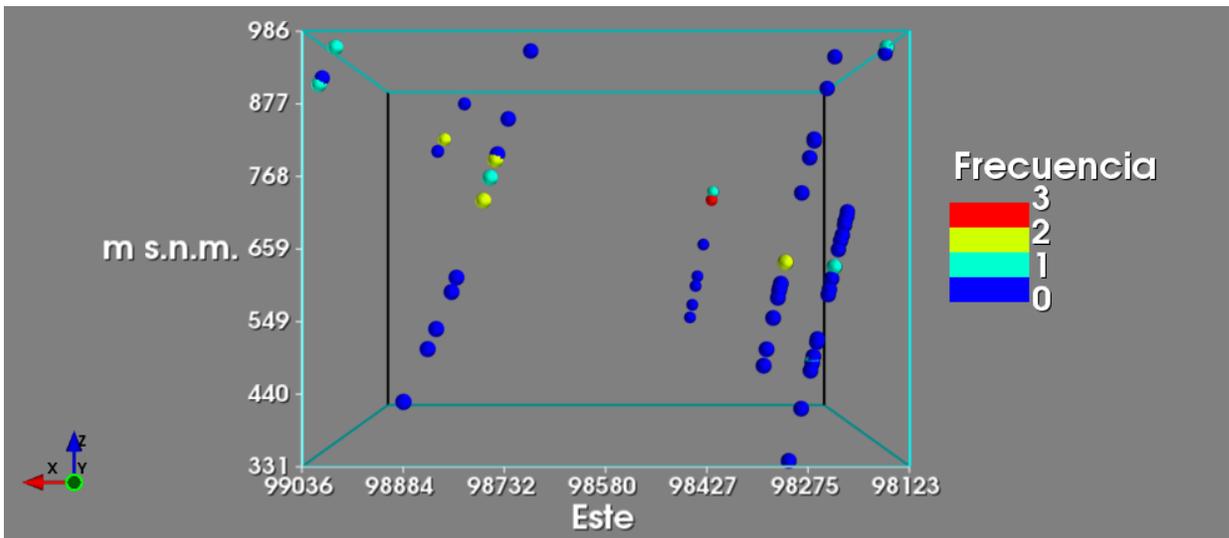


Figura A.3: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo L_H+V . Vista en perfil.

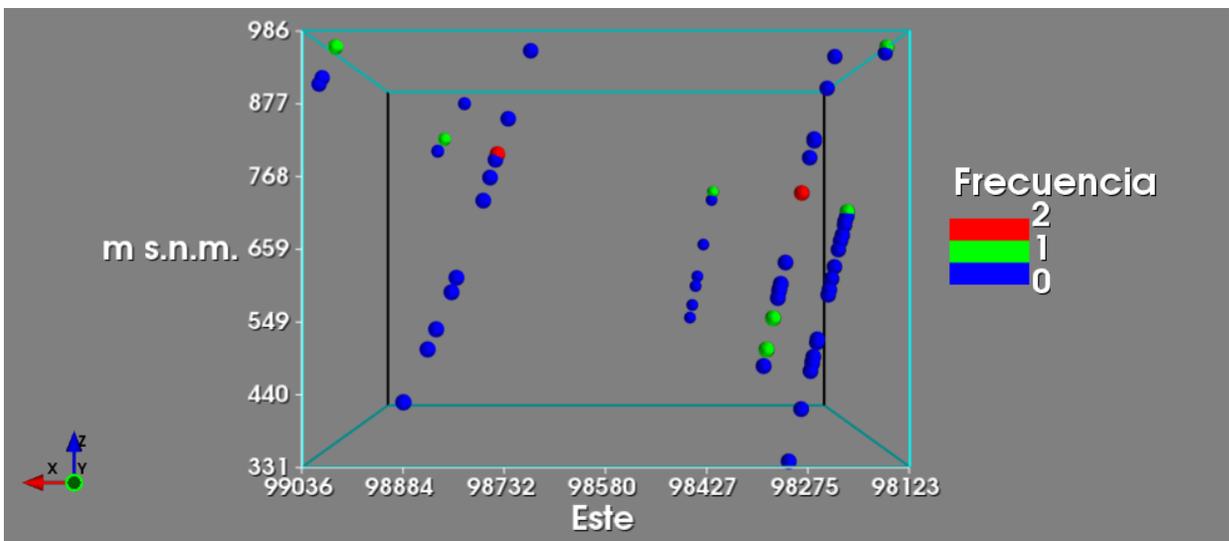


Figura A.4: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo V_H . Vista en perfil.

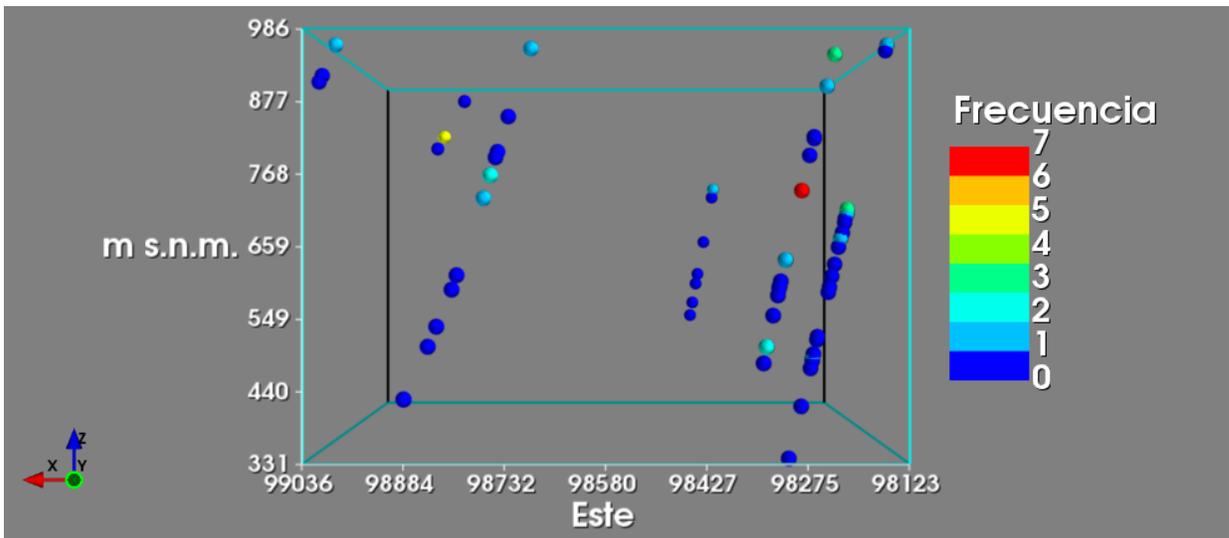


Figura A.5: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo V. Vista en perfil.

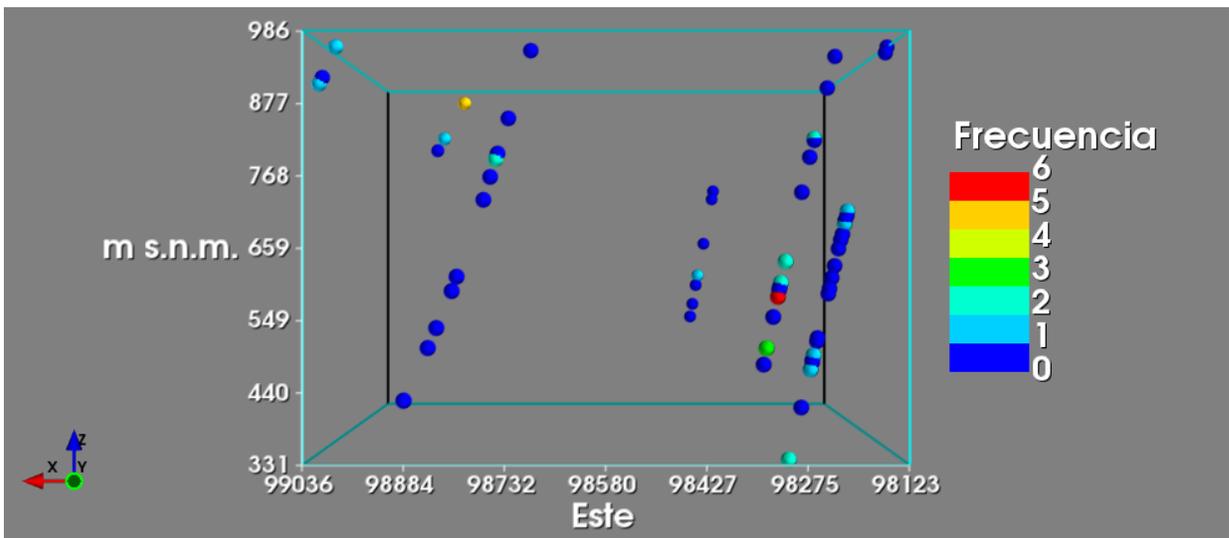


Figura A.6: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo Cp. Vista en perfil.

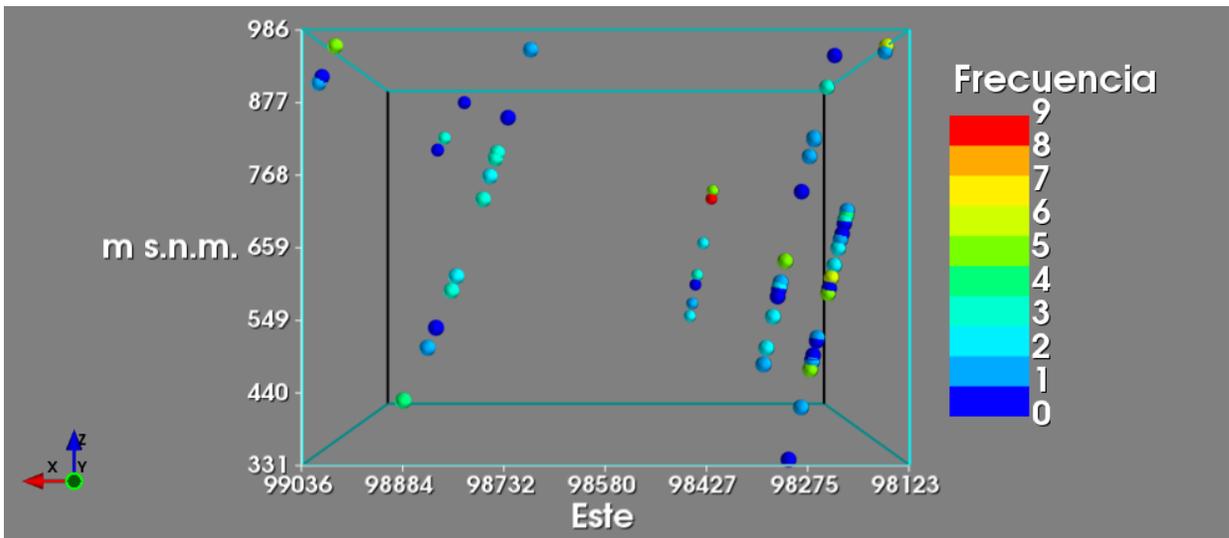


Figura A.7: Representación 3D rotada 180° de los sondajes, en función de los FIAs tipo H. Vista en perfil.

Tabla A.1: Resultados de la caracterización de inclusiones fluidas.

Sondaje	Muestra	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H
DDH0845	152.55	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
DDH0845	230.9	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
DDH0845	256.2	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
DDH0912	67.3	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
DDH0912	120.62	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DDH0912	132.3	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1
DDH1149	55.9	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
DDH1149	174.25	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
DDH1149	233.8	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
DDH1149	243.68	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
DDH1149	273.15	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
DDH1149	311.3	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
DDH1149	439.15	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1149	463.31	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1149	525.62	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DDH1149	558.68	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
DDH1149	645.8	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1155	271.55	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
DDH1155	288.93	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
DDH1155	385.35	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
DDH1155	453.38	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
DDH1155	473.75	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
DDH1155	513.88	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
DDH1155	540.22	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
DDH1234	56.45	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
DDH1234	67	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	341.1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1
DDH1234	348.45	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
DDH1234	357.2	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	363.9	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
DDH1234	380.0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
DDH1234	389.6	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
DDH1234	404.8	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	433.55	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
DDH1234	452.67	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	471.57	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DDH1234	479.1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	552.6	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	557.8	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
DDH1234	580.95	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
DDH1234	588.95	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
DDH1234	591.55	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
DDH1234	603.3	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
DDH1234	665.35	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1234	748.45	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
DDH1241	61.05	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
DDH1241	116.1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
DDH1241	202.85	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
DDH1241	206.25	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1241	234.3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1241	294.15	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
DDH1241	408.8	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
DDH1241	443.25	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
DDH1241	450.45	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
DDH1241	454.85	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
DDH1241	465.65	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
DDH1241	498.5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
DDH1241	548.28	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
DDH1241	574.14	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
NNA1708	002	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
MMV1708	004	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NNV1708	007	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
NNV1708	009	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
NNV1708	011	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
NNV1708	015	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NNV1708	016	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
		43	30	13	45	12	10	17	61	16	42
		65.15%	45.45%	19.70%	68.18%	18.18%	15.15%	25.76%	92.42%	24.24%	63.64%
		Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H

Tabla A.2: Resultados de la caracterización de inclusiones fluidas en vetillas A.

Sondaje	Muestra	Vetilla A	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H
DDH0845	230.9	1	1	1	1	1	1	1	1
DDH0912	120.62	1	1				1		
DDH0912	132.3	1	1	1			1	1	1
DDH1149	55.9	1	1			1	1		1
DDH1149	174.25	1	1				1		
DDH1149	243.68	1	1	1			1	1	1
DDH1149	273.15	1		1		1	1		1
DDH1149	311.3	1	1	1		1	1		1
DDH1149	439.15	1	1				1		1
DDH1149	525.62	1							
DDH1149	645.8	1	1				1		1
DDH1155	271.55	1	1	1	1	1	1		1
DDH1155	288.93	1	1	1					1
DDH1155	473.75	1					1		
DDH1155	513.88	1					1		1
DDH1155	540.22	1					1		1
DDH1234	56.45	1	1	1	1	1	1		1
DDH1234	67	1	1				1		1
DDH1234	341.1	1	1		1	1	1	1	1
DDH1234	348.45	1	1			1	1		1
DDH1234	363.9	1	1				1	1	
DDH1234	389.6	1				1	1		1
DDH1234	404.8	1	1				1		1
DDH1234	433.55	1	1	1			1		1
DDH1234	452.67	1	1				1		1
DDH1234	471.57	1	1				1		
DDH1234	552.6	1	1				1		1
DDH1234	580.95	1	1				1	1	
DDH1234	591.55	1					1		1
DDH1234	603.3	1	1				1	1	1
DDH1234	665.35	1	1				1		1
DDH1234	748.45	1					1	1	
DDH1241	61.05	1	1			1	1		
DDH1241	116.1	1	1			1	1		1
DDH1241	294.15	1	1		1	1			
DDH1241	443.25	1	1				1	1	1
DDH1241	465.65	1					1	1	
DDH1241	548.28	1	1		1	1	1	1	1
NNA1708	002	1					1		
MMV1708	004	1							
NNV1708	011	1					1		
NNV1708	015	1							
NNV1708	016	1	1		1	1	1		
		43	30	9	7	14	38	11	27
		100.00%	69.77%	20.93%	16.28%	32.56%	88.37%	25.58%	62.79%
		Vetilla A	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H

Tabla A.3: Resultados de la caracterización de inclusiones fluidas en vetillas B.

Sondaje	Muestra	Vetilla B	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H
DDH0845	152.55	1					1	1	
DDH0845	256.2	1					1		
DDH0912	67.3	1	1	1	1	1	1	1	1
DDH1149	55.9	1	1				1		1
DDH1149	233.8	1	1		1		1		1
DDH1149	243.68	1	1	1			1	1	1
DDH1149	439.15	1	1				1		1
DDH1149	463.31	1	1				1		1
DDH1149	558.68	1					1		1
DDH1155	453.38	1					1	1	1
DDH1155	473.75	1					1		
DDH1234	67	1	1				1		1
DDH1234	348.45	1	1			1	1		1
DDH1234	389.6	1				1	1		1
DDH1234	479.1	1	1				1		1
DDH1234	552.6	1	1				1		1
DDH1234	557.8	1	1				1		
DDH1234	588.95	1	1	1		1	1		
DDH1234	591.55	1					1		1
DDH1234	603.3	1	1				1	1	1
DDH1241	206.25	1	1				1		1
DDH1241	234.3	1	1				1		1
DDH1241	408.8	1	1	1		1	1	1	1
DDH1241	450.45	1	1				1		1
DDH1241	454.85	1	1				1		
DDH1241	498.5	1	1		1		1		1
DDH1241	548.28	1	1		1	1	1	1	1
DDH1241	574.14	1	1				1		1
NNV1708	007	1	1				1		
NNV1708	009	1					1		
		30	22	4	4	7	30	7	22
		100.00%	73.33%	13.33%	13.33%	23.33%	100.00%	23.33%	73.33%
		Vetilla B	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H

Tabla A.4: Resultados de la caracterización de inclusiones fluidas en vetillas D.

Sondaje	Muestra	Vetilla D	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H
DDH0845	230.9	1	1	1	1	1	1	1	1
DDH0845	256.2	1					1		
DDH1149	174.25	1	1				1		
DDH1149	233.8	1	1		1		1		1
DDH1149	243.68	1	1	1			1	1	1
DDH1155	385.35	1					1		1
DDH1155	453.38	1					1	1	1
DDH1234	357.2	1	1				1		1
DDH1234	380.0	1					1		
DDH1234	433.55	1	1	1			1		1
DDH1241	61.05	1	1			1	1		
DDH1241	116.1	1	1			1	1		1
DDH1241	202.85	1					1	1	1
		13	8	3	2	3	13	4	9
		100.00%	61.54%	23.08%	15.38%	23.08%	100.00%	30.77%	69.23%
		Vetilla D	L+V	L _H +V	V _H	V	L	Cp	H

Tabla A.5: Distribución de FIAs tipo L+V en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	L+V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH0912	120.62	1	1		
DDH0912	132.3	1	1		
DDH1149	55.9	1	1	1	
DDH1149	174.25	1	1		1
DDH1149	233.8	1		1	1
DDH1149	243.68	1	1	1	1
DDH1149	311.3	1	1		
DDH1149	439.15	1	1	1	
DDH1149	463.31	1		1	
DDH1149	645.8	1	1		
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1155	288.93	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	67	1	1	1	
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1234	348.45	1	1	1	
DDH1234	357.2	1			1
DDH1234	363.9	1	1		
DDH1234	404.8	1	1		
DDH1234	433.55	1	1		1
DDH1234	452.67	1	1		
DDH1234	471.57	1	1		
DDH1234	479.1	1		1	
DDH1234	552.6	1	1	1	
DDH1234	557.8	1		1	
DDH1234	580.95	1	1		
DDH1234	588.95	1		1	
DDH1234	603.3	1	1	1	
DDH1234	665.35	1	1		
DDH1241	61.05	1	1		1
DDH1241	116.1	1	1		1
DDH1241	206.25	1		1	
DDH1241	234.3	1		1	
DDH1241	294.15	1	1		
DDH1241	408.8	1		1	
DDH1241	443.25	1	1		
DDH1241	450.45	1		1	
DDH1241	454.85	1		1	
DDH1241	498.5	1		1	
DDH1241	548.28	1	1	1	
DDH1241	574.14	1		1	
NNV1708	007	1		1	
NNV1708	016	1	1		
		45	30	22	8
		100.00%	66.67%	48.89%	17.78%
		L+V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.6: Distribución de FIAs tipo L_H+V en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	L_H+V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH0912	132.3	1	1		
DDH1149	243.68	1	1	1	1
DDH1149	273.15	1	1		
DDH1149	311.3	1	1		
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1155	288.93	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	433.55	1	1		1
DDH1234	588.95	1		1	
DDH1241	408.8	1		1	
		12	9	4	3
		100.00%	75.00%	33.33%	25.00%
		L_H+V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.7: Distribución de FIAs tipo V_H en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	V_H	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH1149	233.8	1		1	1
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1241	294.15	1	1		
DDH1241	498.5	1		1	
DDH1241	548.28	1	1	1	
NNV1708	016	1	1		
		10	7	4	2
		100.00%	70.00%	40.00%	20.00%
		V_H	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.8: Distribución de FIAs tipo V en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH1149	55.9	1	1	1	
DDH1149	273.15	1	1		
DDH1149	311.3	1	1		
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1234	348.45	1	1	1	
DDH1234	389.6	1	1	1	
DDH1234	588.95	1		1	
DDH1241	61.05	1	1		1
DDH1241	116.1	1	1		1
DDH1241	294.15	1	1		
DDH1241	408.8	1		1	
DDH1241	548.28	1	1	1	
NNV1708	016	1	1		
		17	14	7	3
		100.00%	82.35%	41.18%	17.65%
		V	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.9: Distribución de FIAs tipo L en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	L	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	152.55	1		1	
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0845	256.2	1		1	1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH0912	120.62	1	1		
DDH0912	132.3	1	1		
DDH1149	55.9	1	1	1	
DDH1149	174.25	1	1		1
DDH1149	233.8	1		1	1
DDH1149	243.68	1	1	1	1
DDH1149	273.15	1	1		
DDH1149	311.3	1	1		
DDH1149	439.15	1	1	1	
DDH1149	463.31	1		1	
DDH1149	558.68	1		1	
DDH1149	645.8	1	1		
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1155	385.35	1			1
DDH1155	453.38	1		1	1
DDH1155	473.75	1	1	1	
DDH1155	513.88	1	1		
DDH1155	540.22	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	67	1	1	1	
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1234	348.45	1	1	1	
DDH1234	357.2	1			1
DDH1234	363.9	1	1		
DDH1234	380.0	1			1
DDH1234	389.6	1	1	1	
DDH1234	404.8	1	1		
DDH1234	433.55	1	1		1
DDH1234	452.67	1	1		
DDH1234	471.57	1	1		
DDH1234	479.1	1		1	
DDH1234	552.6	1	1	1	
DDH1234	557.8	1		1	
DDH1234	580.95	1	1		
DDH1234	588.95	1		1	
DDH1234	591.55	1	1	1	
DDH1234	603.3	1	1	1	
DDH1234	665.35	1	1		
DDH1234	748.45	1	1		
DDH1241	61.05	1	1		1
DDH1241	116.1	1	1		1
DDH1241	202.85	1			1
DDH1241	206.25	1		1	
DDH1241	234.3	1		1	
DDH1241	408.8	1		1	
DDH1241	443.25	1	1		
DDH1241	450.45	1		1	
DDH1241	454.85	1		1	
DDH1241	465.65	1	1		
DDH1241	498.5	1		1	
DDH1241	548.28	1	1	1	
DDH1241	574.14	1		1	
NNA1708	002	1	1		
NNV1708	007	1		1	
NNV1708	009	1		1	
NNV1708	011	1	1		
NNV1708	016	1	1		
		61	38	30	13
		100.00%	62.30%	49.18%	21.31%
		L	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.10: Distribución de FIAs tipo Cp en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	Cp	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	152.55	1		1	
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH0912	132.3	1	1		
DDH1149	243.68	1	1	1	1
DDH1155	453.38	1		1	1
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1234	363.9	1	1		
DDH1234	580.95	1	1		
DDH1234	603.3	1	1	1	
DDH1234	748.45	1	1		
DDH1241	202.85	1			1
DDH1241	408.8	1		1	
DDH1241	443.25	1	1		
DDH1241	465.65	1	1		
DDH1241	548.28	1	1	1	
		16	11	7	4
		100.00%	68.75%	43.75%	25.00%
		Cp	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.11: Distribución de FIAs tipo H en cada vetilla.

Sondaje	Muestra	H	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D
DDH0845	230.9	1	1		1
DDH0912	67.3	1		1	
DDH0912	132.3	1	1		
DDH1149	55.9	1	1	1	
DDH1149	233.8	1		1	1
DDH1149	243.68	1	1	1	1
DDH1149	273.15	1	1		
DDH1149	311.3	1	1		
DDH1149	439.15	1	1	1	
DDH1149	463.31	1		1	
DDH1149	558.68	1		1	
DDH1149	645.8	1	1		
DDH1155	271.55	1	1		
DDH1155	288.93	1	1		
DDH1155	385.35	1			1
DDH1155	453.38	1		1	1
DDH1155	513.88	1	1		
DDH1155	540.22	1	1		
DDH1234	56.45	1	1		
DDH1234	67	1	1	1	
DDH1234	341.1	1	1		
DDH1234	348.45	1	1	1	
DDH1234	357.2	1			1
DDH1234	389.6	1	1	1	
DDH1234	404.8	1	1		
DDH1234	433.55	1	1		1
DDH1234	452.67	1	1		
DDH1234	479.1	1		1	
DDH1234	552.6	1	1	1	
DDH1234	591.55	1	1	1	
DDH1234	603.3	1	1	1	
DDH1234	665.35	1	1		
DDH1241	116.1	1	1		1
DDH1241	202.85	1			1
DDH1241	206.25	1		1	
DDH1241	234.3	1		1	
DDH1241	408.8	1		1	
DDH1241	443.25	1	1		
DDH1241	450.45	1		1	
DDH1241	498.5	1		1	
DDH1241	548.28	1	1	1	
DDH1241	574.14	1		1	
		42	27	22	9
		100.00%	64.29%	52.38%	21.43%
		H	Vetilla A	Vetilla B	Vetilla D

Tabla A.12: Base de datos utilizada para el modelamiento 3D.

DDH	Mid X	Mid Y	Mid Z	L+V	L ₊ +V	V _H	V	Cp	H
0	98845	52296	930	0	0	0	0	5	0
0	98884	52283	864	4	2	1	5	1	3
0	98897	52279	842	0	0	0	0	0	0
1	99010	52748	979	8	1	1	1	1	5
1	99031	52749	930	5	0	0	0	0	0
1	99036	52749	920	2	1	0	0	1	1
2	98699	52757	972	5	0	0	1	0	1
2	98733	52784	862	1	0	0	0	0	0
2	98749	52797	806	2	0	2	0	0	3
2	98752	52799	797	1	2	0	0	2	3
2	98760	52805	769	0	1	0	2	0	2
2	98770	52812	733	4	2	0	1	0	3
2	98809	52839	614	2	0	0	0	0	2
2	98816	52845	592	3	0	0	0	0	3
2	98838	52859	536	0	0	0	0	0	0
2	98850	52868	506	0	0	0	0	0	1
2	98884	52889	428	5	0	0	0	0	4
3	98356	51949	777	7	1	1	1	0	5
3	98359	51952	760	3	3	0	0	0	9
3	98377	51966	667	0	0	0	0	0	2
3	98390	51976	601	0	0	0	0	1	3
3	98394	51979	581	0	0	0	0	0	0
3	98401	51984	542	0	0	0	0	0	1
3	98406	51988	516	0	0	0	0	0	2
4	98123	52692	986	5	1	1	1	0	6
4	98126	52695	976	1	0	0	0	0	1
4	98196	52750	717	9	0	1	3	1	1
4	98197	52751	710	2	0	0	1	0	4
4	98200	52753	702	5	0	0	0	0	3
4	98201	52754	696	1	0	0	0	1	0
4	98205	52757	680	0	0	0	0	0	0
4	98208	52759	671	0	0	0	1	0	1
4	98212	52762	657	5	0	0	0	0	2
4	98219	52768	630	3	1	0	0	0	2
4	98224	52771	611	5	0	0	0	0	6
4	98228	52775	594	1	0	0	0	0	0
4	98230	52776	586	5	0	0	0	0	5
4	98249	52791	517	3	0	0	0	0	1
4	98250	52792	512	1	0	0	0	0	0
4	98256	52796	490	5	0	0	0	1	0
4	98258	52797	482	7	1	0	1	0	0
4	98258	52798	480	0	0	0	0	0	1
4	98261	52800	468	4	0	0	0	1	5
4	98277	52812	410	4	0	0	0	0	1
4	98298	52827	331	0	0	0	0	2	0
5	98213	52730	966	1	0	0	3	0	0
5	98227	52742	914	3	0	0	1	0	3
5	98250	52760	832	0	0	0	0	2	1
5	98250	52761	829	1	0	0	0	0	1
5	98258	52767	802	2	0	0	0	0	1
5	98272	52779	746	5	0	2	7	0	0
5	98300	52801	637	4	2	0	1	2	5
5	98308	52807	604	2	0	0	0	2	1
5	98310	52809	597	3	0	0	0	0	2
5	98311	52809	593	2	0	0	0	0	0
5	98313	52811	582	0	0	0	0	6	0
5	98321	52817	551	5	0	1	0	0	2
5	98332	52825	503	2	0	1	2	3	2
5	98337	52830	478	3	0	0	0	0	1
6	97877	53810	1018	0	0	0	0	0	0
6	96951	52580	1047	0	0	0	0	0	0
6	96996	52590	1048	1	0	0	0	0	0
6	97045	52710	1101	0	0	0	0	0	0
6	96876	52540	1039	0	0	0	0	0	0
6	95445	51690	1194	0	0	0	0	0	0
6	95748	51720	1157	7	0	2	1	0	0

Tabla A.13: Abreviaciones minerales utilizadas en este trabajo.

Abreviación	Mineral
adul	adularia
Ag	plata nativa
alb	albita
anh	anhidrita
Au	oro nativo
bn	bornita
bt	biotita
cal	calcita
caol	caolinita
chl	clorita
cp	calcopirita
cv	covelina
en	enargita
epi	epidota
Kfel	feldespato potásico
mag	magnetita
mo	molibdenita
py	pirita
qz	cuarzo
ser	sericita