



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

**DOCUMENTO SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS VIII: EXPLORACIÓN
DE METALES PRECIOSOS
EN LA VETA DON LEOPOLDO, DISTRITO MINERO DE ALHUÉ, REGIÓN
METROPOLITANA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JEAN ERICK HESS ALBORNOZ

PROFESOR GUÍA:
JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CLAUDIA CANNATELLI
GREGORY DE PASCALE

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA

OPTAR AL TITULO DE: Geólogo

POR: Jean Erick Hess Albornoz

FECHA: 14/06/2019

PROF. GUÍA: Daniel Moncada

Estudio de inclusiones fluidas para exploración de metales preciosos en veta Don Leopoldo, Distrito minero de Alhué.

La minería del cobre, y más recientemente la del litio, suelen acaparar la atención respecto a la industria de metales preciosos en Chile. Sin embargo la industria de oro y la plata también han generado importantes proyectos dentro del país. La demanda por metales preciosos y la dificultad de encontrarlos ha llevado a que nuevas técnicas sean buscadas con el fin de explorar por nuevos depósitos de estos elementos.

El presente trabajo se lleva a cabo en la veta Don Leopoldo ubicada en el distrito minero de Alhué. La traza de esta veta tiene un largo de aproximadamente 200 metros y rumbo NO-SE. Las muestras provienen desde testigos de sondajes y fueron proporcionadas por la compañía minera Yamana Gold.

Las rocas del área de estudio consisten principalmente de tobas y lavas andesíticas. Estas litologías tienen una edad mesozoica a cenozoica siendo la unidad más reciente la formación Lo Valle. Estas rocas hospedan varias vetas polimetálicas de cuarzo, con variadas cantidades de metales preciosos oro y plata, y menores cantidades de sulfuros de cobre, zinc y plomo.

El estudio de inclusiones fluidas en la veta Don Leopoldo permite definir al menos tres etapas en las cuales la mineralización procedió. Una primera etapa consiste de la deposición de minerales de ganga, los cuales precipitaron a partir de una solución ebullendo, atrapando inclusiones primarias ricas en vapor. Una segunda etapa se tradujo en la deposición de los principales metales oro y plata, junto con otros minerales económicos, por medio de una solución hidrotermal alcalina y reducida. Por último una etapa post-mineralización queda marcada por la formación de minerales de alteración como especularita, junto con el atrapamiento de inclusiones ricas en líquido, que dan cuenta de la nuevas condiciones oxidantes.

Las leyes de metales preciosos al interior del sistema no sobrepasaron los 4ppm y 38ppm para oro y plata, respectivamente. Evidencia de familias de inclusiones (FIA's) vapor en zonas primarias de cristales de cuarzo indican que ebullición tomo lugar desde los niveles más profundos de la veta. Basado en estos antecedentes se presume que grados más altos y económicos de estos elementos deberían encontrarse aún más en profundidad dentro del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria se ha realizado en el marco de proyectos Fondecyt 11170210, el cual se ha otorgado al profesor Daniel Moncada y además ha sido apoyada por la Universidad de Chile y la empresa minera Yamana Gold Inc.

Primero, me gustaría agradecer a mi familia por todo el apoyo, paciencia que me han entregado en todo momento y en todo sentido. Sin duda esto no hubiera sido posible sin el constante apoyo de cada uno de ellos.

Agradecerles a mis amigos, en especial a Aaron y Diego, con quienes siempre he compartido a lo largo de la carrera. También agradecer a mis compañeros de trabajo en la cafetería de la U Mayor, quienes también me han dado palabras de aliento y de quienes he aprendido muchas cosas.

Me gustaría agradecer además a Yamana Gold Inc. Y Minera Florida Ltda. por haber proporcionado las muestras y apoyado con información la realización de esta memoria.

Agradecerle por último al profesor Daniel Moncada, por resolver mis dudas cuando estas se presentaron y tener una muy buena disposición. Además a los profesores Gregory De Pascale y Claudia Cannatelli por ser parte de la comisión evaluadora de este trabajo.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Hipótesis de trabajo.....	2
1.3. Ubicación y Accesos.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Sistemas magmático-hidrotermal.....	4
2.1.1. Depósitos Epitermales.....	4
2.1.2. Depósitos mesotermales.....	8
2.2 Solubilidad de metales.....	9
2.2.1 Solubilidad del oro.....	9
2.2.2 Solubilidad de la plata.....	11
2.2.3. Solubilidad de cobre.....	14
2.2.4. Solubilidad de zinc.....	15
2.2.5. Solubilidad del plomo.....	16
2.3. Texturas diagnósticas de cuarzo y calcita.....	17
2.2.4. Inclusiones Fluidas.....	20
Procesos que pueden afectar una inclusión después del atrapamiento.....	22
3. MARCO GEOLÓGICO.....	23
3.1. Geología regional.....	23
3.2. Estratigrafía del distrito.....	24
2.3. Intrusivos.....	27
2.3. Mineralización.....	27
4. METODOLOGÍA.....	29
4.1. Análisis de muestras de mano.....	29
4.2. Preparación de cortes.....	30
4.3. Filosofía del estudio de inclusiones fluidas.....	31
4.4. Petrografía de inclusiones fluidas.....	32
5. RESULTADOS.....	34
5.1 Análisis de muestras de mano.....	34
5.2. Geoquímica.....	37
5.3. Texturas de minerales de ganga en la Veta Don Leopoldo.....	39
5.4. Petrografía de inclusiones fluidas.....	45
5.5. Distribución de metales en profundidad.....	51
6. DISCUSIONES.....	55
6.1. Geoquímica.....	55
6.2. Análisis textural.....	58
6.3. Petrografía.....	63
6.4. Petrografía de inclusiones fluidas.....	66
6.5. Evolución del fluido y ambiente de formación.....	70
6.6. Mecanismos de deposición.....	73
7. CONCLUSIONES.....	76
8. BIBLIOGRAFÍA.....	78
9. ANEXOS.....	82
Anexo A: Descripción muestras de mano.....	82
Anexo B: Resultados de análisis geoquímicos.....	88
Anexo C: Texturas minerales de ganga veta Don Leopoldo.....	91
Anexo D: Petrografía de inclusiones fluidas.....	94

Anexo E: Petrografía de inclusiones fluidas.....	100
Anexo F: Boiling Confidence Factor.....	103

Índice de figuras

Figura 1: Rutas de acceso y ubicación del área de estudio. Figura generada con el software Google Earth.....	3
Figura 2: Configuración geológica y características de los depósitos epitermales de alta sulfuración y baja sulfuración. También se sugiere un vínculo genético entre los depósitos de Au-Cu epitermales de alta sulfuración y los pórfidos subvolcánicos de tipo Cu-Au (Hedenquist et al., 2000).....	5
Figura 3: Etapas para la formación de un depósito de alta sulfidización. a) etapa inicial donde una fase vapor predominantemente magmática es responsable de lixiviar la roca caja y desarrollar un halo de alteración argílica avanzada alrededor del conducto principal. b1) Etapa de deposición de la mena, en este caso el oro es transportado como complejo clorurado y b2) el transporte de oro es por medio de complejos sulfurados. (Tomado de Arribas et al., 1995).....	7
Figura 4: Solubilidad del oro para un fluido magmático conteniendo 2.0 m ΣCl el cual se enfría desde 500°C a 300°C a presión constante de 1kbar (modelo isocórico). El estado de oxidación está fijado por la condición $f\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}=1$. El pH es fijado por la coexistencia de feldespato-K, moscovita y cuarzo (Tomado de Gammons y Williams, 1997).....	10
Figura 5: Solubilidad del oro en salmuera conteniendo $\Sigma\text{Cl}= 5\text{m}$ que se separa de una fase vapor a 500°C, y 0.5 kbars, y luego se enfría hasta los 300°C (Tomado de Gammons y Williams, 1997).....	11
Figura 6: Diagrama mostrando el área de predominio de la solubilidad de la plata y la especiación a 250 °C como una función del pH y el estado de oxidación. Las actividades del cloruro y ΣS son constantes a 0.1 y 0.01, respectivamente. (Tomado de Gammons y Barnes, 1989).....	12
Figura 7: Diagrama mostrando el área predominante para la solubilidad de la plata y la especiación como una función de la temperatura y el pH (Tomado de Gammons y Barnes, 1989).....	13
Figura 8: Líneas continuas muestran la concentración del complejo CuCl a 350°C, mientras las líneas discontinuas representan la concentración de los complejos $\{\text{Cu}(\text{HS})_2+\text{Cu}(\text{HS})_2(\text{H}_2\text{S})\}$ (Modificado de Crerar y Barnes, 1976).....	14
Figura 9: Diagrama de predominancia para complejos sulfurados de Zn-S-HS como una función del pH a $P = P_{\text{sat}}$, and $m(\text{S total}) = 0.1$. (Tomado de Tagirov y Seward, 2010).....	15
Figura 10: Texturas de sílice y calcita observadas en el ambiente epitermal. Las texturas A – M son características de una deposición rápida, como puede ocurrir durante la ebullición, mientras que las texturas N – R indican que los fluidos que precipitan el mineral no estaban ebulliciendo (Tomado de Moncada et al., 2012).....	20
Figura 11: Diferentes arreglos de inclusiones dentro de cristales prismáticos de cuarzo. Encerradas en contornos de color rosado se muestran inclusiones de tipo primario, las cuales pueden reconocerse dentro de zonas de crecimiento del cristal, como aisladas en el centro. Dentro de contornos celestes se observan inclusiones secundarias que suelen presentarse a lo largo de fracturas desarrolladas post-atrapamiento. En contornos amarillos se muestran inclusiones pseudosecundarias las cuales limitan abruptamente la zona de crecimiento del cristal.....	21
Figura 12: Mapa geológico de la zona de estudio (Modificado de Collins and Moore, 2010).....	27
Figura 13: Muestra de roca DM-153, mostrando mineralización de calcopirita y pirita.....	29
Figura 14: Máquina PetroThin utilizada para preparar los cortes de roca.....	31

Figura 15: Microscopio Olympus BX53, conectado con Linkam THN-600. Universidad de Chile.....	33
Figura 16: Muestras de mano pertenecientes a la veta Don Leopoldo. A. Alteración de tipo propilítica. B. Alteración de tipo argílica, marcada por la presencia de arcillas y cuarzo. C. Se presenta una brecha altamente alterada en su superficie, la cual se encuentra rellena por cuarzo con textura coloforme. D. Se muestran distintos tamaños de vetillas, algunas de las cuales están rellenas principalmente por epidota y clorita, y otras por cuarzo y clorita. E y F. Principales minerales de mena dentro del depósito, los cuales corresponden a calcopirita, esfalerita y galena.....	35
Figura 17: A y B. Se observa textura de cuarzo jigsaw tanto a nicoles paralelos como cruzados, la cual es ampliamente vista durante el estudio. C y D, muestran textura comb en la cual es posible ver arreglos de inclusiones primarias tanto ricas en líquido como vapor. E y F, se presenta cuarzo zonal, donde claramente las zonas de crecimiento están delimitadas por la presencia de inclusiones en el cristal.....	40
Figura 17: (Continuación) G y H, corresponde a un núcleo central de cuarzo prismático en el cual crecen pequeños cristales los cuales muestran un patrón de extinción plumoso. I y J, se observa textura de cuarzo crustiforme a nicoles cruzados y paralelos respectivamente, se puede observar como el grosor de cada banda varía entre 0.1 - 0.3 mm.....	41
Figura 18: Microfotografía mostrando texturas de calcita en hoja junto con sus productos de reemplazo por cristales de cuarzo. A y B muestran cristales de calcita en hojas de tamaños milimétricos a nicoles cruzados y paralelos respectivamente. C y D, muestran cuarzo reemplazando calcita, en la cual los antiguos moldes de calcita solo se reconocen debido a su concentración de impurezas. E y F, muestran moldes de calcita claramente definidos los cuales fueron reemplazados por cuarzo jigsaw. G y H, muestra calcita rómbica la cual fue el tipo de textura más comúnmente vista.....	43
Figura 19: Gráfico resumen de las cantidades de tipos de textura de cuarzo y calcita encontrados a lo largo de este estudio.....	44
Figura 20: Inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor.....	46
Figura 21: Inclusiones trifásicas mostrando halita, vapor y una fase predominante fluida.....	47
Figura 22: Inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor.....	48
Figura 23: Microfotografía mostrando diferentes arreglos de familias de inclusiones fluidas dentro de un cristal de cuarzo. Se puede observar cómo se trata de familias de inclusiones ricas en vapor, las cuales se encuentran hospedadas en fracturas selladas dentro del cristal.....	49
Figura 24: Inclusiones ricas en vapor coexistiendo con inclusiones ricas en líquido en cuarzo euedral.....	50
Figura 25: Plot de concentraciones de oro dentro de la veta Don Leopoldo.....	51
Figura 26: Distribuciones del contenido de plata de las muestras pertenecientes a la veta Don Leopoldo.....	52
Figura 27: Plot de concentraciones de metales base en profundidad, donde para mayor simplicidad, los metales cobre, plomo y zinc han sido sumados.....	53
Figura 28: Distribución de los distintos tipos de inclusiones fluidas dentro de la veta Don Leopoldo.....	54
Figura 29: Valores máximo y mínimo de roca total de elementos menores para muestras pertenecientes a la veta Don Leopoldo, y su correspondiente valor promedio en la corteza continental. (Los valores para elementos menores y trazas en la corteza han sido tomados de White W.M., 2013).....	56
Figura 30: Gráfico mostrando la relación existente entre la concentración de oro versus zinc, plomo y cobre. La concentración de metales base ha sido planteada en porcentaje en peso %wt, mientras que la ley de oro ha sido representada en partes por millón (ppm).....	57

Figura 31: Distribución de los diferentes tipos de texturas encontrados dentro de la veta Don Leopoldo, tanto para cuarzo como calcita, los principales minerales de ganga.....	59
Figura 32: Gráfico representando los diferentes tipos de texturas, presencia de fias de inclusiones ricas en líquido y FIA's de inclusiones ricas en vapor (referido como 'característica' en esta discusión) y su relación con los grados de mena observados.....	61
Figura 33: A. Asociación de alteración propilítica de la etapa de pre-mineralización de la veta Don Leopoldo. B. Vista a nicoles cruzados. C. Asociación de alteración argílica con desarrollo de illita dentro de cristales de cuarzo. D. Vista alteración argílica a nicoles cruzados.....	64
Figura 34: Microfotografía mostrando diferentes arreglos de inclusiones. A. FIA vapor primaria en cuarzo comb. B. Amplificación de microfotografía A, con aumento x80. C. Se muestra cristales de pirita alineados con inclusiones ricas en vapor. D. Vista de microfotografía C, con aumento x80. E. Muestra DM-34, mostrando la presencia de dos eventos de fracturamiento y atrapamiento de inclusiones. F. Inclusiones con illita en su interior.....	68
Figura 35: Principales eventos presentes en el sistema y su relación con el tipo de inclusión encontrado.....	69
Figura 36: Sección longitudinal de la veta Don Leopoldo, en dirección oeste-este. Los sets de valores señalados para cada muestra corresponden al Factor de confianza de ebullición (rojo), ley de oro (azul) y ley de plata (verde).....	74

Índice de Tablas

Tabla 1: Se muestra la concentración de los principales metales dentro de la veta don Leopoldo. Las concentraciones tanto de oro (Au), plata (Ag), arsénico (As) y antimonio (Sb) se encuentran en ppm, mientras para metales base, estas son expresadas en porcentaje.....	38
Tabla 2: Mineralogía, texturas y principales tipos de inclusiones presentes en las tres etapas definidas para la veta Don Leopoldo.....	65
Tabla 3: Descripción de muestras de mano.....	82
Tabla 4: Resultados de los análisis geoquímicos de roca total. Se muestran los principales metales oro, plata, cobre, zinc y plomo, juntos con los no metales de arsénico y antimonio.....	88
Tabla 5. Texturas de cuarzo y calcita.....	91
Tabla 6. Petrografía de inclusiones fluidas.....	94
Tabla 7: Resultados del tipo de inclusión con su cristal hospedador.....	100
Tabla 8: Se muestra el calculo del factor de confianza de ebullición (FCB). V: Inclusiones vapor; TJ: TC: textura coliforme; TP: cuarzo plumoso; CH: calcita hojosa: CR: calcita rómbica; CC: cuarzo comb.....	103

1. INTRODUCCIÓN

El oro y plata son metales de gran importancia para la humanidad no sólo a causa de su extendido uso industrial, sino también porque desempeñan un importante rol como instrumento financiero. La producción de metales preciosos en Chile extraídos a partir de roca dura se remonta al siglo diecinueve, donde el oro fue obtenido principalmente como un subproducto de la explotación de depósitos porfíricos de cobre, en vetas llevando cobre y disseminado. Con el descubrimiento del depósito epitermal del Indio en 1980, junto a otros 20 depósitos, la producción de oro chilena sufrió una importante alza llegando a alcanzar las 54 toneladas por año, y la cual ha ido en decadencia en el último periodo (Maksaev et al., 2007).

El transporte de metales en solución es muy dependiente de la solubilidad acuosa de estos elementos, donde estos últimos serán secuestrados y concentrados a partir de la separación de una fase fluida desde un fundido magmático. El transporte de oro y plata dentro de sistemas hidrotermal se produce principalmente a través de complejos clorurados y sulfurados, donde el oro presente en solución es transportado bajo la forma de $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ en condiciones de baja salinidad, pH neutro-alcalino, mientras que en condiciones acídicas este metal se transporta predominantemente como $\text{Au}(\text{HS})^0$. Por otro lado el transporte de plata se produce principalmente como complejo sulfurado en condiciones de baja temperatura (Gammons y Barnes, 1989; Seward, 1976; Gammons y Williams, 1997).

Numerosos estudios de inclusiones fluidas así como su relación con los principales minerales de mena han sido llevados a cabo para distintos tipos de depósitos desde hace más de un siglo por muchos autores (Bodnar, 2003; Wilkinson, 2001). Las inclusiones fluidas corresponden a antiguos fluidos que estuvieron circulando dentro del sistema, y los cuales han sido atrapados dentro del cristal (Goldstein y Reynolds, 1994). Estos paleofluidos son atrapados durante el desarrollo del cristal o en fracturas en los mismos, siendo muestras de las condiciones que reinaron en ese momento (Goldstein, 2003).

El presente estudio de inclusiones fluidas se encarga de caracterizar la veta Don Leopoldo, buscando entregar evidencia acerca de como la mineralización procedió dentro del sistema. Además indaga acerca de cuales fueron las condiciones bajo las que se produjo la deposición de la mena y que mecanismos fueron los responsables de tal proceso. Por último, intenta dar luz acerca de posibles blancos de exploración hacia zonas de leyes más altas dentro del sistema.

1.1. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es la determinación de posibles blancos de exploración dentro del sistema, así como también la caracterización de los fluidos que mineralizaron el depósito, por medio de estudios de inclusiones fluidas en el área del distrito minero de Alhué.

Objetivos específicos

1. Generar una base de datos mineralógica y textural de los principales minerales de ganga cuarzo y calcita mediante la descripción petrográfica de secciones delgadas, que permita analizar la información con el objetivo de indagar acerca de los diferentes eventos que tuvieron lugar dentro del sistema.
2. Generar una base de datos mediante la descripción y clasificación petrográfica de inclusiones fluidas, que permite plotear la información con el fin de determinar qué tipo de sistema está bajo estudio y que mecanismo llevo a la deposición de los metales.
3. Determinar posibles blancos de exploración y tipo de ambiente de formación de la veta Don Leopoldo, por medio de una exhaustiva búsqueda bibliográfica.

1.2. Hipótesis de trabajo

La veta Don Leopoldo perteneciente al distrito minero de Alhué, reúne características que hacen suponer que podría tratarse de un depósito de tipo epitermal de baja sulfuración, o de un depósito mesotermal, dada la cantidad de vetas cuarcíferas polimetálicas dentro del distrito (Maksaev et al., 2007).

El transporte de oro se habría producido bajo la forma de complejo clorurado AuCl_2 a altas temperaturas, mientras que bajo los 450°C dominaría el transporte como $\text{Au}(\text{HS})_2$ en condiciones de pH alcalino, mientras que en condiciones más acídicas la especie dominante sería $\text{Au}(\text{HS})^0$ (Gammons y Williams, 1997).

La plata se transporta principalmente como $\text{Ag}(\text{HS})_2$ en fluidos hidrotermales con pH cercano neutro a alcalino y $T < 300^\circ\text{C}$. Por otra parte la solubilidad de los complejos clorurados de plata comparada con el transporte de plata mediante complejos sulfurados en iguales condiciones de pH y temperaturas, muestra tener una menor capacidad de transporte (Gammons y Barnes, 1989).

En sistemas hidrotermales en los cuales hay presencia de ebullición, este proceso ha sido un efectivo mecanismo para la deposición y control de la mena. Adicionalmente se piensa que un segundo proceso conocido como mezcla, se estaría haciendo presente promoviendo la deposición de metales y controlando sus leyes.

1.3. Ubicación y Accesos

La zona de este trabajo se ubica en el sector sur de la Región Metropolitana, a unos 17 km al este de la localidad de Villa Alhué, dentro de la Cordillera de la Costa de Chile central. Para acceder a la zona de estudio es posible realizar distintos recorridos, algunos partiendo directamente desde Santiago o desde localidades cercanas al área de investigación. Aquí hablamos solamente de como llegar desde Santiago y San Antonio.

Desde Santiago, primero se debe proceder a tomar la Ruta 78 en dirección a San Antonio hasta llegar a la localidad de Melipilla, ubicada unos 55 km al oeste aproximadamente de la capital. Luego, se debe tomar la ruta G-60 siguiendo una trayectoria sur-oeste hasta llegar a la intersección con la la Ruta 66, unos 30 km al suroeste de Melipilla. En este punto se debe seguir la Ruta 66 y avanzar unos 20 km hacia el sur hasta llegar a la localidad de Santa Inés. Aquí se debe continuar por la ruta G-692 en dirección este y recorrer unos 30 km hasta alcanzar la localidad de Villa de Alhué. Dicha localidad es la principal referencia geográfica utilizada para ubicar la zona de estudio, la cual se encuentra unos 18 km hacia el este siguiendo el valle principal (Figura 1).

También es posible llegar a la zona de estudio desde la ciudad de San Antonio. Para ello se debe tomar la ruta G-66 en dirección sur y avanzar hasta alcanzar la intersección con la ruta G-692. Dicha intersección se encuentra unos 60 km al SSO de San Antonio, en el sector de Santa Inés, donde el camino a seguir desde este punto coincide con el señalado anteriormente (Figura 1).



Figura 1: Rutas de acceso y ubicación del área de estudio. Figura generada con el software Google Earth.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas magmático-hidrotermal

Los depósitos hidrotermales son aquellos formados a consecuencia de una solución acuosa caliente fluyendo a través de canales en la corteza o sobre una porción de la misma. Estos fluidos calientes depositan una masa localizada de minerales desde su carga disuelta (Robb, 2005; Skinner, 1997). Es posible clasificar los diferentes tipos de soluciones hidrotermales en cuatro grupos diferentes: aguas superficiales (las cuales incluyen agua de lluvia, lagos, ríos, agua de mar y aguas superficiales), aguas subterráneas profundas, aguas de origen metamórfico y aguas del tipo magmático (Skinner, 1997).

La interacción entre procesos magmáticos e hidrotermales es extremadamente importante para la formación de una amplia variedad de tipos de depósitos, especialmente en ambientes cercanos a la superficie, donde los fluidos circulantes y magmas están tanto espacial como genéticamente vinculados los unos con los otros (Robb, 2005). La circulación de fluidos profundos se da en regiones con un flujo de calor anormalmente alto. La convección termal producida en estas zonas domina el comportamiento de las aguas subterráneas (Elder, 1981; Henley and Ellis, 1983).

Fluidos de origen magmático, ya sea salmueras o vapores son una fuente primaria de muchos componentes de depósitos hidrotermales. Metales junto a otros ligandos pueden concentrarse por sobre varios órdenes de magnitud con respecto a su valor en la corteza, al ser transportados a través de estos fluidos profundos (Hedenquist and Lowenstern, 1994). Criterios de solubilidad promueven la inestabilidad y precipitación local, lo cual sugiere que la mineralización resulta desde múltiples episodios (Sibson, 2000).

2.1.1. Depósitos Epitermales

La exploración por metales preciosos condujo al descubrimiento de grandes depósitos de estos metales desde hace ya varias décadas (Robb, 2005). Estos depósitos de clase mundial son referidos bajo el nombre de depósitos de tipo epitermal, considerando la profundidad a la cual se forman 'epizona' (Lindgren, 1933).

Estos sistema comúnmente se encuentran a lo largo zonas de subducción activas en arcos volcánicos, como lo es el cinturón de fuego del pacífico, o ambientes de subducción antiguos. Numerosos estudios del ambiente de formación de la mena, dejan ver como estos depósitos se forman comúnmente sobre rangos de temperatura desde los 150-300°C y profundidades de hasta 1.5 km. En estos sistemas la mineralización se presenta distribuida verticalmente. (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al, 2005; White y Hedenquist, 1995; Bodnar et al., 2014).

Muchas clasificaciones se han propuesto para los depósitos del tipo epitermal, las cuales consideran aspectos como las variaciones en los estilos de mineralización y

alteración, así como, diferencias en cuanto a su ambiente genético (Arribas et al., 1995). Principalmente los epitermales son divididos en dos grupos, uno de los cuales muestra una mineralización de sulfuros con un alto estado de oxidación (es decir, enargite and luzonite) y presencia de condiciones ácidas (alunita, caolinita, pirofilita) dentro del fluido mineralizador y es referido como epitermal de alta sulfuración (HS). El segundo grupo, cuenta con presencia de sulfuros con un bajo estado de oxidación y una alteración característica de condiciones de pH cercanas al neutro-alcalino. Este último tipo es conocido como el tipo de baja sulfuración (LS) (Einaudi et al., 2003 ; Giggenbach, 1997).

El término alta sulfuración es propuesto para referirse al estado oxidado en el cual se encuentran las especies minerales sulfuradas, o la mena dentro del depósito (donde el fluido fue rico en SO_2). Este aspecto establece un vínculo entre este tipo de depósitos y su magma parental. Por otra parte los depósitos de baja sulfuración están vinculados a fluidos hidrotermales provenientes de magmas reducidos, ricos en H_2S y de pH neutro (Simmons et al, 2005).

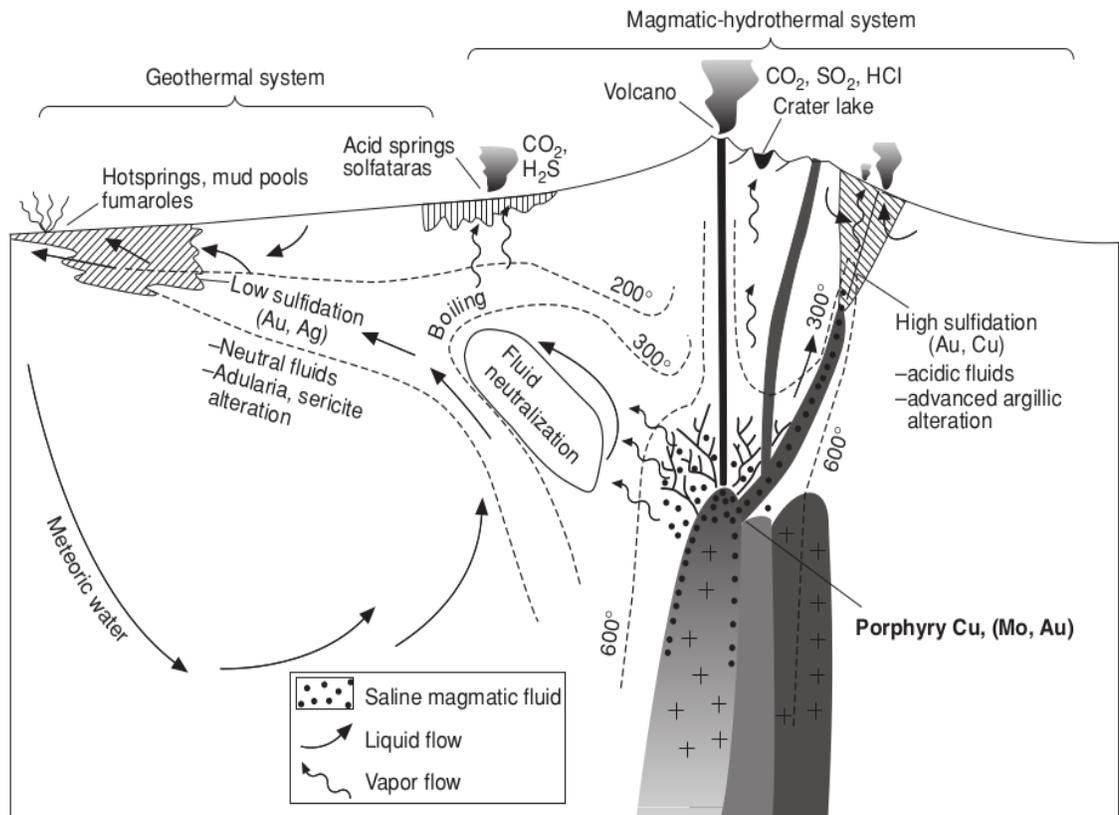


Figura 2: Configuración geológica y características de los depósitos epitermales de alta sulfuración y baja sulfuración. También se sugiere un vínculo genético entre los depósitos de Au-Cu epitermales de alta sulfuración y los pórfidos subvolcánicos de tipo Cu-Au (Hedenquist et al., 2000).

Modelos de formación

Los depósitos de alta sulfidización son formados por fluidos los cuales han sido directamente derivados del magma. La mineralización es esencialmente el resultado de saturación de la solución transportando metales, que puede producirse como consecuencia de ebullición o mezcla con aguas locales. Los fluidos responsables de la mineralización desarrollan una alteración argílica típica de estos sistemas (Robb, 2005).

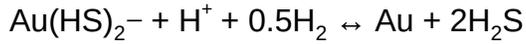
En este tipo de depósito los fluidos se caracterizan por ser de pH extremadamente alto y oxidados, llevando especies S^{+4} y S^{+6} como SO_2 , HSO_4^- en solución. Cuando a medida que la solución hidrotermal asciende produciéndose la ebullición, los gases SO_2 y CO_2 son fuertemente particionados en la fase vapor. El particionamiento de estos gases disminuye el pH de la solución remanente dado el incremento en la concentración de H^+ en solución (Hedenquist et al., 2000).

Los fluidos ácidos se encargan de lixiviar la roca conforme el ascenso progresa. La fuerte lixiviación remove elementos mayores presentes en la roca hospedadora, resultando en la característica zonación de alteración presente en estos depósitos. Esta zonación es evidenciada por una textura de cuarzo vuggy u oqueroso en el núcleo del depósito, gradando hacia fuera a alteración argílica y cuarzo sericita, Figura 3 (arribas et al., 1995).

Los mecanismos de deposición de oro en estos depósitos dependen principalmente de cómo se produce el transporte de la mena. Si se trata de soluciones hidrotermales sulfuradas, la precipitación mostrará estar más fuertemente vinculada a boiling o mezcla, al igual que para el caso de baja sulfuración. Sin embargo si el transporte se lleva a cabo por medio de complejos clorurados, entonces boiling (extracción de SO_2 y SO_4^{2-}) no tendrá un efecto importante. Mientras que mezcla con aguas meteóricas de pH neutral y más frías tendrá una importante participación (arribas et al., 1995).

Los depósitos de baja sulfidización son formados por fluidos los cuales están en equilibrio con la roca huésped. Estas soluciones portadoras de metales generalmente han sido diluidos en aguas meteóricas por medio de mezcla. Estos fluidos están caracterizados por tener un pH cercano al neutral y bajas salinidades, y posiblemente haber sufrido un proceso de ebullición en o alrededor de la zona de formación de la mena (Robb, 2005).

La precipitación de oro en estos depósitos muestra ser relativamente sencilla y estar vinculada a uno o ambos procesos, ya sea dilución o ebullición. Estos procesos caracterizan la evolución del fluido en este entorno, es decir, la ebullición y la mezcla de fluidos. Si se produce ebullición de la solución hidrotermal, se tiene como resultado la pérdida de H_2S a la fase de vapor, lo que provoca la desestabilización del complejo de $Au(HS)_2^-$ y la precipitación de Au, como se describe en la ecuación (Cooke y Simmons, 2000):



La mezcla de aguas meteóricas oxidadas con fluidos transportadores de mena también conlleva el mismo efecto, produciendo la precipitación de oro a partir de la solución hidrotermal:

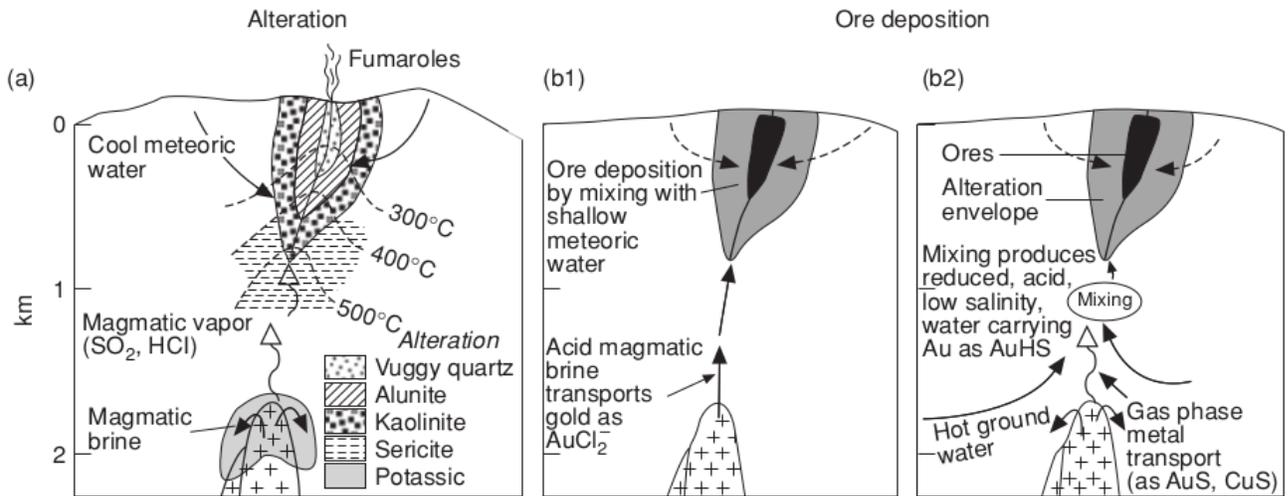
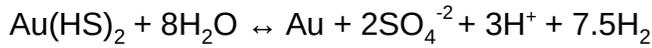


Figura 3: Etapas para la formación de un depósito de alta sulfidación. a) etapa inicial donde una fase vapor predominantemente magmática es responsable de lixiviar la roca caja y desarrollar un halo de alteración argílica avanzada alrededor del conducto principal. b1) Etapa de deposición de la mena, en este caso el oro es transportado como complejo clorurado y b2) el transporte de oro es por medio de complejos sulfurados. (Tomado de Arribas et al., 1995).

2.1.2. Depósitos mesotermales

Vetas mesotermales de cuarzo-oro corresponden a una de las principales fuentes de extracción de oro en el mundo. También en algunos países como es el caso de Canadá estas vetas constituyen alrededor del 50% de la producción. La mayoría de estos depósitos están asociados comúnmente a rocas del arqueano pero yacimientos más jóvenes del cretácico también son encontrados (Sibson et al., 1988).

Corresponden a un tipo de sistemas formado a profundidades de 2000-4000m bajo la superficie, y temperaturas entre los 200-400°C (Robb, 2005). Estos depósitos se hospedan generalmente a lo largo de fallas inversas de alto ángulo, estando caracterizados por presentar un estilo de deformación frágil-dúctil (Sibson et al., 1988). Debido a las diferencias de existentes entre presión de fluidos en régimen hidrostático y litostático, el fluido en ascenso experimenta una fuerte caída de presión al pasar de un régimen al otro, lo cual podría tener un marcado efecto en la solubilidad de cuarzo provocando su precipitación (Sibson et al., 1988).

Estudios de inclusiones fluidas en vetas de cuarzo-oro han mostrado cómo los fluidos mineralizadores fueron ricos en CO₂ y de baja salinidad (Robert y Kelly, 1987). Se propone que la rápida precipitación de la mena por parte de estas soluciones hidrotermales en ambientes del tipo mesotermal, podría ser el producto de ebullición. Este proceso de 'boiling', se produciría por la separación de CO₂, debido a repentina caída de presión (Spooner, 1987).

De acuerdo a estudios de inclusiones fluidas llevados a cabo en distintas vetas mesotermales se ha constatado como el tipo de inclusiones predominantes en el depósito son del tipo H₂O-CO₂. Estas inclusiones son ricas en líquido con presencia de una burbuja de vapor, la cual composicionalmente podría contener presencia de CO₂ (Olivo y Williams-Jones, 2002; Klein et al. 2000).

2.2 Solubilidad de metales

2.2.1 Solubilidad del oro

El transporte de oro puede llevarse a cabo mediante una serie de complejos, los cuales forman parte de las soluciones hidrotermales. De acuerdo a estudios realizados para medir la solubilidad del oro, se ha encontrado que en fluidos hidrotermales con altas razones Cl/H₂S predomina el transporte de oro como complejo clorurado AuCl₂, mientras que para altas razones H₂S/Cl, el oro se transporta principalmente como complejo sulfurado, así mismo, cuando ambas concentraciones son bajas, lo hará principalmente como AuOH⁰. El oro se disuelve principalmente como AuCl₂ a altas temperaturas mientras que bajo los 450°C domina el transporte como Au(HS)₂ (Gammons y Williams, 1997).

Experimentalmente se tiene que para una solución que no presenta ebullición, que se encuentra a altas presiones (1kbar), rica en H₂S (transporte dominado Au(HS)₂, figura 4, línea A) la solubilidad del oro decrece ligeramente a medida que la temperatura desciende desde los 500-300°C. Bajo estas condiciones el oro es siempre transportado en significativas cantidades, por lo cual, grandes porcentajes de oro podrán ser transportadas lejos de la fuente original. Por otro lado en soluciones pobres en H₂S (dominadas por Cl), el oro podrá ser transportado solo en las cercanías de su fuente bajo las mismas condiciones de temperatura, como es sugerido desde su curva de solubilidad (Figura 4, Línea B) (Gammons y Williams, 1997).

Para soluciones en la cuales, una fase fluida haya sido separada desde el magma original en una salmuera, se tiene que la solubilidad del oro será mucho más alta que para el caso anterior sobre los 500°C, y que el transporte será dominado por AuCl₂, donde una disminución de la temperatura produce un efecto aún mayor en su solubilidad. Dado que la mayor parte del H₂S es particionado fuertemente en la fase vapor a causa de ebullición, la curva de solubilidad para el oro sigue el camino marcado por la letra B, en la Figura 4. Así mismo en la fase vapor se puede apreciar dos diferentes escenarios, considerando todas las especies como volátiles, curva A, y solo aquellas especies AuOH y AuHS, curva B. Se muestra como la solubilidad del oro aumenta con la disminución de la temperatura, transportandose principalmente como AuHS₂, bajo los 450°C (Gammons y Williams, 1997).

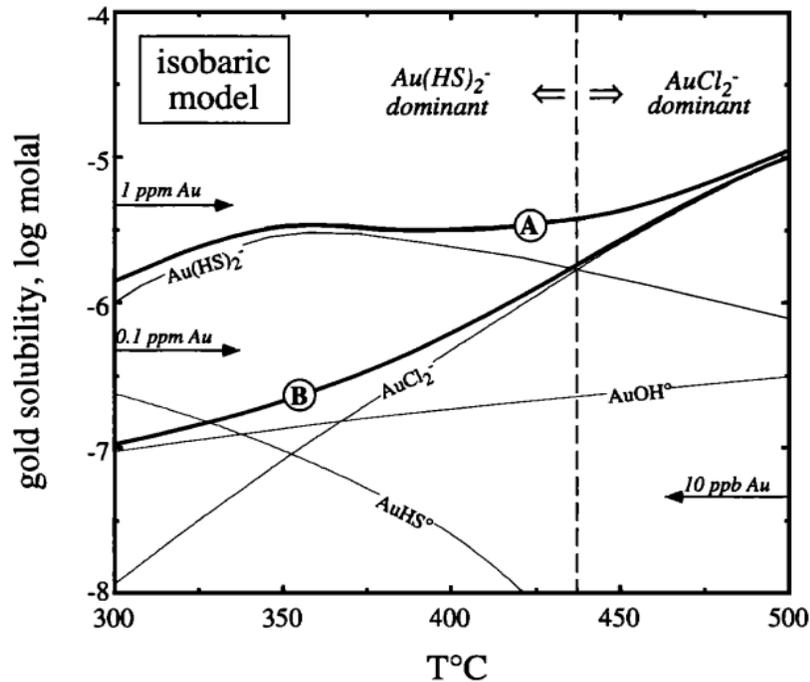


Figura 4: Solubilidad del oro para un fluido magmático conteniendo 2.0 m ΣCl el cual se enfría desde 500°C a 300°C a presión constante de 1kbar (modelo isocórico). El estado de oxidación está fijado por la condición $f\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}=1$. El pH es fijado por la coexistencia de feldespató-K, moscovita y cuarzo (Tomado de Gammons y Williams, 1997).

Dado el gran coeficiente de partición del cloro en la fase fluida, la mayor parte de este ligando se concentra en la salmuera con respecto al fundido. Cuando ocurre la separación de las fases los elementos se particionaran en distintas proporciones unos con otros (Burnham, 1979). Otro elemento el cual es fuertemente particionado en la fase salmuera es el cobre (Candela y Holland, 1984).

Los mecanismos por los cuales el oro transportado en solución como complejo clorurado (AuCl_2) podría precipitar se pueden ver en la Figura 5, donde una baja en la concentración de cloro disuelto, disminución de la temperatura, una disminución en el estado de oxidación, y un aumento en el pH. Tanto una baja en la concentración de Cl como en la temperatura podrían ser explicados por dilución con aguas meteóricas. El incremento en el pH podría producirse durante exsolución de la fase gaseosa donde la mayoría de los componentes ácidos (HCl , H_2S , SO_2) serian fraccionados a esta última fase (Gammons and Williams, 1997). El efecto de la presión en la solubilidad de complejos clorurados y sulfurados a mostrado ser despreciable (Zotov et al, 1991; Benning y Seward, 1996).

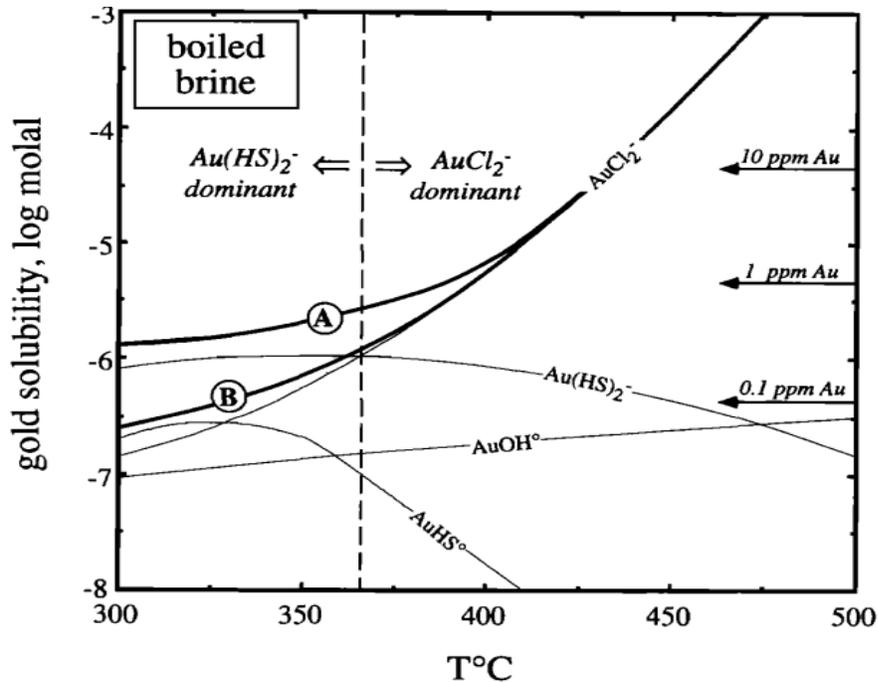


Figura 5: Solubilidad del oro en salmuera conteniendo $\Sigma\text{Cl} = 5\text{m}$ que se separa de una fase vapor a 500°C , y 0.5 kbars , y luego se enfría hasta los 300°C (Tomado de Gammons y Williams, 1997).

2.2.2 Solubilidad de la plata

La plata es uno de los principales metales preciosos que ocurren en depósitos magmático-hidrotermal. Este elemento constituye grados de mena en depósitos de tipo pórfidos y mineralizaciones de tipo epitermal y mesotermal. También es posible encontrar cantidades apreciables de este metal en sistema de volcanogénicos de sulfuros masivos.

En fluidos sódicos-clorurados se encuentra que a temperaturas entre los $25\text{-}270^\circ\text{C}$, las especies Ag^+ , AgCl , y AgCl_2 fueron las predominantes para el transporte de plata. La solubilidad de la plata nativa fue más importante cuando las concentraciones de Cl fueron más bajas, y donde a medida que estas concentraciones de Cl fueron en aumento, se tiene una progresiva mayor dominancia de AgCl , para finalmente predominar el transporte como AgCl_2 . El complejo di-clorurado AgCl_2 se propone como la especie dominante a temperaturas entre los $270\text{-}350^\circ\text{C}$ (Seward, 1976).

De experimentos realizados en fluidos sulfurados, en un rango de temperatura de $25\text{-}300^\circ\text{C}$, es medido que la plata (Ag) se transporta principalmente como $\text{Ag}(\text{HS})_2$

en fluidos hidrotermales con pH cercano neutro a alcalino, relativamente bajo estado de oxidación, altas concentraciones de sulfuro y $T < 300^\circ\text{C}$. Adicionalmente se compara la solubilidad de los complejos clorurados de plata con el transporte de plata mediante complejos sulfurados encontrando que en condiciones de pH cercano a neutro y temperaturas $\sim 250^\circ\text{C}$, los complejos sulfurados tienen una mayor capacidad de transportar este metal. El transporte de plata como complejo clorurado bajo las mismas condiciones, es al menos un orden de magnitud menor (Figura 6.) (Gammons y Barnes, 1989).

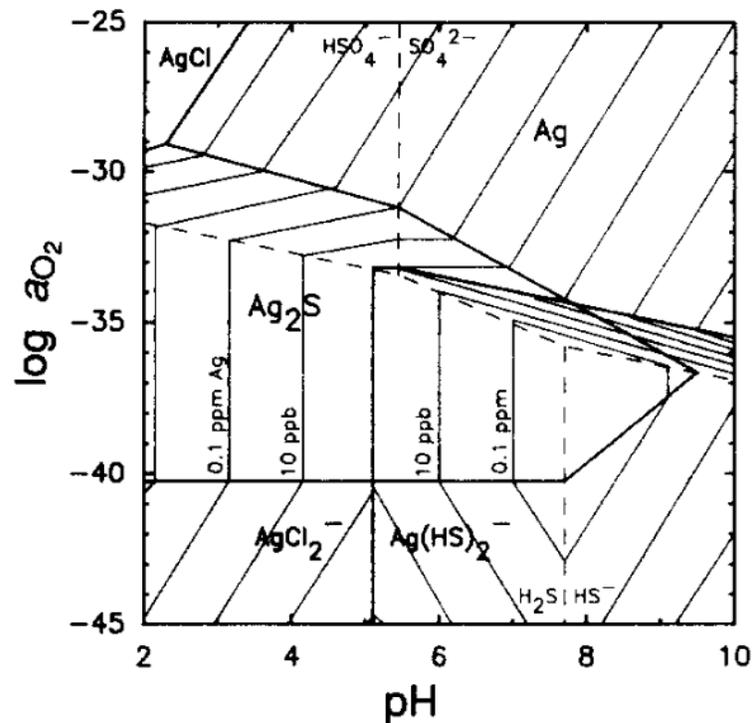


Figura 6: Diagrama mostrando el área de predominio de la solubilidad de la plata y la especiación a 250°C como una función del pH y el estado de oxidación. Las actividades del cloruro y ΣS son constantes a 0.1 y 0.01, respectivamente. (Tomado de Gammons y Barnes, 1989).

De la Figura 6 y 7, es posible observar como el transporte de plata mediante complejos clorurados es dominante en condiciones oxidantes. De igual modo cuando el pH bajo y hay elevadas temperaturas, con alta concentración de cloro disuelto, es posible transportar concentraciones de entre 0.1-10 ppm de plata.

Los mecanismos de deposición de la plata fueron examinados experimentalmente. En complejos clorurados, la plata se deposita principalmente en respuesta a reducciones en la temperatura, incrementos de pH, y disminución de la concentración de cloro en solución (Seward, 1976). Es posible además corroborar estas conclusiones a partir de las figuras 6 y 7.

Para los complejos sulfurados se tiene que los principales mecanismos involucrados en la precipitación de la plata en solución son disminución de la concentración de sulfuro en solución, así como también reducciones en el pH (Figura 7). Disminuciones en la concentración de sulfuro y pH, puede ser explicada por procesos de oxidación (sulfuros-->sulfato), dilución y boiling. También se ve como la temperatura no tiene mayor influencia en estos complejos, diferente a lo que ocurre con los complejos clorurados (Gammons and Barnes, 1989).

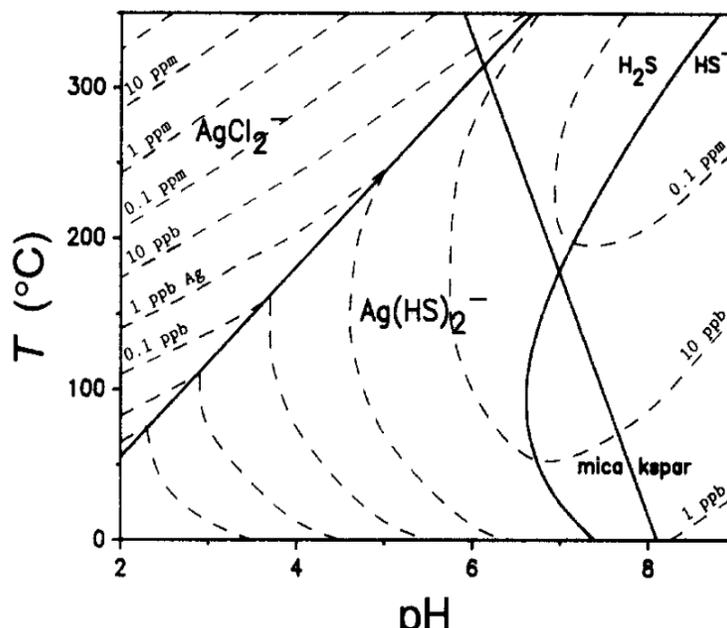


Figura 7: Diagrama mostrando el área predominante para la solubilidad de la plata y la especiación como una función de la temperatura y el pH (Tomado de Gammons y Barnes, 1989).

2.2.3. Solubilidad de cobre

El transporte de cobre es estudiado experimentalmente para distintos tipos de soluciones y condiciones. En fluidos con concentraciones de sulfuros totales entre $\Sigma S=0.1-1.0$, con rangos de temperaturas entre los 250-350°C, y pH cercano al neutral, mostraron que el complejo $CuCl$ es dominante para el transporte de cobre en fluidos hidrotermales. Por otro lado, para soluciones sulfuradas el transporte de cobre se llevaría a cabo principalmente a mas bajas temperaturas (<250°C) (Crerar y Barnes, 1976).

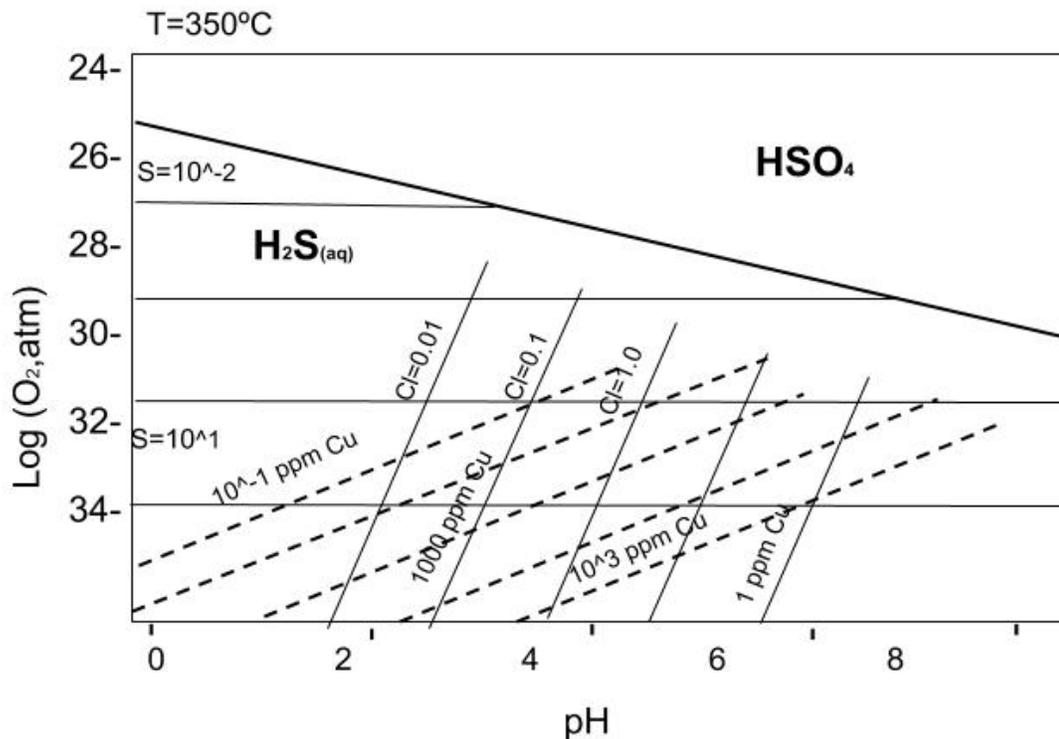


Figura 8: Líneas continuas muestran la concentración del complejo $CuCl$ a 350°C, mientras las líneas discontinuas representan la concentración de los complejos $\{Cu(HS)_2 + Cu(HS)_2(H_2S)\}$ (Modificado de Crerar y Barnes, 1976).

Cuando cobre es transportado por medio de soluciones ricas en cloro, el pH ejerce un fuerte control como un mecanismo efectivo de deposición. Así, a medida que se produce un incremento en el pH de la solución, la solubilidad del cobre disminuye, y la precipitación proced. De igual forma, si la concentración de cloro disuelto disminuye o se reduce la temperatura del fluido hidrotermal, también se provoca la deposición de sulfuros. (Crerar y Barnes, 1976).

2.2.4. Solubilidad de zinc

La solubilidad del zinc se ha medido por varios autores y en diferentes condiciones. Estudios de solubilidad y especiación realizados en soluciones sulfuradas, entre los 25-250°C, mostraron cómo a temperatura superiores a los 100°C los complejos $\text{Zn}(\text{HS})_2$ y $\text{Zn}(\text{HS})_3^-$ son predominantes. Estos mismos trabajos muestran que a medida que incrementa la temperatura más allá de los 300°C y $\text{pH}=3-7$, el complejo $\text{Zn}(\text{HS})_2$ predomina por sobre los demás, llegando a ser el complejo de zinc más importante como es observado en la Figura 9 (Tagirov y Seward, 2010).

En soluciones hidrotermales de baja salinidad $a_{\text{Cl}}=0.05\text{m}$, el transporte de zinc involucra principalmente complejos sulfurados. Lo anterior es esencial para entender el transporte de este metal en ambientes de tipo epitermal, donde el zinc es identificado generalmente como esfalerita. Lo anterior se observa mediante la Figura 9, (Tagirov y Seward, 2010).

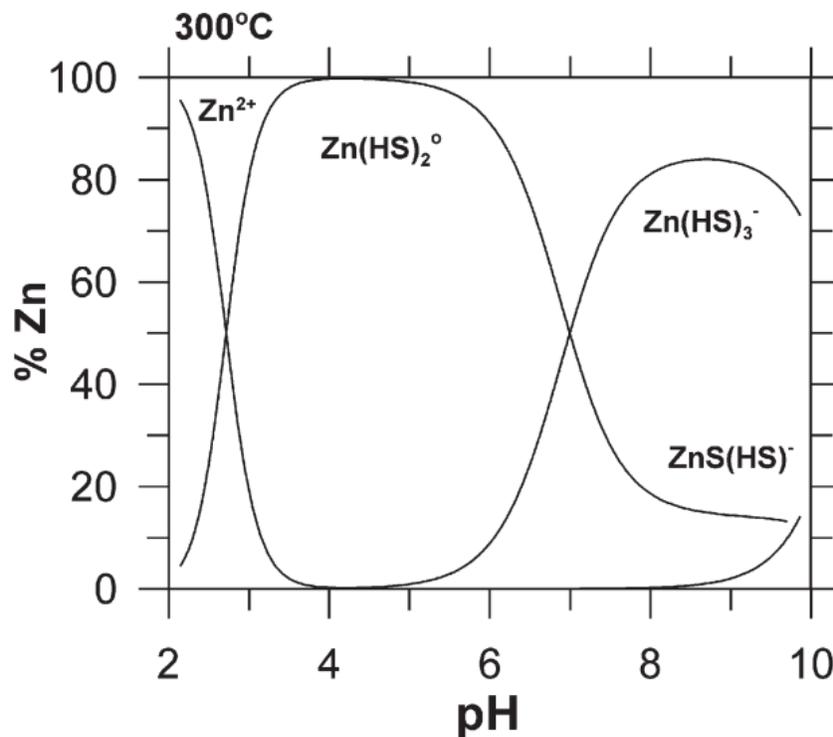


Figura 9: Diagrama de predominancia para complejos sulfurados de Zn-S-HS como una función del pH a $P = P_{\text{sat}}$ and $m(\text{S total}) = 0.1$. (Tomado de Tagirov y Seward, 2010).

En soluciones hidrotermales cloruradas, la solubilidad de zinc muestra ser considerablemente alta en fluidos ácidos, tanto a bajas concentraciones de cloro ($a_{Cl}=0.05m$), como altas concentraciones ($a_{NaCl}=2m \sim 12\%NaCl$). A medida que la temperatura de la solución hidrotermal se incrementa, el campo de estabilidad de los complejos clorurados se expande sobre rangos de pH ahora levemente alcalinos, a expensas del campo de estabilidad de $Zn-S-HS$. La expansión del campo de complejos clorurados muestra como a mayores temperaturas estos complejos son dominantes (Tagirov y Seward, 2010).

Tagirov y Seward (2010) señalan como la depositación de esfalerita o complejos sulfurados de zinc está controlada por factores como la temperatura, pH y estado de oxidación de las especies disueltas. Así un decremento de la temperatura lleva a la depositación de esfalerita, mientras incrementos de pH también provocarían la depositación de este metal. Estos cambios pueden ser producidos a causa de boiling o disolución de los fluidos transportadores de metales.

2.2.5. Solubilidad del plomo

Plomo es metal el cual forma fuertes ligando con cloro (Cl^-) y complejos sulfurados (HS^-). Los complejos bi-sulfurados de plomo muestran ser más estables que aquellos clorurados en condiciones de baja temperatura, baja salinidad y estados de pH cercanos a neutro-alcalino. Experimentos de la especiación del plomo muestran cómo diferentes complejos sulfurados pueden jugar un rol importante en su transporte, siendo $Pb(HS)_2$ estable en condiciones más básicas, mientras $Pb(HS)_3$ predomina en soluciones de pH más ácidos ~ 6 .

Complejos clorurados de plomo muestran ser predominantes a más altas temperaturas, en soluciones más ácidas. Este metal deja ver una gran variedad de complejos involucrados en su transporte, como son $PbCl^+$, $PbCl_2$, $PbCl_3^-$, $PbCl_4^{2-}$. (Robb, 2005).

2.3. Texturas diagnósticas de cuarzo y calcita

Muchos autores han estudiado las texturas minerales desde varias décadas (Adams, 1920; Sander y Black, 1988; Dong et al, 1995). El reconocimiento y análisis textural proporcionan criterios indispensables para la realización de estudios petrográficos de inclusiones fluidas, entre otros. Las características del cuarzo como su morfología, estructura cristalina, composición química y propiedades fisicoquímicas, pueden reflejar diferentes condiciones hidrotermales durante el crecimiento de las vetillas, incluidas aquellas que favorecen la mineralización de oro, por eso la importancia de su análisis.

Varias texturas de cuarzo y calcita son definidas (Figura 10) sobre la base de relaciones geométricas mutuas entre cristales individuales, o agregados de cristales, y las características internas de los granos individuales. La mayoría de las texturas descritas se identifican fácilmente en muestras de mano, aunque algunas sin embargo, solo pueden ser vistas bajo el microscopio (Dong et al, 1995). Otros tipos de agregados como es la calcedonia requerirá de otro tipo de análisis para ser identificado (Sander y Black, 1988).

Principalmente se distinguen texturas para cuarzo y calcita, los cuales serán minerales esenciales para el estudio de inclusiones. Estas texturas pueden tener distintos orígenes dependiendo del proceso a partir del cual ellas se formaron. Texturas primarias tienen lugar durante la cristalización de la fase mineral, texturas secundarias se producen como una recristalización de una fase pre-existente, y de reemplazo las cuales corresponden a reemplazos pseudomórficos de cuarzo por calcita u otra fase soluble (Dong et al, 1995).

Textura de origen primario

Corresponden a morfologías de cristales de cuarzo o fase silíceas formadas durante el crecimiento y deposición de la fase presente en el fluido, respectivamente. Las principales texturas de carácter primario que se pueden encontrar son de cuarzo crustiforme, cuarzo coliforme, textura de cuarzo moss, cockade, y además cristales de cuarzo bien desarrollado de tipo comb, y zonal.

Texturas de recristalización

Este tipo de texturas son producidas como el resultado de la recristalización de agregados de calcedonia, y de fases de sílice amorfas, a fases de cuarzo. Las principales texturas las cuales son debidas a un proceso de recristalización son cuarzo plumoso, textura de esfera fantasma y cuarzo jigsaw o mosaico.

Texturas de reemplazo

Este tipo de texturas es comúnmente producido en cristales de calcita y barita, dado que estos últimos son altamente solubles y podrían ser reemplazados por cristales de cuarzo. Calcita generalmente ocurre en hojas como una red interconectada, las cuales una vez son disueltas dejan atrás moldes, los cuales posteriormente serán rellenados por el mineral precipitando (Dong, 1995). A continuación se describen las principales características de cada una de estas texturas:

Cuarzo jigsaw: Este tipo de cuarzo también es referido en la literatura como mosaico, y consiste de agregados de cuarzo microcristalino o cristalino, en los cuales los bordes se interpenetran unos a otros, y tienen una apariencia irregular, como se puede observar en la Figura 10A. Su origen se cree a consecuencia de recristalización de una fase silíceo. Este cuarzo puede formarse desde una solución hidrotermal ebullendo, mezcla y rápido enfriamiento. (Dong et al., 1995).

Cuarzo Zonal: Corresponde a cristales de cuarzo los cuales muestran distintas zonas de crecimiento. Las distintas zonaciones son debidas a cambios producidos en solución precipitando el mineral. Cambios bruscos en la composición dentro de la solución podría causar líneas de crecimiento bien marcadas, mientras que cambios paulatinos se dejarán ver como zonas indefinidas con presencia de inclusiones (Adams, 1920).

Cuarzo plumoso: Esta textura corresponde a un tipo de cuarzo el cual está escalonado a diferentes escalas, mostrando cristales de grano más fino hacia el borde y grano grueso en un núcleo subhedral, el cual no presenta uniforme extinción (Sander and Black, 1988). Este tipo de textura plumosa también es descrita por Adams (1920), quien distingue dos variedades a las cuales llamó feathered (variedad hojosa) y flamboyant (variedad fibrosa), como se ilustra en la Figura 10B,C,D. Este tipo es fácilmente reconocido a nicoles cruzados.

Cuarzo Comb: Corresponde a un tipo de textura desarrollada en espacios abiertos, donde cristales euhedrales de cuarzo crecen de forma paralela y perpendiculares al muro de la veta (Figura 10R). Si las paredes de la roca donde estos cristales crecen son irregulares, estos cristales interfieren unos con otros dando lugar a formas de ventilador. Esta textura es fácilmente reconocible a nicoles paralelos. A menudo la base de estos cristales es estrecha o se desarrolla sobre antiguos cristales, y se ensancha hacia el extremo libre (Adams, 1920).

Bandeamiento crustiforme: Corresponde a un tipo de textura producido en espacio abierto, caracterizada por bandeamientos sucesivos, asimétricos o simétricos de bandas subparalelas, donde el bandeamiento resulta de la alternancia de agregados granulares masivos de cuarzo con numerosas inclusiones fluidas (Figura 10M). En fracturas abiertas la crustificación podría desarrollarse y crecer desde un muro de la veta o desde ambos lados de forma simétrica. Del mismo modo crustificación de forma concéntrica podría producirse en cavidades redondeadas y cuando esta se produce en brechas da lugar a la textura cockade (Adams, 1920).

Cockade: Este tipo de textura se desarrolla en espacios abiertos, donde cristales de cuarzo concéntricos se disponen alrededor de fragmentos aislados pertenecientes a la roca huésped, los cuales podrían encontrarse en brechas (Figura 10Q). Estos cristales podrían crecer desde clastos de brecha sueltos o por reemplazo de los bordes angulares en estos mismos, donde, cuando el reemplazo es producido por el mismo cuarzo que constituye el cemento produciría esta textura. Sin embargo este último proceso no es creído ser común en las más habituales texturas cockade (Adams, 1920).

Bandeamiento coloforme: Esta textura consiste de sucesivas bandas de diminutos agregados de sílice, siendo característica de calcedonia. Las superficies externas de las bandas muestran una apariencia generalmente botroidal, esferoidal o reniforme (Figura 10E). Esta tipo de textura es fácilmente reconocible bajo el microscopio usando polarizadores cruzados (Dong et al., 1995).

Calcita hojosa / bladed: Consiste de una red de cristales de calcita los cuales se presentan interconectados, dejando espacios vacíos entre sus hojas (Figura 10F). La formación de calcita hojosa se produce como el resultado de la precipitación de una solución hidrotermal la cual se encuentra saturada con respecto CO_2 . Además los cristales de calcita hojosa se formarían desde un fluido que se encuentra ebulviendo evidenciado por la existencia de inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (Simmons and Christenson, 1994).

Calcita reemplazada por cuarzo / lattice bladed: Esta textura está representada por hojas de calcita las cuales se intersectan unas con otras formando una red, la cual deja espacios poligonales en su interior. A partir de los espacios vacíos entre las hojas crecen los cristales de cuarzo, generalmente con forma prismática bien definida, y de manera perpendicular a la hojas (Figura 10K). Esta textura es fácilmente reconocible a nicols cruzados, donde es posible diferenciar la formación de bandas de cuarzo comb paralelas creciendo a ambos lados de las hojas (Dong et al., 1995).

Ghost bladed textura: Consiste de agregados de cuarzo los cuales dentro muestran hojas aleatoriamente distribuidas en su interior y las cuales son comúnmente identificadas dada su concentración de impurezas, forma y tamaño. A diferencia de la

textura lattice bladed, en esta textura no hay presencia de cavidades entre las hojas (Dong et al., 1995). Esta textura es reconocida de manera simple a nicoles cruzados.

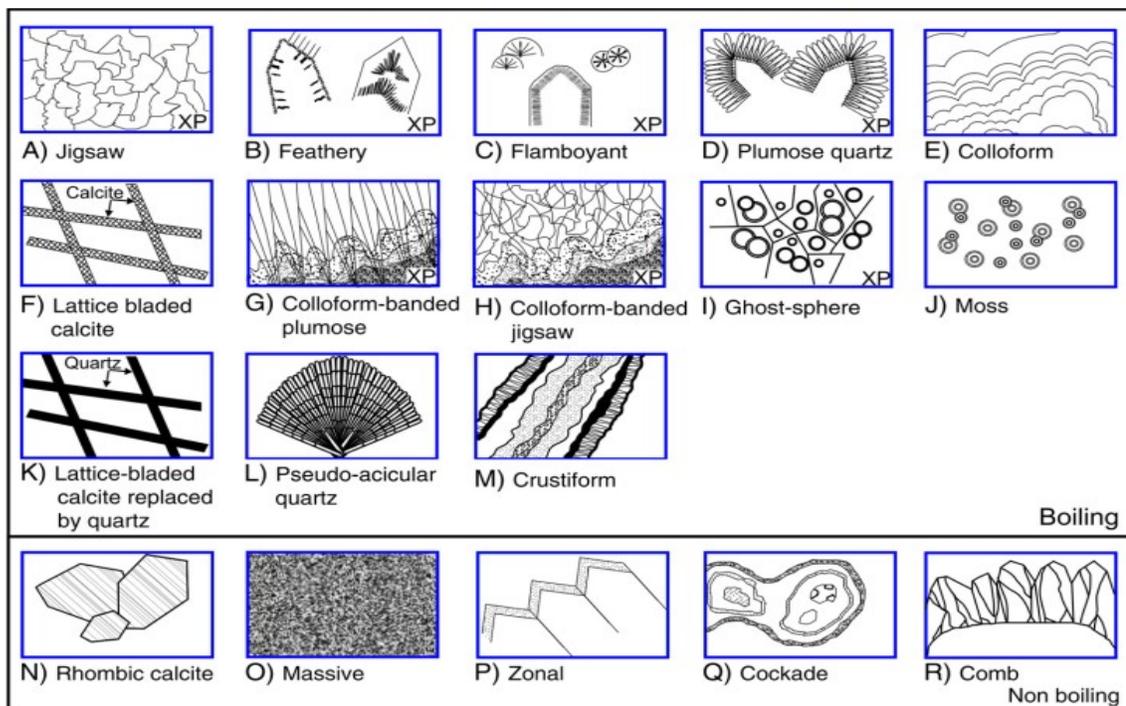


Figura 10: Texturas de sílice y calcita observadas en el ambiente epitermal. Las texturas A – M son características de una deposición rápida, como puede ocurrir durante la ebullición, mientras que las texturas N – R indican que los fluidos que precipitan el mineral no estaban ebulliciendo (Tomado de Moncada et al., 2012).

2.2.4. Inclusiones Fluidas

Las inclusiones corresponden a cavidades microscópicas rellenas de antiguos fluidos atrapados dentro del cristal. Estos fluidos permiten saber las condiciones bajo las cuales se produjo la mineralización. Las cavidades son resultado de imperfecciones durante el crecimiento cristalino producidas al momento de desarrollo mineral o como resultado de procesos ulteriores que pudieran haber producido fracturas, las cuales luego se sellaron o recrystalizaron (Roedder, 1984; Goldstein y Reynolds, 1994).

Hay muchas maneras de clasificar las inclusiones fluidas, tanto en base a su origen, composición, entre otras. Una de las más comunes y más ampliamente utilizadas aquella que relaciona el tiempo en el cual se produjo el atrapamiento de las inclusiones, relativo a la formación del cristal hospedador, como se presenta en la Figura 11. De acuerdo a lo anterior se pueden distinguir cuatro tipos de inclusiones fluidas (Goldstein y Reynolds, 1994; Goldstein, 2003, Bodnar, 2003).

Inclusiones fluidas primarias: se trata de inclusiones las cuales se formaron contemporáneas con el crecimiento del cristal hospedador. Estas inclusiones son generalmente identificadas a lo largo de zonas de crecimiento del cristal, en caras del cristal o pueden aparecer aisladas al interior del mismo. Debe notarse que inclusiones atrapadas en zonas de crecimiento deben tener razones liquido-vapor consistentes para ser consideradas dentro de una misma familia.

Inclusiones fluidas secundarias: se trata de inclusiones las cuales fueron atrapadas a lo largo de fracturas. Estas fracturas se produjeron posteriormente a la formación del mineral hospedador atrapando fluidos al momento de quedar selladas. Estas inclusiones muestran una orientación generalmente en línea, las cuales pueden cortar zonas de crecimiento dentro de un cristal, o bordes entre diferentes cristales.

Inclusiones fluidas pseudo-secundarias: inclusiones atrapadas contemporáneamente con el desarrollo del cristal hospedador, ocurriendo a lo largo de fracturas formadas durante el desarrollo del cristal. Estas familias terminan abruptamente en los bordes del grano o en los bordes de una zona de crecimiento. Para proponer un origen pseudo-secundario para una inclusión se debe observar la presencia de más de una inclusión terminando en el borde de una zona de crecimiento.

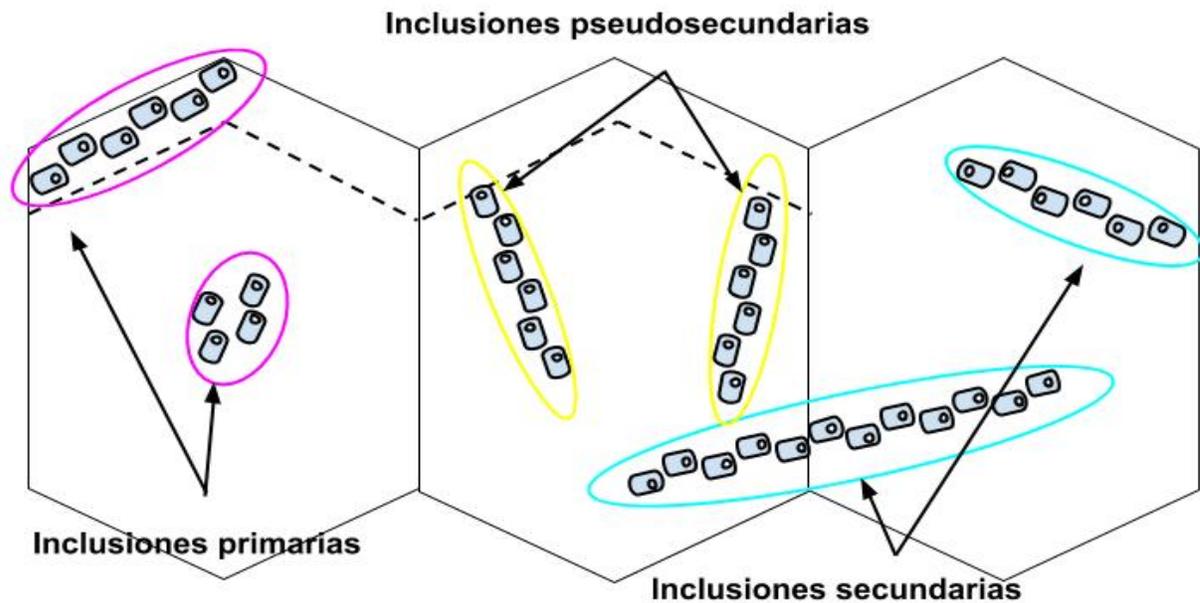


Figura 11: Diferentes arreglos de inclusiones dentro de cristales prismáticos de cuarzo. Encerradas en contornos de color rosado se muestran inclusiones de tipo primario, las cuales pueden reconocerse dentro de zonas de crecimiento del cristal, como aisladas en el centro. Dentro de contornos celestes se observan inclusiones secundarias que suelen presentarse a lo largo de fracturas desarrolladas post-atrapamiento. En contornos amarillos se muestran inclusiones pseudosecundarias las cuales limitan abruptamente la zona de crecimiento del cristal.

Para obtener información confiable a partir del estudio de inclusiones fluidas ciertos principios deben ser seguidos. Estas premisas permiten interpretar las condiciones originales en las cuales fueron atrapadas las inclusiones, ya sean primarias, secundarias o pseudosecundarias. Tales principios son conocidos como las Reglas de Rodder, y corresponden a:

- Las inclusiones atrapan una fase homogénea.
- Luego del atrapamiento no se añade o pierde material desde la inclusión.
- El volumen de la inclusión permanece constante representado un sistema isocórico.

Procesos que pueden afectar una inclusión después del atrapamiento

Inclusiones fluidas originalmente atrapadas pueden ser modificadas a causa de diversos procesos que pueden tomar lugar posterior a su atrapamiento. Los efectos de tales procesos pueden provocar desde la pérdida completa en el contenido de la inclusión hasta cambios leves que solo afecten su volumen o morfología. Muchos autores han estudiado los efectos de estos cambios en inclusiones (Van der Kerhof and Hein, 2001; Goldstein y Reynolds, 1994). Los principales procesos que pueden afectar una inclusión, se detallan a continuación:

Recristalización: Este proceso consiste en la cristalización o recristalización de sólidos atrapados dentro de las inclusiones. Este proceso puede conllevar a importantes cambios en la forma y tamaño de la inclusión, llegando incluso a desarrollar formas de cristal negativo.

Necking-down o estrangulamiento: Se trata de un proceso de disolución-precipitación y difusión a través del fluido o paredes del cristal, el cual produce un cambio de forma en la inclusión, llevando esta última, a formas más estables, volviéndose más redondeadas o con forma de cristal negativo (formas de menor energía libre). Así, aquellas inclusiones que tengan formas más irregulares serán más inestables y propensas a sufrir necking-down.

Decrepitación: Este proceso es debido al efecto que producen cambios de presión-temperatura. Se caracteriza como la fuga parcial o completa de fluido desde el interior de la inclusión. Una reducción de la presión dentro de la inclusión causará que esta colapse hacia el interior, mientras que un aumento de presión conlleva a la explosión de esta última.

Fuga o leakage: este proceso puede ser producido por diferentes condiciones como deformación, etc. El resultado de 'leakage' corresponde a la pérdida del material o fluido originalmente atrapado dentro de la inclusión.

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. Geología regional

El distrito minero de Alhué se encuentra localizado al sur-oeste de Santiago, al este de la localidad de la villa de Alhué, dentro de la cordillera de la costa de Chile. La geología y configuración estratigráfica actual de este distrito a sido el resultado de tres diferentes etapas las cuales han tomado lugar desde el Jurásico al presente. La primera y segunda etapa tienen relación con la deposición de unidades estratigráficas mesozoicas y cenozoicas, mientras la tercera y última tiene relación con el emplazamiento de cuerpos intrusivos.

Condiciones regionales de régimen extensional predominaron durante el desarrollo de la primera etapa evidenciado por los enormes espesores de los depósitos volcánicos y sedimentarios. Estas condiciones se creen ser el resultado de una inclinación en el ángulo de subducción de la placa volviéndose más empinado. Otra explicación corresponde al producto de una subducción de tipo roll-back (Charrier et al., 2007).

La primera etapa consistió en la deposición de las formaciones Cerro Calera, la cual fue luego sobreyacida por la formación Horqueta (Nasi and Thiele, 1980). Posteriormente una leve migración del arco habría tenido lugar, lo cual dio lugar a la formación de una cuenca de antearco conocida por el nombre de Lo Prado y consecuentemente una cuenca de trasarco. Los depósitos más antiguos de esta cuenca corresponden a la formación Lo Prado la cual se encontraría de manera concordante con la formación Horqueta. Esta formación sería sobreyacida por la formación Veta Negra hacia el Cretácico temprano. Esta primera etapa finalmente llegó a su fin por un pulso de deformación compresiva del Cretácico Tardío que invirtió la antigua cuenca del tras-arco y creó una importante discordancia regional (Charrier et al., 2007).

La segunda etapa se desarrolló en condiciones de régimen compresivo provocado principalmente por la disminución del ángulo de subducción, resultado en una subducción plana. Es en estas nuevas condiciones que se habría depositado la formación Lo Valle. Así mismo la tercera etapa se habría desarrollado bajo estas mismas condiciones de régimen compresivos en la que se habrían emplazado cuerpos intrusivos de edad Cretácico superior (Charrier et al., 2007).

3.2. Estratigrafía del distrito

Jurásico

Formación Cerro Calera (Piracés, 1976; Nasi and Thiele, 1980), Aaleniano - Bajociano-superior

Esta formación tiene un origen marino, con abundante contenido fósil y se compone predominantemente de secuencias de rocas sedimentarias constituidas por areniscas tobáceas, calcarenitas, calizas, lutitas fosilíferas y conglomerados. Constituye una franja de sentido general NS y se ubican en el sector del cerro La Calera en la zona oeste del mapa (Figura 12). Las rocas de esta formación presentan una edad Aaleniano Bajociano-superior entregada por la presencia de su contenido fósil (Nasi and Thiele, 1980), siendo la unidad mas antigua dentro del distrito.

Formación Horqueta (Piracés, 1976; SERNAGEOMIN, 2003), post-Bajociano a pre-Berriasiano

Corresponde a una sucesión de rocas de origen continental, principalmente volcánicas y volcanoclásticas, se apoya concordantemente sobre la Formación Cerro Calera y se encuentra subyaciendo de manera concordante al miembro Pataguas de la Formación Lo Prado. Se presenta formando una franja de rumbo aproximadamente NS y se ubica en el sector de Lomas las Tomas en la zona noroeste del mapa. Tiene una edad mínima del jurásico superior acotada por amonites encontrados en el miembro pataguas de la Formación lo prado por Aliste, Pérez y Carter (1960) de edades Berriaciano. Su edad máxima es post-bajociano entregada por la formación a la cual sobreyace.

Cretácico

Formación Lo Prado (Piracés, 1976; SERNAGEOMIN, 2003), Berriasiano superior-Hauteriviano

Esta Formación se encuentra formada por rocas sedimentarias marinas con abundante presencia fosilífera, y rocas volcánicas y volcanoclásticas andesíticas a riolíticas y tobas con intercalaciones de areniscas, areniscas calcáreas, calizas y conglomerados marinos. Las rocas sedimentarias que componen esta unidad tienen mejor desarrollo en la parte inferior de la secuencia (Maksaev, 1975). Esta Formación sobreyace de manera concordante a la Formación Horqueta y subyace, en igual forma, a la Formación Veta Negra.

Formación Veta Negra Barremiano-Albiano (Levi, 1968)

Se encuentra compuesta principalmente por rocas volcánicas, andesíticas a riolíticas, brechas volcánicas, en parte tobáceas, areniscas y conglomerados, con escasas intercalaciones de calizas y areniscas fosilíferas, marinas. En esta formación no se ha documentado la existencia fósiles que puedan aportar cronoestratigráficamente, sin embargo, debe considerarse que ella sobreyace a la Formación Lo Prado, de edad berriasiana-hauteriviana. La edad mínima de estas rocas se encuentra limitada por la intrusión de un stock granítico en rocas de esta Formación, el cual ha sido datado por Vergara y Drake (1979) en 80m.a., esto es, Coniaciano-Santoniano.

Formación Lo Valle (Sernageomin, 2003; Thomas, 1958) Cretácico Superior-Paleógeno

Las rocas pertenecientes a esta Formación son las más jóvenes aflorando en el área, y se encuentran predominantemente en el extremo oriental del área de estudio, en franjas que circundan la laguna de Aculeo. Están conformadas por secuencias volcanosedimentarias continentales correspondientes a conglomerados y areniscas, lavas andesíticas y riolíticas, así como también ignimbritas y brechas. La edad de esta Formación puede acotarse en base a sus relaciones de contacto con aquellas unidades que la limitan, así al encontrarse sobreyaciendo la Formación veta negra se puede asignar una edad máxima del cretácico superior. Del mismo modo al encontrarse intruida por un stock granítico se deduce una edad mínima del Coniaciano-Santoniano, Vergara y Drake (1979).

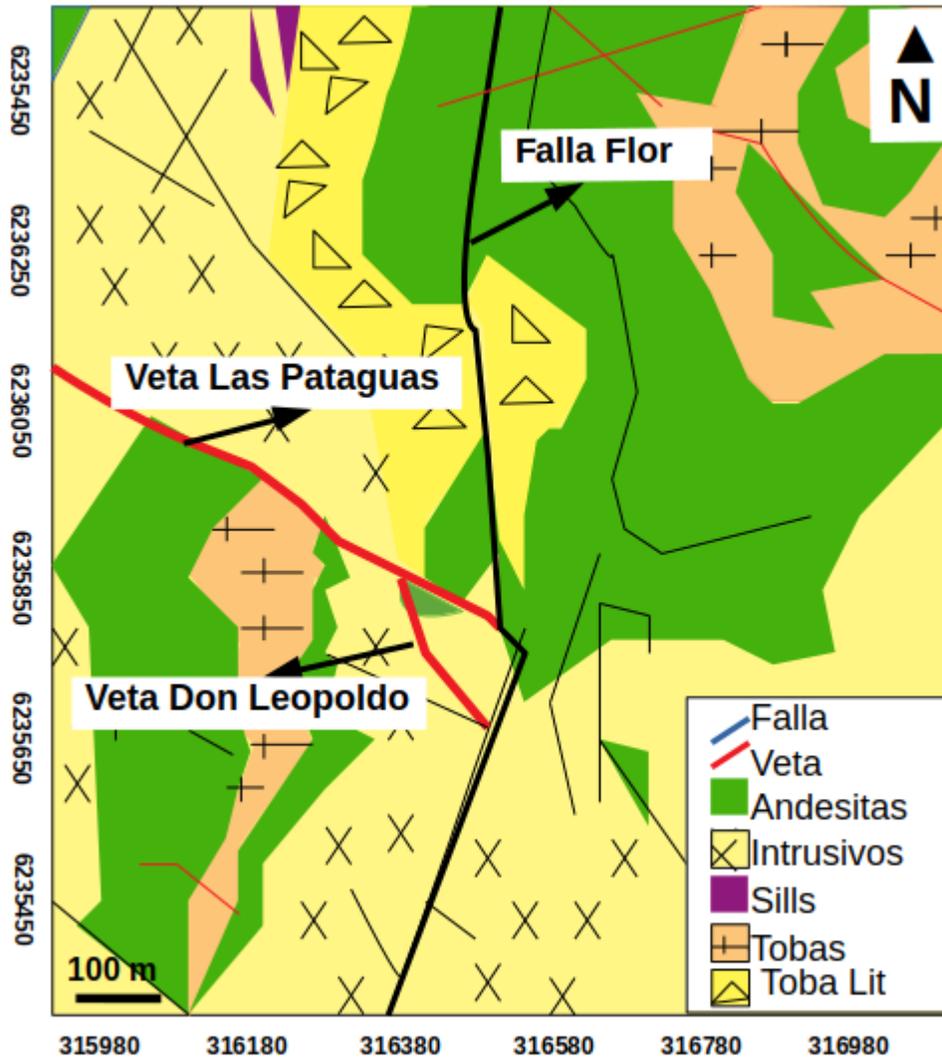


Figura 12: Mapa geológico de la zona de estudio (Modificado Yamana Gold no publicado)

2.3. Intrusivos

Granitos jurásicos

Rocas intrusivas de edad jurásico medio-tardío forman un extenso batolito en la zona de Chile central, en la latitud de la ciudad de Santiago. Estos intrusivos incluyen varias unidades (Laguna Verde, Sauce, Peñuelas, Limache and Lliu-Lliu) abarcando diferentes tipos de cuerpos intrusivos como ganodioritas, dioritas y tonalitas (Gana and Tosdal 1996; Godoy and Loske, 1988). Estos autores además señalan como el emplazamiento de estas unidades ocurrió en un tiempo aproximado de tan solo 6 millones de años, entre 162 Ma y 156 Ma, lo que sugiere la existencia de un pulso muy rápido de ascenso de grandes cantidades de magma.

Cuerpos subvolcánicos y monzogranito (cretácico superior)

En el lado este de la cordillera de la Costa son expuestos cuerpos graníticos, los cuales presentan una edad correspondiente al cretácico superior. Estas rocas corresponden a un batolito costero intruyendo aquellas secuencias paleozoicas y jurásicas de la zona (Gana y Tosdal 1996). Estos cuerpos plutónicos están expuestos más al sur a lo largo de la frontera oriental de la Cordillera de la Costa (hasta latitud de Talca), donde medición de un monzogranito produjo una edad K-Ar en biotita de 100.3 Ma (Bravo 2001).

2.3. Mineralización.

El distrito minero de Alhué se ubica al suroeste de Santiago dentro de la franja metalogénica del paleoceno-eoceno temprano. Esta franja se localiza dentro de la Cordillera de la Costa de Chile Central. Dentro de esta zona distintos metales como oro, plata, cobre, plomo, zinc alcanzan leyes económicas (Camus et al, 1982; Makshev et al, 2006).

Un gran número de vetas de Au-Cu del tipo mesotermal y epitermal se encuentran a lo largo de esta franja dentro de la cordillera de la costa. Estas vetas se presentan asociadas a rocas ígneas de edad cretácico tardío dentro del distrito del Alhue. A lo largo de la Cordillera de la Costa en la parte de Chile central, los distritos de Inca de Oro, El Espino, Farellón Sánchez, El Bronce de Petorca, Alhué y Lo Chancón son todos un claro ejemplo de este tipo de mineralización (Makshev et al, 2006).

Además vetas ricas en plata del tipo mesotermal se hospedan en rocas de edad jurásica a cretácico inferior. Estas vetas ocupan un número importante de depósitos dentro del área como los distritos de Caracoles, Chimberos-Tres Puntas, Chañarcillo y Arqueros. La mayoría de estos depósitos actualmente se encuentran sin actividad minera (Makshev et al, 2006).

La mineralización polimetálica de estos sistemas presenta un fuerte control litológico y estructural, caracterizando los depósitos del cretácico tardío. Las vetas generalmente se presentan constituidas por cuarzo, sulfuros y sulfosales (pirita, arsenopirita, con cantidades variables de calcopirita, esfalerita, galena y tetraedrita) y barita y carbonatos, los cuales se encuentran en cantidades menores. Además, algunas vetas incluyen cantidades importantes de magnetita y hematita como es el caso de Alhué.

Distintas dataciones se han llevado a cabo con el fin de restringir los tiempos de mineralización dentro de la zona. Dataciones llevadas a cabo en K/Ar en rocas intrusivas pre y post-mineralizadas acotan el tiempo de la mineralización entre los 95 y 83 millones de años. Además dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dentro de la veta Maqui arrojan edades de 86 and 82 Ma (Cotton et al. 1999).

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis de muestras de mano

Un total de setenta muestras de rocas son descritas en base a criterios estructurales y mineralógicos. Estas observaciones tienen el propósito de analizar los distintos estilos de mineralización que se hicieron presentes en la veta, así como la paragénesis de los minerales que contienen la mena en el depósito. La importancia de la secuencia de eventos que ocurrieron en la veta es esencial para entender su mineralización.

Mediante este análisis se busca reconocer cómo se relacionaron los diferentes minerales constituyentes de las vetas y vetillas, especialmente aquellos asociados a la mena. dado que las secciones preparadas fueron recubiertas con aceite de inmersión, no pueden ser observadas usando el microscopio BX51 para el reconocimiento de metales. La capa de aceite de inmersión añadido interfiere con la visualización clara de estos metales al microscopio.

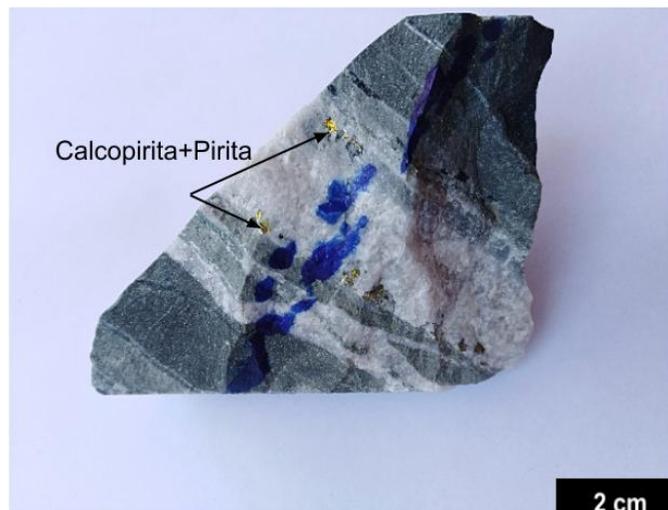


Figura 13: Muestra de roca DM-153, mostrando mineralización de calcopirita y pirita.

4.2. Preparación de cortes

Setenta muestras de laminas delgadas son seleccionadas a fin de llevar a cabo el estudio de inclusiones fluidas de este trabajo. La preparación de los especímenes se realiza en el laboratorio de cortes de la Universidad de Chile. Inicialmente se trabaja con la máquina PetroThin en la cual las muestras de roca son cortadas, para luego ser devastadas en este misma.

Hay tres tipos de muestras que es posible preparar para llevar a cabo un estudio petrográfico. Estas son conocidas como, cleavage fragment, quick plates, o cortes doblemente pulidos. Aquí dada la cantidad de muestras a preparar y los objetivos del estudio, se preparan solamente muestras rápidas o 'quick plates'.

Inicialmente la cara seleccionada para cortar la muestra se debe limar, hasta que la superficie de pegado se encuentre completamente plana. Luego las muestras (calugas) deben ser secadas por alrededor de treinta minutos en un horno con temperatura de aproximadamente 40°C. Posteriormente estas son pegadas a una placa de vidrio, usando un pegamento frío y cuidando que no haya aire entre la muestra y la lámina de vidrio.

Utilizando la máquina PetroThin las muestras ya pegadas deben ser cortadas hasta un tamaño de entre 300-500 μm (0.5mm) de espesor. Una vez cortadas, los cortes son devastados hasta alcanzar un tamaño óptimo entre los 120-150 μm , lo cual es medido usando el calibre de espesor de vidrio. Además de guiarse por el grosor del corte al llevar a cabo la preparación, el principal indicador de que el proceso de devastado ha sido finalizado y que la muestra se encuentra lista para llevar a cabo el estudio de petrografía, corresponden a los colores de interferencia mostrados por los minerales cuarzo y calcita.



Figura 14: Máquina PetroThin utilizada para preparar los cortes de roca.

Un aceite de inmersión, una vez preparada la muestra (cortada y devastada), debe ser colocado sobre la superficie superior de la lámina delgada. Este aceite, que debe tener un índice de refracción cercano al del mineral sobre el cual se desean mirar las inclusiones, cumple la función de llenar todos los pits sobre la superficie del mineral, para de este modo dejar pasar la luz recta a través del cristal, sin ser refractada. Posteriormente un cubreobjetos debe ser puesto sobre la superficie lisa de la lámina, quedando lista para llevar a cabo el estudio petrográfico.

4.3. Filosofía del estudio de inclusiones fluidas

Antes de realizar un estudio de inclusiones fluidas el inclusionista debe emplear un buen procedimiento, el cual lo conducirá a la correcta obtención de sus resultados. Este procedimiento se detalla a continuación:

- Inicialmente en cualquier estudio de inclusiones es necesario plantear cuál es la pregunta a la cual se apunta resolver.
- El siguiente paso trata de tomar las muestras adecuadas en el campo con el fin de tener las limitaciones correctas par el alcance del estudio.
- Luego se debe estudiar el contexto del mineral en el cual las inclusiones son observadas, para de esta manera poner el estudio dentro de un marco paragenético de referencia.
- El siguiente paso trata acerca de llevar a cabo la caracterización de la petrografía de inclusiones fluidas. En este paso se debe llevar a cabo la determinación del origen de las inclusiones, y como ellas encajan en la secuencia paragenética. También en este paso se debe registrar la consistencia de las razones volumétricas de las fases presentes.
- Una vez se han encontrado las inclusiones adecuadas, el siguiente paso corresponde a la realización de estudios microtermométricos, con el objetivo de determinar las condiciones de deposición.
- El último paso consiste en la utilización de técnicas más sofisticadas si esto es requerido.

4.4. Petrografía de inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas es realizado empleando un microscopio Olympus BX53, el cual se encuentra en el laboratorio de inclusiones fluidas de la Universidad de Chile (Figura 15). Este cuenta con diferentes niveles de aumentos, 4x a 10x los cuales son utilizados para la petrografía de las diferentes texturas en los cortes. Por otra parte, para llevar a cabo el análisis de inclusiones fluidas, aumentos de 40x a 80x son empleados generalmente.

Este equipo se encuentra conectado a un computador donde se puede registrar la información observada. Mediante el uso del software Linksys32 se lleva a cabo la toma de fotografías tanto de texturas minerales como inclusiones. El funcionamiento del programa Linksys32 permite la captura de imágenes en diferentes resoluciones y formatos.

En un total de setenta muestras de roca, se describe la textura mineral observada tanto para cristales de cuarzo y calcita. Se distinguen texturas de cuarzo jigsaw, comb, zonal, euedral, crustiforme, coloforme, cockade y texturas de calcita rómbica, en hojas o textura de reemplazo de calcita por cuarzo. La identificación textural es simple y generalmente se realiza a nicoles cruzados.

Luego de realizado el análisis petrográfico y textural de las muestras de estudio, se procede a la realización de la petrografía de inclusiones fluidas dentro de la variedad de tipos de texturas encontrados. Se reporta los diferentes tipos de familias de inclusiones presentes en base a su composición y relación líquido-vapor. Se identifica y reporta junto con lo anterior, los diferentes arreglos exhibidos por las inclusiones, los cuales dieron luz a el origen de las mismas.

Además de la identificación de los distintos tipos de familias de inclusiones fluidas, además se señala la identificación de fases sólidas al interior de las inclusiones. Sus características en cuanto a morfologías, tamaños, ubicación son registrados dada su importancia para otros análisis. Cambios sufridos posteriormente al atrapamiento por el cristal hospedador son también notados.



Figura 15: Microscopio Olympus BX53, conectado con Linkam THN-600. Universidad de Chile.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de muestras de mano

Setenta muestras extraídas a partir de sondajes realizados en la veta Don Leopoldo son analizadas macroscópicamente. El objetivo es describir las asociaciones minerales presentes en cada una de ellas (paragénesis), tipos de alteración, estilos de mineralización, y textura para los principales minerales de ganga que constituyen el depósito en estudio. Estas observaciones son apoyadas con análisis microscópicos de cortes transparentes y pulidos.

De acuerdo con las observaciones realizadas, dos alteraciones se hicieron presentes en la veta en estudio. El tipo de alteración más ampliamente encontrado, en alrededor de un ~90% de los especímenes corresponde a una alteración de tipo propilítica. Esta es vista y definida por una mineralización de cuarzo-clorita-epidota-pirita más comúnmente encontrada, cuarzo-clorita-epidota-calcita-pirita. (Figura 16A).

Un segundo tipo de alteración, menos frecuentemente identificado en el estudio con aproximadamente un 5% de las secciones observadas corresponde a una alteración del tipo argílica. Esta alteración se identifica principalmente por la existencia plagioclasas alteradas ligeramente a arcillas en la matriz, junto con cuarzo en vetillas (Figura 16B). En un número de casos más reducido es posible reconocer vetillas conformadas exclusivamente de epidota.

Diferentes estilos de mineralización es posible reconocer en las rocas analizadas, los cuales dejan ver como la deposición de la mena se lleva a cabo bajo un régimen de tipo frágil dominado por presión hidrostática. Este régimen conlleva a diferentes estilos de mineralización, los cuales se presentan de cuatro formas diferentes. Vetillas, vetas, stockworks y brechización marcan diferencias estructurales en la deposición de la mena.

El estilo de mineralización más observado corresponde a vetillas las cuales varían en tamaño entre 1-1.5 cm. Estas vetillas se muestran, en la gran mayoría de los casos rellenas por cuarzo, con menores proporciones de clorita y epidota. También se observan vetas, las cuales alcanzan hasta 4 cm de grosor, y las cuales se presentan constituidas esencialmente por cuarzo con epidota, clorita en menor proporción y calcita. (Figura 16C).

Más escasamente se identifica la presencia de mineralización en stockwork de vetillas, las cuales tienen tamaños generalmente menor a 3-5 mm, y muestran estar constituidas solamente por cuarzo. Mineralización en brecha, en la cual el relleno de cuarzo se dispuso en forma concéntrica es observado escasamente. Generalmente se asocian a texturas de cuarzo coloforme con bandas concéntricas alrededor de los fragmentos (Figura 16D).

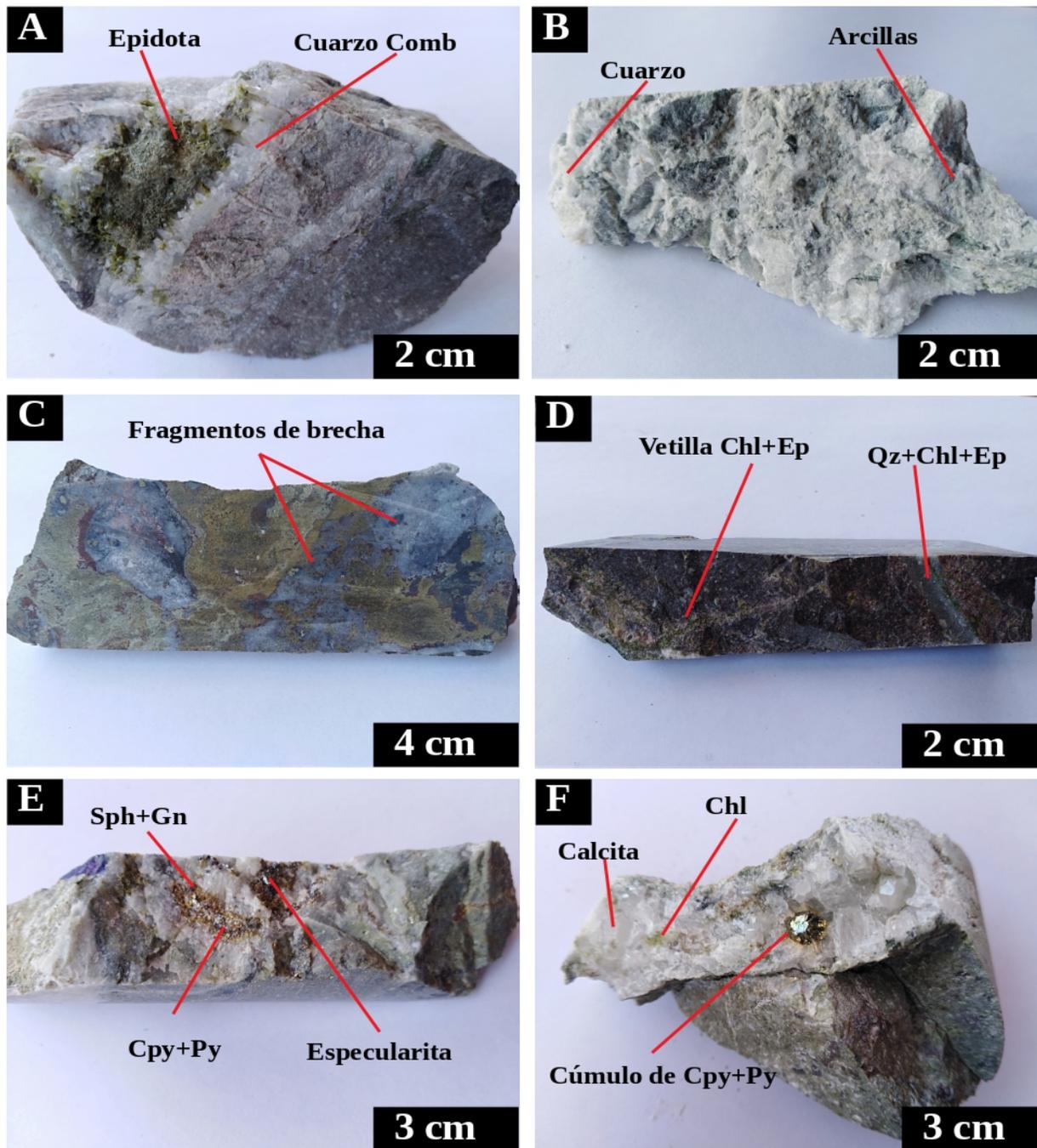


Figura 16: Muestras de mano pertenecientes a la veta Don Leopoldo. A. Alteración de tipo propilítica. B. Alteración de tipo argílica, marcada por la presencia de arcillas y cuarzo. C. Se presenta una brecha altamente alterada en su superficie, la cual se encuentra rellena por cuarzo con textura coloforme. D. Se muestran distintos tamaños de vetillas, algunas de las cuales están rellenas principalmente por epidota y clorita, y otras por cuarzo y clorita. E y F. Principales minerales de mena dentro del depósito, los cuales corresponden a calcopirita, esfalerita y galena.

Mediante el análisis macroscópico de las muestras es posible identificar que la mineralización de la veta Don Leopoldo corresponde principalmente a calcopirita, galena, esfalerita. Esos minerales además son siempre encontrados junto con pirita diseminada tanto en las vetas y vetillas, como en la matriz de la roca, como es visto en la Figura 16 E, F. La presencia de oro y plata no es observada dada su aparición solamente en cantidades trazas.

Mineralogía de ganga como cuarzo y calcita generalmente se presentan identificados como los dos minerales principales dentro de las vetillas. Los diferentes tipos de texturas en las cuales se muestran cada uno de estos son detallados en la sección de petrografía de texturas. Sin embargo, algunas texturas son posibles de reconocer incluso en muestras de mano, como cuarzo comb, crustiforme, coliforme.

Se observa como esta mineralización de metales es comúnmente encontrada en las paredes de las vetillas, disponiéndose a lo largo de estas. En otros casos la mineralización se encuentra alojada en la parte más central de la veta, mostrando como la deposición de metales pudo ser posterior a la cristalización de cuarzo. Escasamente se observa mineralización en la matriz de la roca.

En cuanto a las relaciones de contacto entre las diferentes asociaciones minerales encontradas se observa como vetillas constituidas por cuarzo, epidota y clorita, pirita se presentan sin mineralización evidente de sulfuros. En otros grupos de muestras, esta mineralización se hace evidente hacia la zona central de la vetilla, indicando su origen posterior al crecimiento de los minerales de ganga. Vetillas constituidas por epidota y pirita se encuentran cortando vetillas de cuarzo, clorita epidota.

Otro tipo de relación observada corresponde a la existencia de especularita, ilmenita por sobre pirita y cuarzo dispuestos en vetillas. Estas asociaciones se presentan cortando otras vetillas que presentan mineralización de esfalerita en paragénesis con galena y calcopirita, lo cual muestra como este evento corresponde a un proceso de oxidación posterior a la deposición de los principales minerales de mena dentro del sistema. La presencia de metales preciosos no es observada dentro del estudio dada sus concentraciones y cuya existencia solamente es conocida por medio de los análisis geoquímicos.

5.2. Geoquímica

Setenta muestras de roca, las cuales provienen de sondajes realizados en el distrito minero de Alhué son analizadas para roca total. Estos análisis miden tanto elementos mayores presentes en la veta como elementos trazas. Los metales más importantes calculados corresponden a los elementos preciosos de oro y plata, junto con metales base de cobre, plomo y zinc.

De la geoquímica de elementos mayores se puede observar como muchas muestras registran un elevado porcentaje de calcio, el cual de acuerdo a las observaciones llevadas a cabo se debe a la presencia de calcita. Elementos mayores presentes en la veta no son de especial interés para el análisis de este estudio. La discusión siguiente se centra en aquellos metales trazas al interior del sistema.

De los resultados obtenidos para elementos menores y trazas se puede constatar como las concentraciones de metales preciosos oro y plata muestran rangos de valores bastante amplios. Las concentraciones de estos metales se presentan variando en hasta en tres órdenes de magnitud, desde unos pocos ppb hasta ppm, Au: 4.36-0.0025 ppm, Ag: 38-0.25 ppm. Por otra parte, los metales bases muestran concentraciones mucho más elevadas, alcanzando hasta cuatro órdenes de magnitud más que los metales preciosos y de igual forma es posible ver grandes variaciones en sus valores, donde generalmente zinc es encontrado en mayor proporción que cobre y plomo, Zn: 2.41-0.004 %wt, Cu: 0.58-0.0003 %wt y Pb:0.47-0.001 %wt.

Otros elementos los cuales pueden representar interés en depósitos de tipo epitermal y que aquí se encontraron en cantidades significativas, correspondieron a antimonio (Sb), arsénico (As). A continuación se presentan los resultados más significativos obtenidos a partir de los análisis de roca total realizados en los testigos de sondajes (Tabla 1).

	Au (ppm)	Ag (ppm)	Zn (%wt)	Pb (%wt)	Cu (%wt)	As (ppm)	Sb (ppm)
Muestra							
DM-29	0,373	2	0,172	0,057	0,0127	115	8
DM-30	0,033	1	0,041	0,036	0,0236	27	5
DM-32	0,447	10	0,082	0,046	0,0109	75	5
DM-34	2,6	8	2,03	0,06	0,0868	58	2,5
DM-35	1,1	12	2,41	0,108	0,584	146	11
DM-36	1,1	12	2,41	0,108	0,584	146	11
DM-112	1,7	4	0,091	0,022	0,0059	56	18
DM-113	1,2	38	0,625	0,07	0,0396	40	16
DM-117	0,5	4	0,061	0,04	0,0241	158	2,5
DM-122	0,9	12	0,755	0,466	0,11	26	9
DM-130	0,139	5	0,124	0,01	0,0091	216	2,5
DM-131	4,4	12	0,221	0,086	0,0296	85	11
DM-132	4,4	12	0,221	0,086	0,0296	85	11
DM-133	0,225	9	0,202	0,069	0,0614	62	12
DM-134	0,314	12	0,245	0,071	0,08	89	14
DM-141	3,2	17	1,465	0,086	0,1	51	16
DM-142	3,2	17	1,465	0,086	0,1	51	16
DM-154	0,5	1,6	0,121	0,0725	0,0271	95	8
DM-159	0,5	0,25	0,0262	0,0136	0,0214	40	5
DM-160	0,5	7,1	0,193	0,115	0,0825	23	11
DM-163	0,484	2,1	0,1755	0,127	0,0379	19	14
DM-164	0,111	2,6	0,532	0,171	0,0477	18	19
DM-179	0,191	5	0,178	0,099	0,126	41	8

Tabla 1: Se muestra la concentración de los principales metales dentro de la veta don Leopoldo. Las concentraciones tanto de oro (Au), plata (Ag), arsénico (As) y antimonio (Sb) se encuentran en ppm, mientras para metales base, estas son expresadas en porcentaje.

5.3. Texturas de minerales de ganga en la Veta Don Leopoldo

Setenta muestras de laminas delgadas de la veta Don Leopoldo son analizadas petrográficamente. Mayoritariamente se observa la presencia de cuarzo, como el principal mineral de ganga, el cual estuvo presente en aproximadamente un 95% de las muestras estudiadas. Un segundo mineral de ganga que también se identificada corresponde a calcita, la cual a diferencia de cuarzo, esta presente en un porcentaje mucho menor (15%).

De acuerdo con las condiciones físico-químicas predominantes en la solución hidrotermal al momento de precipitar, el cuarzo puede presentar una variedad amplia de texturas. Cada textura se debe a condiciones y procesos diferentes por lo cual entregan valiosa información. Aquí fueron reconocidos un total de ocho tipos diferentes de texturas para cuarzo, las cuales se detallan a continuación.

La textura más ampliamente reconocida a lo largo del estudio abarcando un 80% de las muestras, corresponde a cuarzo jigsaw, el cual presenta tamaños <0.1 mm. Esta textura corresponde a un intercrecimiento de microcristales de cuarzo, los cuales presentan interdigitación en sus bordes, debido principalmente al reducido espacio y rápida deposición a partir de fluidos hidrotermales ebuliendo. Este tipo de cuarzo comúnmente se identifica rellenando completamente las vetillas, o completando espacios en la parte central de cuarzo comb. Con este tipo de cuarzo se asocian tanto inclusiones líquidas como ricas en vapor (Figura 17A,B).

La segunda textura mayoritariamente reconocida en cristales de cuarzo, encontrándose en alrededor de un 22% de los especímenes observados, corresponde a la textura de cuarzo euhedral. En esta los prismas de cuarzo muestran un tamaño variando entre 0.3-1.0 mm. Esta textura deja ver cristales con caras bien formadas y se registran inclusiones ricas en vapor primarias e inclusiones líquidas dentro de los mismos.

La textura de cuarzo comb es encontrada en aproximadamente un 15% de los cortes en estudio, la cual se muestra generalmente con tamaños entre los 0.5-2.0 mm, con cristales bien formados. En este tipo de cuarzo se pueden observar generalmente todos los tipos de inclusiones de buen tamaño. De acuerdo a Adams (1920), esta textura corresponde a prismas, los cuales se desarrollan de manera perpendicular a la pared de la vetilla y dispuestos paralelamente unos con otros (Figura 17C,D).

Cuarzo plumoso es el tipo de cuarzo mas escasamente reconocido dentro de la veta, cuyo tamaño muestra ser de aproximadamente 2mm. En la Figura 17G y 17H se observa como microcristales de cuarzo se encuentran creciendo a partir de un cristal de cuarzo subhedral, donde ambos dominios presentan diferencias de extinción.

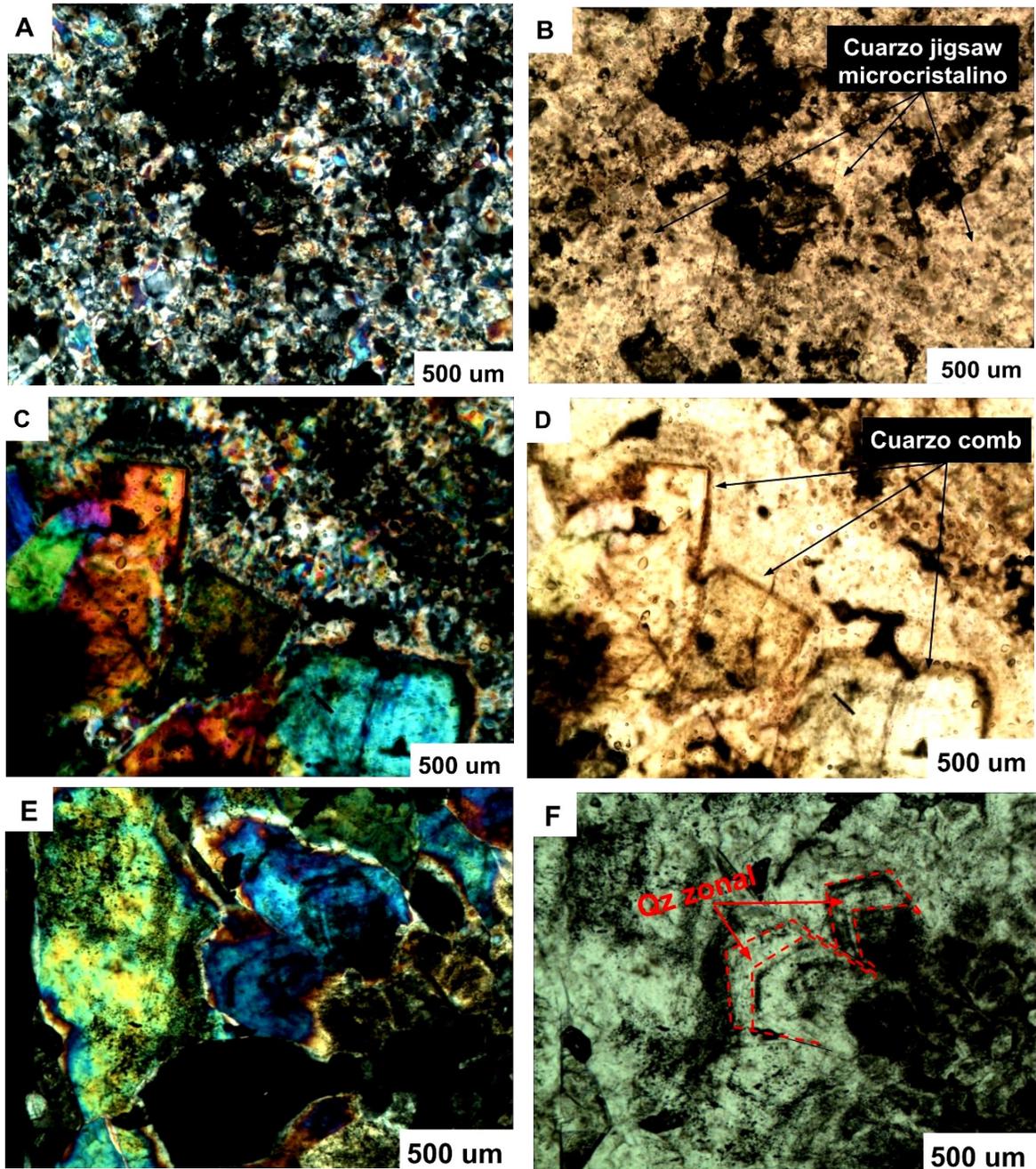


Figura 17: A y B. Se observa textura de cuarzo jigsaw tanto a nicoles paralelos como cruzados, la cual es ampliamente vista durante el estudio. C y D, muestran textura comb en la cual es posible ver arreglos de inclusiones primarias tanto ricas en líquido como vapor. E y F, se presenta cuarzo zonal, donde claramente las zonas de crecimiento están delimitadas por la presencia de inclusiones en el cristal.

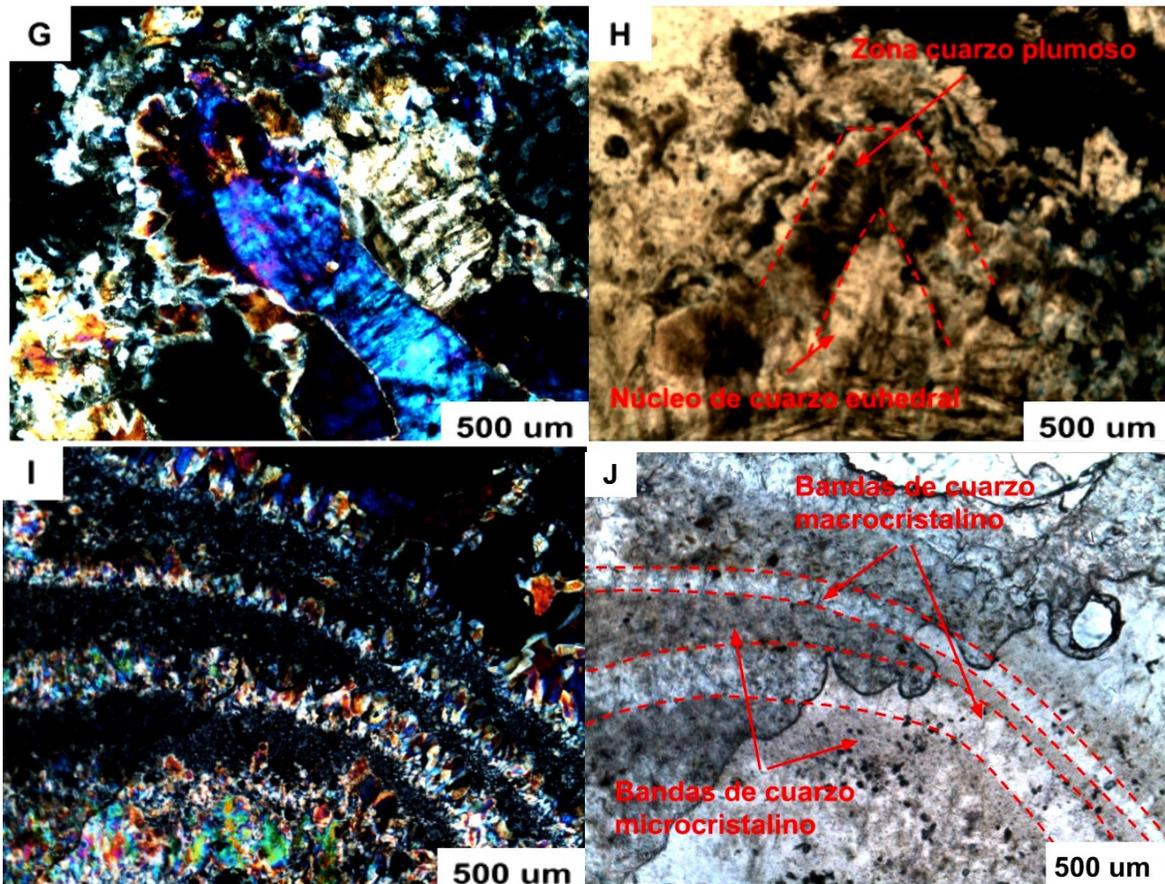


Figura 17: (Continuación) G y H, corresponde a un núcleo central de cuarzo prismático en el cual crecen pequeños cristales los cuales muestran un patrón de extinción plumoso. I y J, se observa textura de cuarzo crustiforme a nicoles cruzados y paralelos respectivamente, se puede observar como el grosor de cada banda varía entre 0.1 - 0.3 mm.

La textura de cuarzo colofome tiene una abundancia de un 6% a lo largo de la veta, las cuales se mostraron generalmente en bandas, las que varían levemente en tamaño en escala sub-micrométrica. Esta textura se formaría en condiciones de sobresaturación en sílice. Es posible distinguir como las bandas muestran una forma botroidal tal cual aparece en la Figura 17I,J.

El cuarzo crustiforme es identificado solamente en un 6% de las muestras de cuarzo, las bandas exhibieron un tamaño de unos pocos milímetros de espesor. Esta textura se forma rellenando espacios abiertos en donde las caras prismáticas son bien desarrolladas. Esta textura se observa mejor a nicoles cruzados y muestra de mano, siendo a nicoles paralelos difícil su reconocimiento.

Calcita es uno de los minerales más solubles que son generalmente encontrados y el cual, además es reemplazado a menudo por cristales de cuarzo. Entre las muestras analizadas solo en un 20% de las muestras es identificada deposición de calcita, mientras en un porcentaje aún menor, esta se ve reemplazada completamente por cuarzo. Se reconocen diversas texturas en calcita, las cuales son debidas a un proceso primario de deposición, mientras otras son producto de reemplazo de los moldes preexistentes de este último mineral.

Calcita en hoja muestra tener una predominancia baja encontrándose solamente en un 2% del total de las muestras. Este tipo de calcita muestra tamaños de escala submilimétrica 0.2-0.7mm, y es pensada ser desarrollada en durante un proceso de ebullición, donde el fluido precipita rápidamente calcita en condiciones de pH neutro (Figura 18A,B). Calcita rómbica es una de las formas comúnmente observadas, la cual es fácilmente reconocible tanto a nicoles paralelos como cruzados debido a la presencia de su macla, rasgo característico de este mineral (Figura 18C,D) Esta textura se identifica en alrededor de un 15% de las muestras de roca, donde generalmente los cristales se mostraron bien desarrollados, con tamaños de 0.3-1 mm.

Calcita en hoja reemplazada por cuarzo es aún menos abundante al interior de la veta, identificándose solamente en un 1% de los especímenes en estudio. Se pudo observar diferentes arreglos para esta textura, dependiendo en como los cristales de cuarzo se desarrollaron dentro de los moldes de calcita. Cuarzo es observado reemplazando calcita en hoja macrocristalina, la cual es fácilmente reconocible a nicoles cruzados, y muestra dos diferentes dominios de cuarzo creciendo desde los moldes de calcita. Un primer dominio se define por la localización de diminutos cristales de cuarzo al interior de las hojas de calcita, el cual presenta una textura jigsaw. Un segundo dominio se constituye por el intercrecimiento de cuarzo entre las hojas, donde cristales prismáticos de este mineral crecen perpendiculares a las moldes de calcita, y van gradando a cuarzo jigsaw hacia el centro (Figura 18E,F).

Cuarzo reemplazando calcita en hoja es también encontrado como cristales milimétricos homogéneamente distribuidos y de textura mosaico, donde la forma en hojas es solamente definida por su concentración de impurezas. Estos cristales son pensados haber intercrecido junto con calcita, los cuales posteriormente son reemplazados y recristalizados, dando lugar a nuevos cristales, los cuales aprovechan los cristales de cuarzo original y siguen las mismas orientaciones cristalográficas.

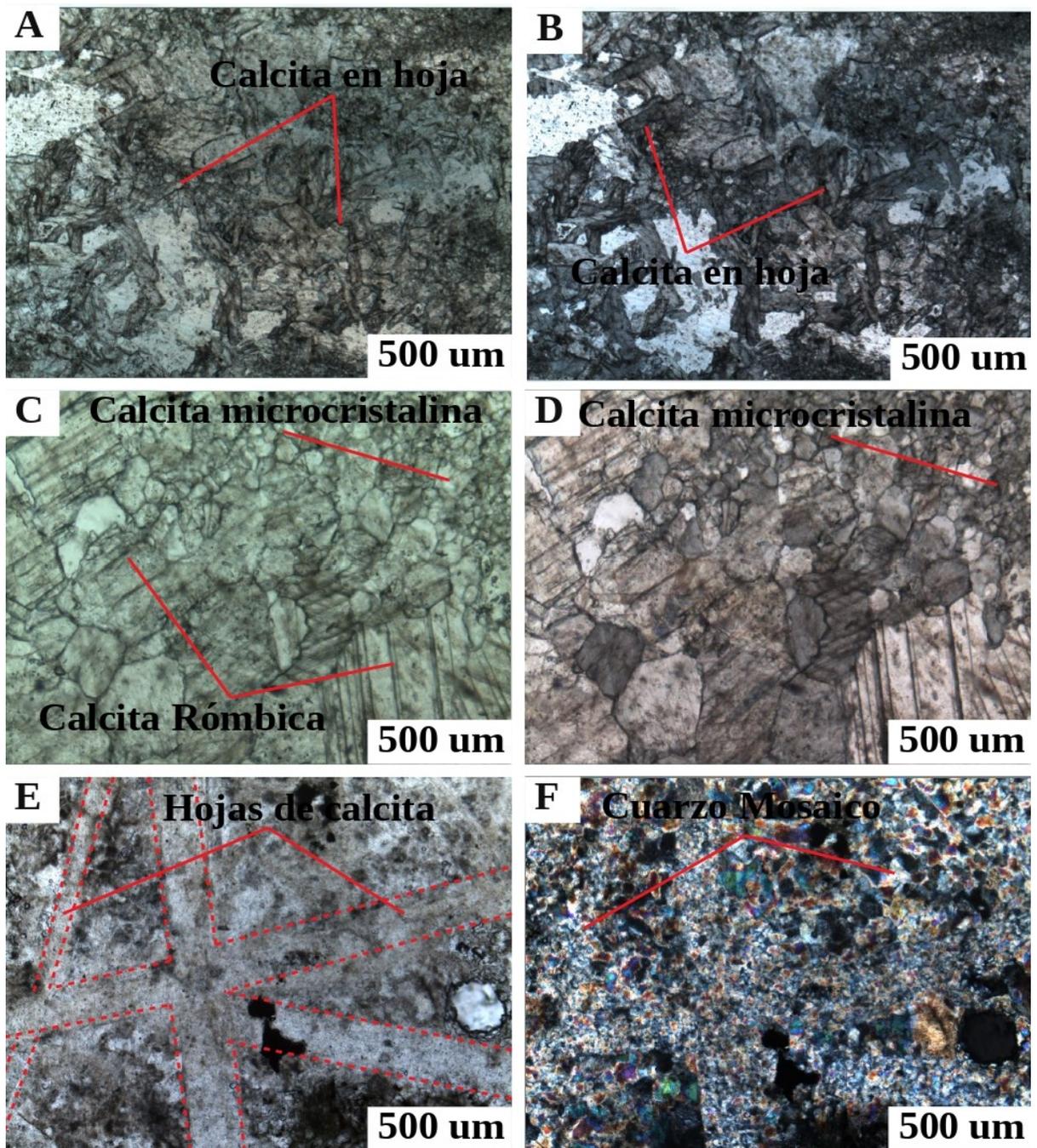


Figura 18: Microfotografía mostrando texturas de calcita en hoja junto con sus productos de reemplazo por cristales de cuarzo. A y B muestran cristales de calcita en hojas de tamaños milimétricos a nicoles cruzados y paralelos respectivamente. C y D, muestran cuarzo reemplazando calcita, en la cual los antiguos moldes de calcita solo se reconocen debido a su concentración de impurezas. E y F, muestran moldes de calcita claramente definidos los cuales fueron reemplazados por cuarzo jigsaw. G y H, muestra calcita rómbica la cual fue el tipo de textura más comúnmente vista.

A continuación se presenta un gráfico resumen de la cantidad total de muestras analizadas en el la veta, junto con el tipo de textura encontrado ordenado según su abundancia dentro del sistema. Se observa claramente que la textura mosaico predomina dentro de la veta y lo cual está de acuerdo con el hecho que el mayor porcentaje de familias de inclusiones sean de tipo secundario Figura 19.

Se puede observar además cómo en una misma muestra de roca se hicieron presentes generalmente más de un tipo de textura de cuarzo, esto último dado que el número de tipos texturales distintos supera a la cantidad total de muestras. Además las texturas de calcita representan un menor porcentaje en comparación a los tipos de cuarzo.

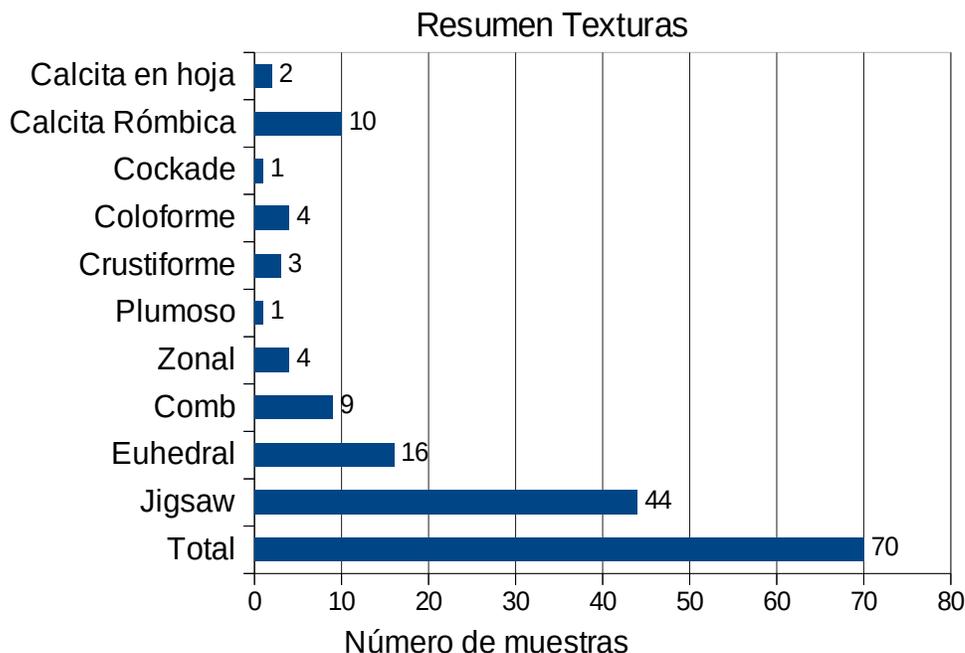


Figura 19: Gráfico resumen de las cantidades de tipos de textura de cuarzo y calcita encontrados a lo largo de este estudio.

5.4. Petrografía de inclusiones fluidas

Inclusiones fluidas son investigadas en setenta muestras conteniendo principalmente cuarzo y calcita. Estos minerales se observan relleno de vetillas, junto con mineralización de calcopirita, galena, esfalerita, oro y plata en trazas. Las inclusiones fluidas muestran ser abundantes en los cristales de cuarzo, por el contrario inclusiones en calcita son escasamente observadas, siendo sus tamaños muy pequeños ~1um en diámetro, monofásicas, aunque esta última característica es difícil de observar debido al pequeño tamaño, pudiendo haber otras fases presentes.

Según en qué textura de cuarzo se encuentran las inclusiones y el tamaño del cristal hospedador depende la claridad con la cual es posible distinguir las inclusiones dentro del cristal. En general las inclusiones de mayor tamaño son identificadas en texturas de cuarzo comb, zonal, euhedral, las cuales variaron en tamaño desde 5-15 um. Inclusiones encontradas en texturas de cuarzo jigsaw, crustiforme exhiben tamaños generalmente pequeños entre 1-5 um. En cuarzo plumoso, coliforme no es posible observar buenas inclusiones.

Basado en morfología, composición y proporción de las fases líquido-vapor al interior de las inclusiones, cuatro tipos de familias de inclusiones fluidas (FIA's) pueden ser reconocidos en los diferentes tipos de cuarzo, las cuales en algunos casos se presentan relacionadas a la mineralización. Los diferentes tipos consisten en FIA's de inclusiones ricas en líquido, inclusiones ricas en vapor, FIA's de inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor y finalmente inclusiones con presencia de halita.

De los distintos tipos de familias de inclusiones fluidas analizadas, el grupo que muestra ser más predominante, encontrándose en alrededor de un 60% de las muestras de estudio corresponden a inclusiones ricas en líquido, las cuales varían en tamaño entre 2-10 um. Aquellas familias de inclusiones cuya fase predominante fue vapor, solo se observan en alrededor de un 20% de los especímenes analizados, cuyos tamaños máximos alcanzan ~20um. Aquellas FIA's de inclusiones mostrando coexistencia de inclusiones ricas en líquido como ricas en vapor solo son vistas en un 2% de las muestras.

De la petrografía de inclusiones fluidas además se puede reconocer diferentes arreglos o disposiciones para las inclusiones. Estos arreglos se distinguen asociados a zonas de crecimiento del cristal, asociados a fracturas selladas, cortando bordes de granos o zonas de crecimiento, en cristales prismáticos de cuarzo de textura comb, zonal y euhedral. Los diferentes arreglos permiten diferenciar acerca del origen primario o secundario de las inclusiones. Basado tanto en el tipo de inclusión encontrada dentro del cristal así como el origen de las mismas, son definidos cinco tipos de inclusiones, los cuales se explican a continuación:

Tipo A: Este tipo corresponde a inclusiones ricas en líquido con razones líquido-vapor generalmente de entre 70/30 por ciento, respectivamente. Este arreglo de inclusiones se disponen esencialmente a lo largo de fracturas sanadas dentro del cristal, o cortando los bordes de granos, y por lo cual se les confiere un origen secundario (Figura 20). Este tipo de FIA's es identificado en la mayoría de las muestras de estudio, en texturas de cuarzo mosaico, crustiforme y cuarzo comb. La población de estas se concentran en la zona mas superficial de la veta Don Leopoldo.

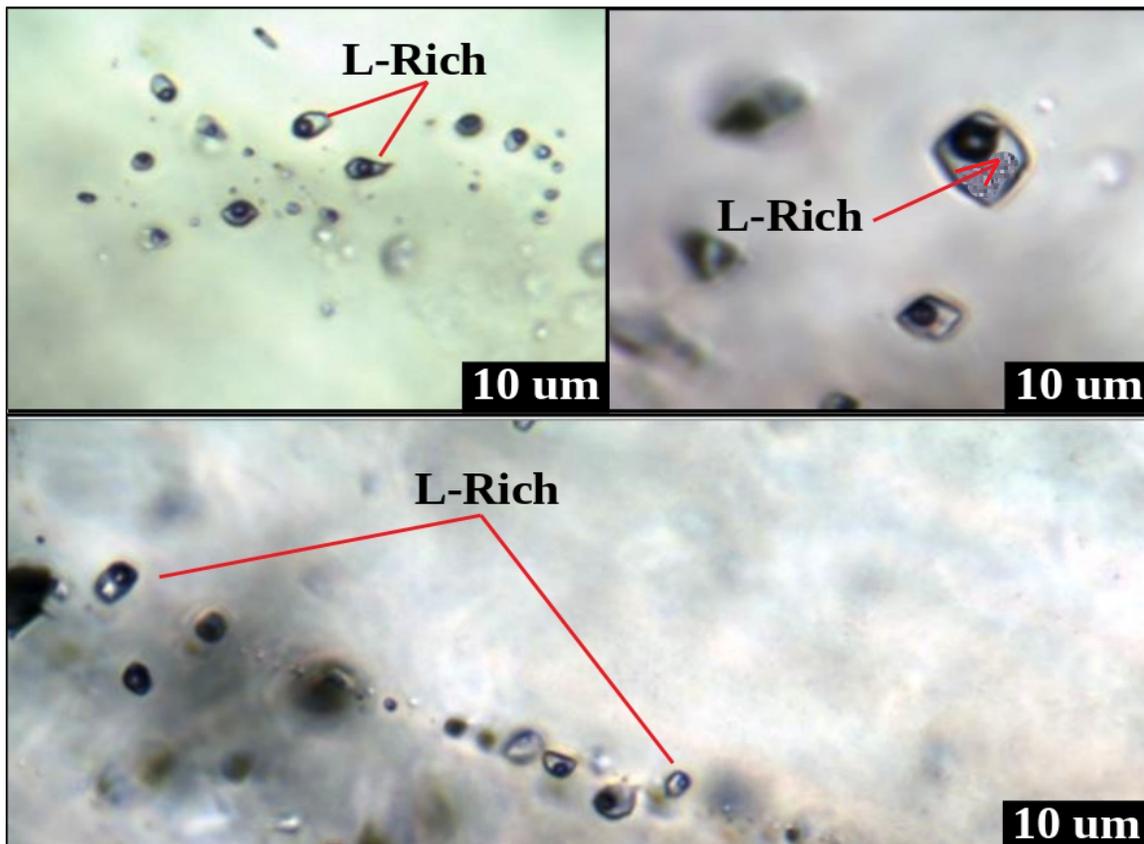


Figura 20: Inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor.

Tipo B: Se trata de arreglos de inclusiones fluidas las cuales son predominantemente ricas en líquido, y en las cuales se identifican sólidos presentes, correspondiendo a cristales de halita precipitados en su interior. Estas inclusiones son escasamente registradas alrededor del estudio, mostrando ser secundarias en origen, y siendo atrapadas en fracturas a lo largo del cristal (Figura 21). Este tipo de arreglo es observado en cristales de cuarzo jigsaw exclusivamente.

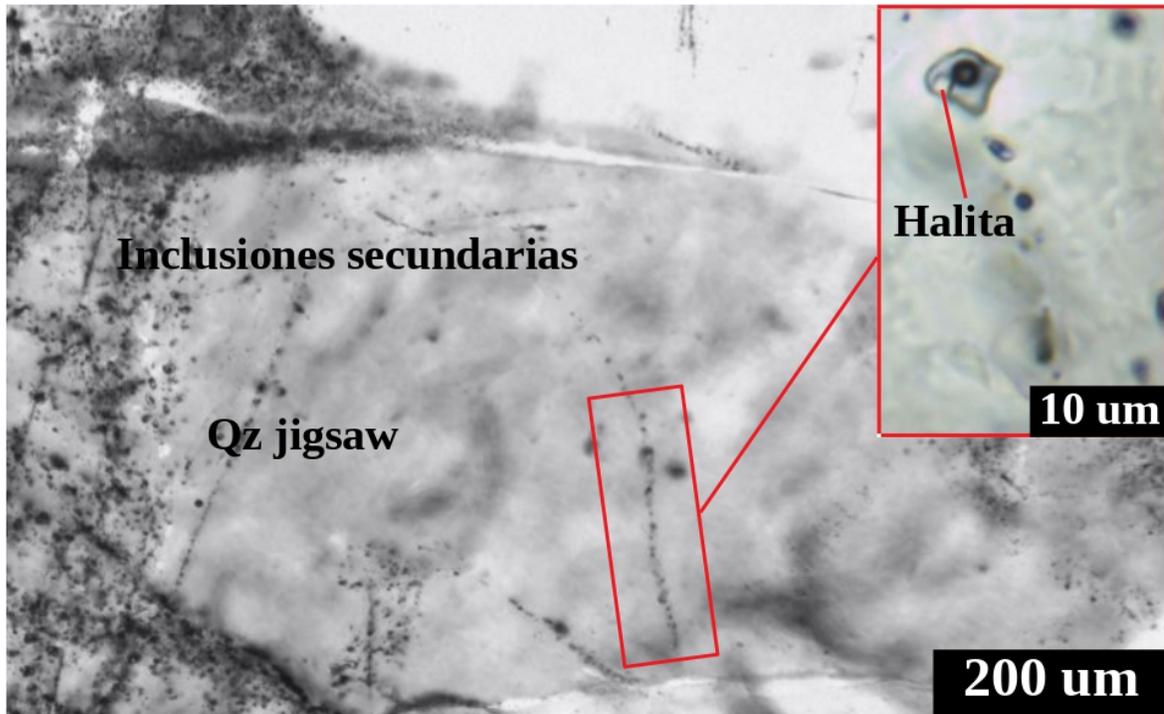


Figura 21: Inclusiones trifásicas mostrando halita, vapor y una fase predominante fluida.

Tipo C: Corresponden a disposiciones o arreglos de inclusiones las cuales presentan como fase predominante vapor, con relaciones líquido-vapor de 10/95%. Muestran morfologías bastante regulares desde redondeadas a alargadas y con tamaños de 3-12 μm . El origen de estas inclusiones es primario, siendo atrapadas en zonas de crecimiento de cuarzo euhedral, tipo comb y zonal. Alrededor del estudio, este tipo de inclusiones es poco frecuente, conformando aproximadamente un 2% de las muestras de cuarzo observadas (Figura 22).

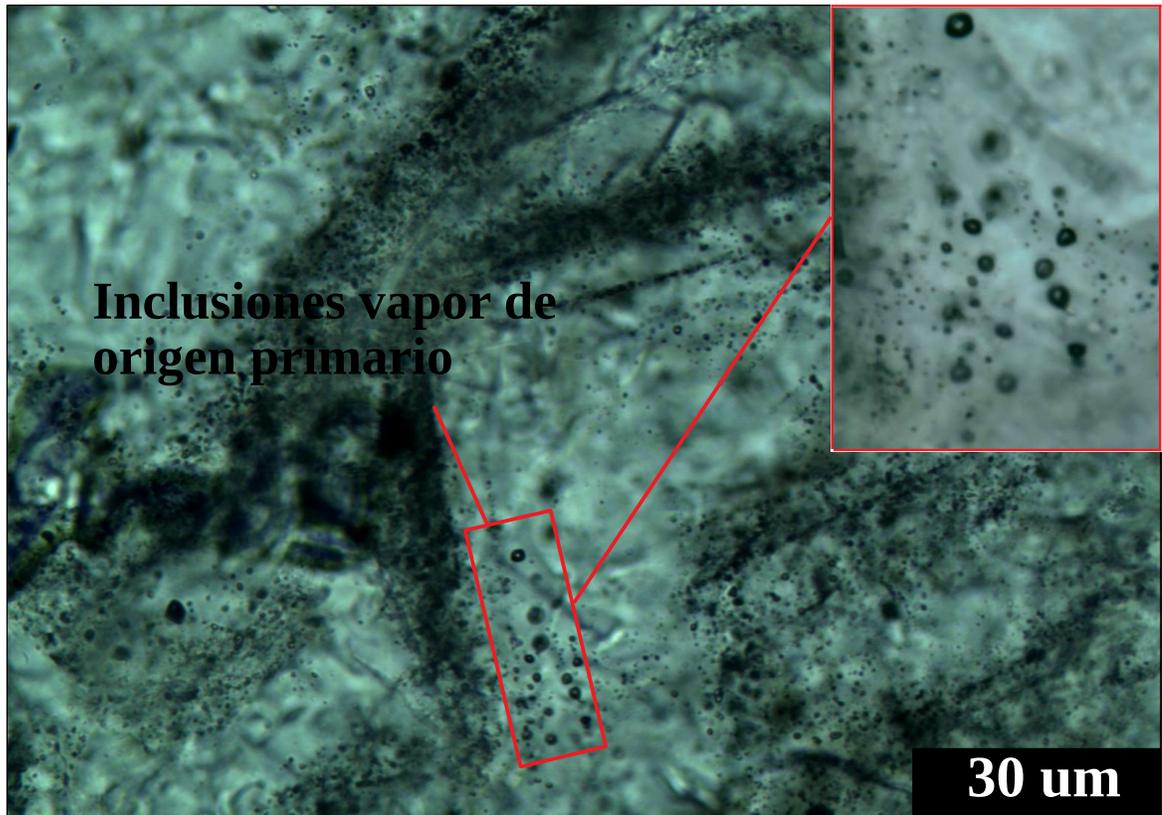


Figura 22: Inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor.

Tipo D: Corresponden a inclusiones vapor cuyo origen es secundario. Se muestran distribuidas mayoritariamente a lo largo de pequeñas fracturas dentro de los cristales, exhibiendo tamaños entre 2-15 μm , formas alargadas y con razones volumétricas líquido-vapor 5/95%. La ocurrencia de este tipo de inclusiones es alta dentro de los cristales, constituyendo un 28% de la población total en estudio. Se observa como estas inclusiones se encontraron alineadas radialmente con cristales de pirita, sugiriendo haber sido contemporáneas a la deposición de metales al interior del sistema (Figura 23).

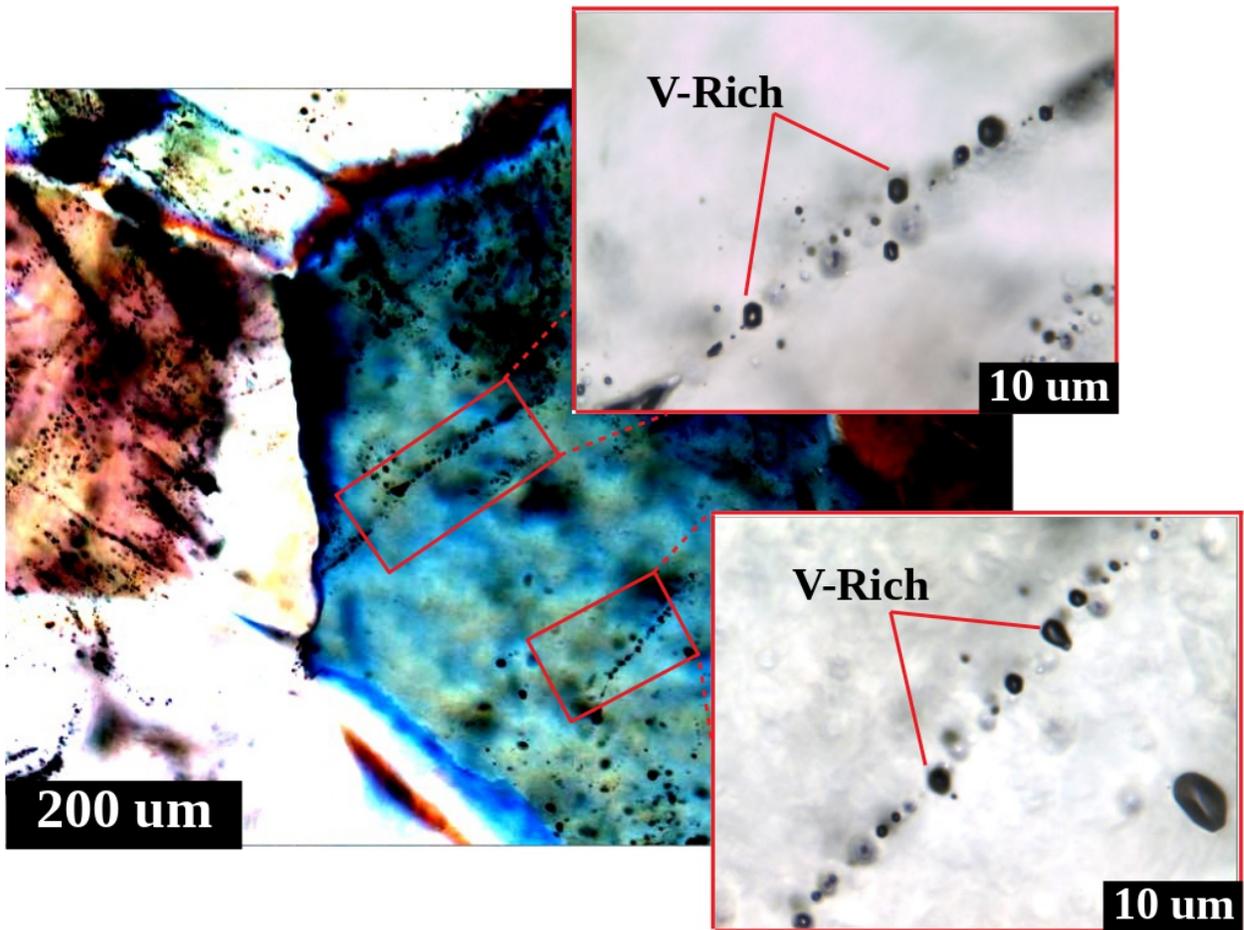


Figura 23: Microfotografía mostrando diferentes arreglos de familias de inclusiones fluidas dentro de un cristal de cuarzo. Se puede observar cómo se trata de familias de inclusiones ricas en vapor, las cuales se encuentran hospedadas en fracturas selladas dentro del cristal.

Tipo E: Se trata de familias de inclusiones ricas en líquido las cuales se encuentran coexistiendo en la misma asociación con inclusiones ricas en vapor, las cuales muestran consistencia en sus razones líquido-vapor. Este arreglo de inclusiones se presentan atrapadas a lo largo de fracturas selladas en cristales de cuarzo, por lo cual su origen es secundario. Las morfologías de estas inclusiones muestran ser alargadas a redondeadas, con tamaños que van desde unos pocos micrones hasta los 13 μm de tamaño (Figura 24).

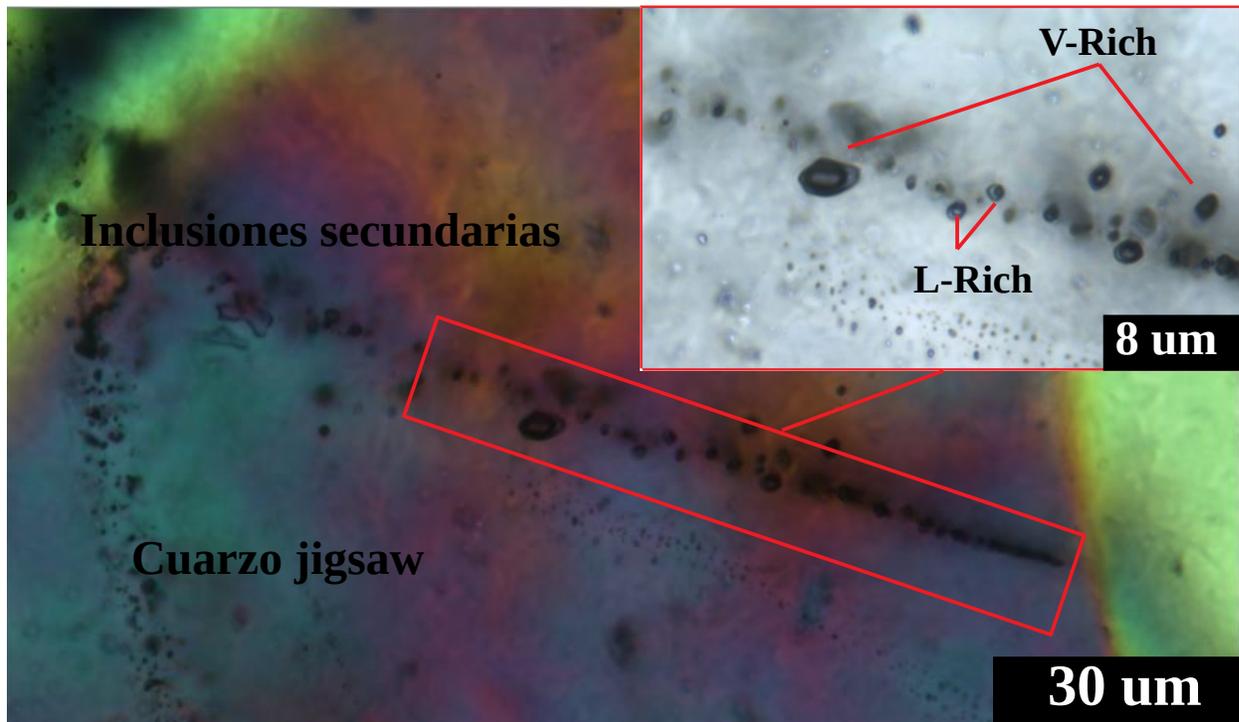


Figura 24: Inclusiones ricas en vapor coexistiendo con inclusiones ricas en líquido en cuarzo euhedral.

5.5. Distribución de metales en profundidad

De acuerdo a la información obtenida a partir de sondajes realizados en la veta Don Leopoldo, se grafica la distribución de diferentes metales en profundidad con el objetivo de ver como estos se comportan dentro del depósito. De la misma manera son ploteados los resultados petrográficos acerca del tipo de inclusión encontrada con respecto a su profundidad.

De acuerdo a la Figura 25, se observan como aquellas leyes de oro más elevadas se encuentran principalmente en dos peaks marcados entre las cotas de 950-960 msnm, y 900-910 msnm, correspondiendo a leyes de entre 2.6 a 4.4 ppm. También es posible apreciar cómo la mayor parte de estas concentraciones se encuentran predominantemente bajo los 0.5 ppm, distribuidas en todas las cotas. Generalmente se puede ver que estas máximas leyes de metal definen un horizonte dentro de la veta.

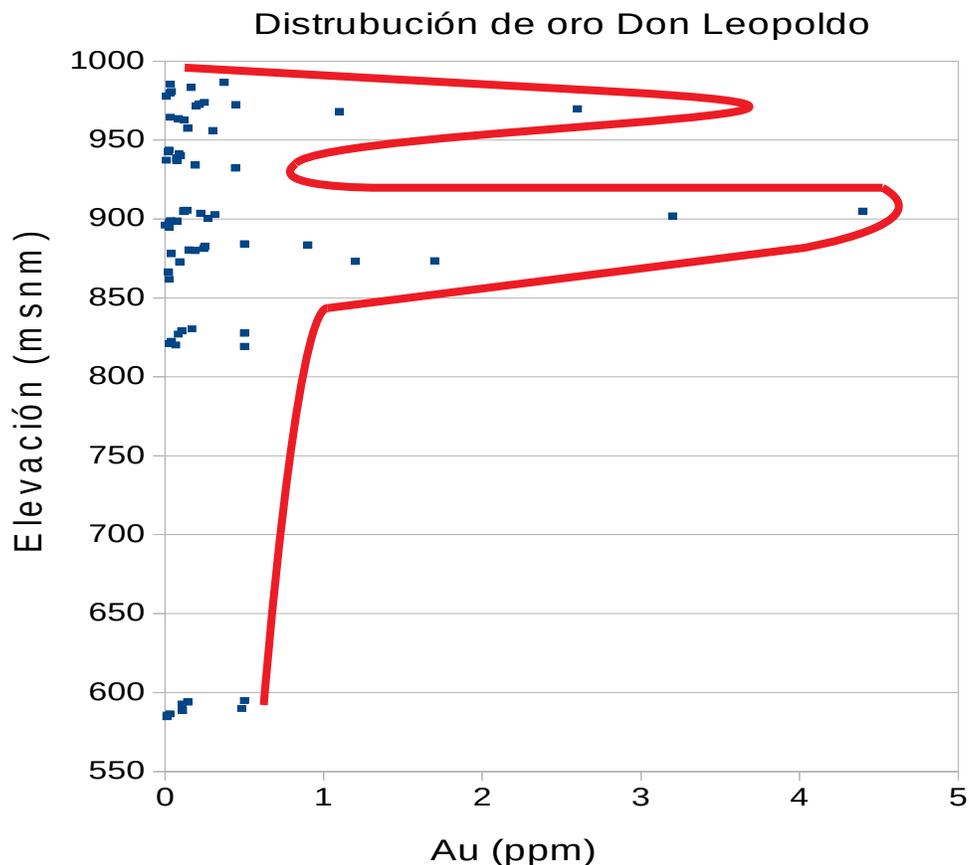


Figura 25: Plot de concentraciones de oro dentro de la veta Don Leopoldo.

Concentraciones de plata (Ag) son representadas en profundidad (Figura 26). Leyes máximas de plata correspondientes a 38 ppm y son encontradas aún más profundas que para el caso del oro. Estas mayores concentraciones se observan disminuir paulatinamente conforme se alcanzan niveles más superficiales. Se puede apreciar como los valores máximos de este metal definen un horizonte entre las cotas 850-900 metros sobre el nivel del mar.

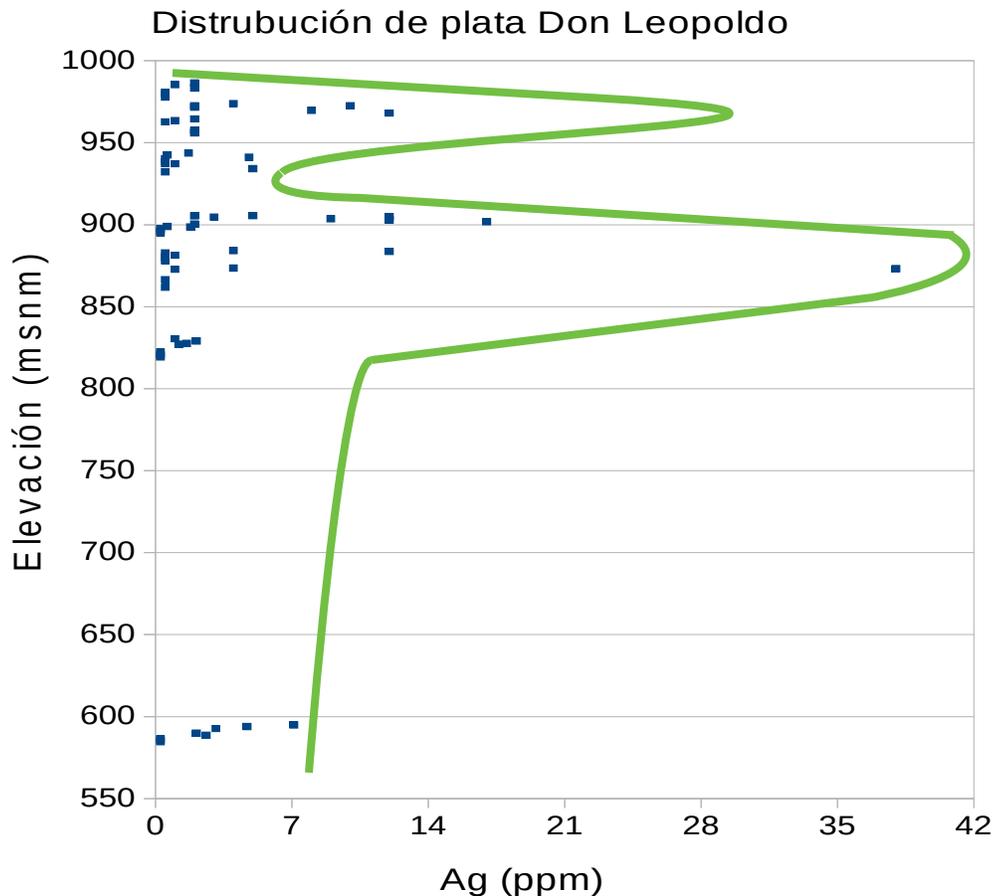


Figura 26: Distribuciones del contenido de plata de las muestras pertenecientes a la veta Don Leopoldo.

Dentro de la veta Don Leopoldo las concentraciones de metales base despliegan valores bastante altos, llegando al orden de porcentaje en peso en la gran mayoría. El elemento zinc es el metal base predominante en la veta, teniendo concentraciones hasta un orden de magnitud más alta que cobre y plomo.

En el gráfico de la figura 27, se muestra cómo se distribuyen las leyes de metales base en profundidad, donde para mayor simplicidad se han sumado aquellas concentraciones de plomo, cobre y zinc. Es posible ver cómo los valores más altos se disponen en niveles más superficiales, con profundidades entre los 900-940 metros

sobre el nivel del mar (msnm). Se observa un segundo peak entre las cotas 870-900 msnm.

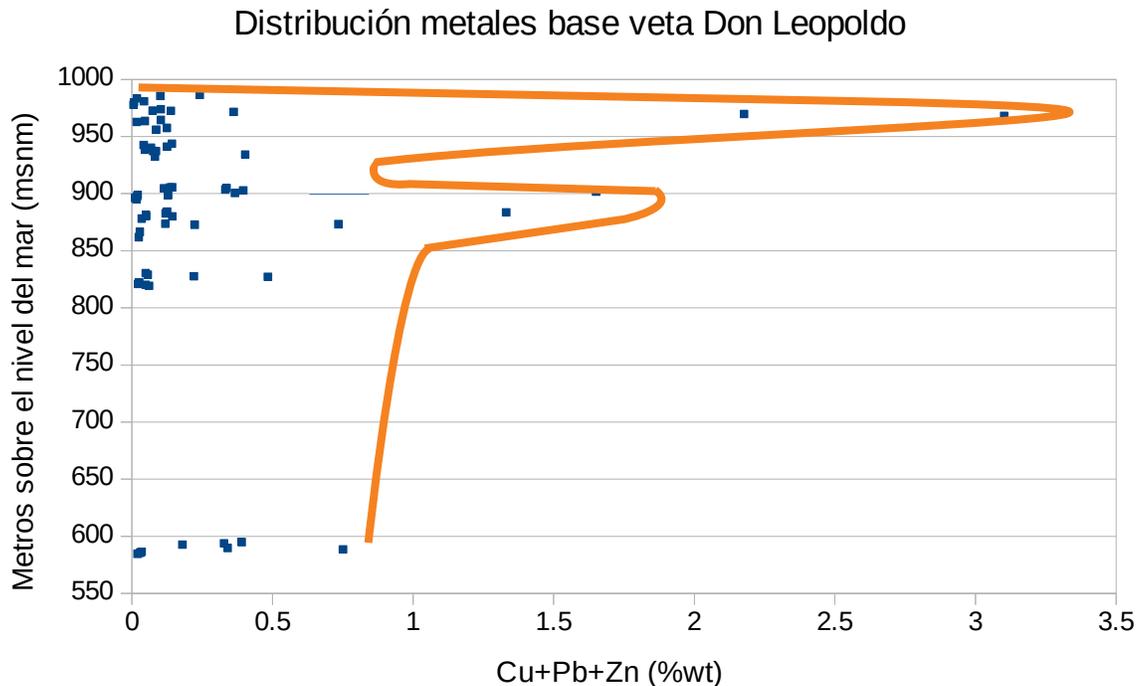


Figura 27: Plot de concentraciones de metales base en profundidad, donde para mayor simplicidad, los metales cobre, plomo y zinc han sido sumados.

Utilizando los datos de sondaje junto a los análisis petrográficos de inclusiones fluidas registrados a lo largo de este estudio, se construye un gráfico de distribución de los distintos tipos de inclusiones reportados dentro de veta en estudio. De las setenta muestras analizadas solamente en 61 se reconocieron inclusiones. Las restantes muestras mostraron o inclusiones muy pequeñas o ausencia de ellas.

La distribución de inclusiones fluidas al interior de la veta Don Leopoldo solamente considera cuatro tipos de inclusiones, las cuales corresponden a aquellas ricas en líquido, ricas en vapor, inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor, y inclusiones con cristales de halita en su interior. Para llevar a cabo el ploteo, no se hace diferencia en cuanto al origen primario o secundario que puedan tener las diferentes inclusiones representadas, ya sea si se trata de ricas en líquido o vapor, o con presencia de halita al interior de la inclusión.

Del gráfico de la figura 28, es posible observar cómo aquellas inclusiones con fase vapor predominante se encuentran claramente en la parte más profunda de la veta, dentro de un rango de cotas que varían entre los 600-820 msnm. Inclusiones ricas en vapor en niveles más superficiales son más escasas, mostrando como un segundo proceso pudo haber tomado lugar junto con ebullición.

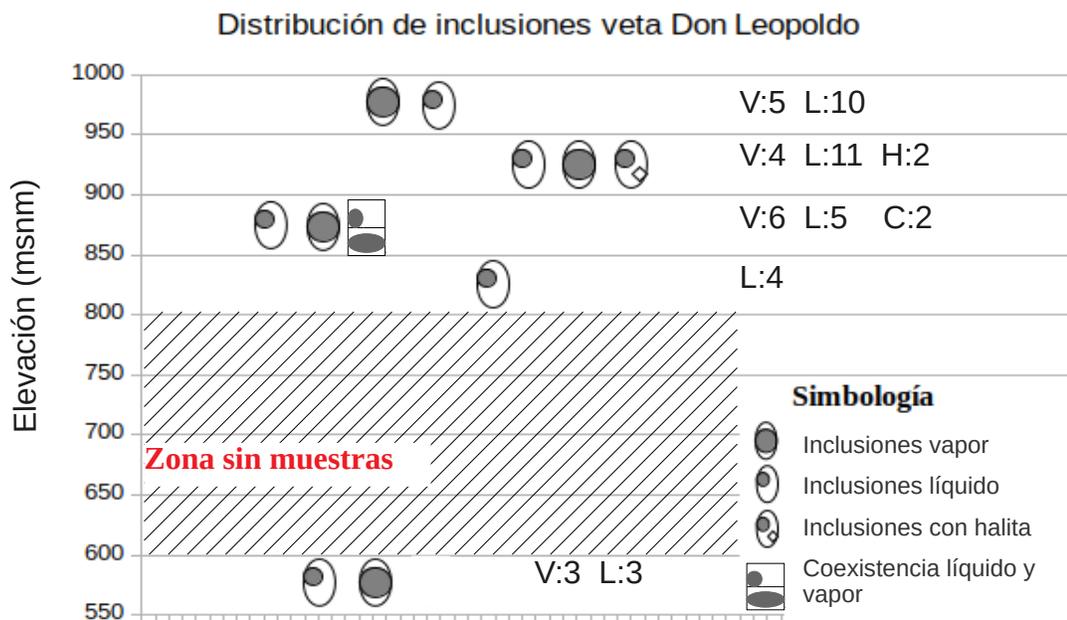


Figura 28: Distribución de los distintos tipos de inclusiones fluidas dentro de la veta Don Leopoldo.

Inclusiones con cristales de halita son observadas solamente en la parte más superficial y son realmente escasas, sugiriendo que los fluidos que mineralizaron el depósito fueron de baja salinidad. Estas se ubican aproximadamente entre los 900-950 msnm. Por otra parte coexistencia de inclusiones ricas en líquido y vapor, al igual que en el caso anterior, mostraron tener poca predominancia y ubicándose esencialmente a niveles poco profundos de 850-900 msnm.

Mayoritariamente dentro de la veta son identificadas inclusiones ricas en líquido, las cuales se hacen presente en toda la extensión de la veta, pero esencialmente se concentran en niveles superficiales, que corresponden aproximadamente 800-1000 msnm. Dada la gran distribución que muestran estas inclusiones se hace difícil asociarlas a la deposición de alguno de los metales presentes.

6. DISCUSIONES

6.1. Geoquímica

De los resultados de los análisis químicos llevados a cabo, se puede constatar como muchos elementos de interés económico, como lo son los metales preciosos oro (Au) y plata (Ag), así como metales base cobre (Cu) zinc (Zn) y plomo (Pb), se encuentran altamente enriquecidos a niveles superficiales en la corteza terrestre por sobre su valor de referencia para la corteza. Las concentraciones de metales preciosos se encuentran en ppm, mientras que para metales base se entregan en porcentaje en peso. Metales base son generalmente mas abundantes dentro de la corteza.

Las concentraciones máximas de tanto oro como plata encontradas al interior de la veta se presentan enriquecidas en aproximadamente tres órdenes de magnitud por sobre su valor promedio en la corteza continental. Estas leyes alcanzan valores de Au=4ppm y Ag=38ppm, mientras que aquellas leyes más bajas medidas por muestras, aún se sitúan por sobre valor de referencia en la corteza. Esto muestra cómo estos metales han sido concentrados por diferentes procesos que tomaron lugar en el depósito (Figura 29).

Para metales base las leyes máximas obtenidas muestran ser superiores a alrededor de dos órdenes de magnitud con respecto a su promedio cortical. Estos valores alcanzan leyes en porcentaje en peso de hasta Cobre=0.6%wt, Zinc=2.4%wt y Plomo=0,5%wt. Aquellas concentraciones mínimas presentan valores sólo ligeramente más altos que aquellos de referencia para la corteza (Figura 29).

Otros metales los cuales dejan ver concentraciones considerablemente altas en comparación a su promedio cortical correspondieron a bario, cadmio, arsénico y antimonio. La existencia de valores más altos en elementos arsénico y antimonio han mostrado tener relación con el transporte de metales preciosos en otros tipos de depósitos (Ej: depósitos del tipo Carlin). Una posible contribución de estos elementos al transporte de oro y su enriquecimiento en la veta Don Leopoldo no se descarta.

La existencia de altas leyes de metales preciosos y metales base al interior de la veta Don Leopoldo, deja ver como aquellos fluidos que circularon a través del sistema se encontraron enriquecidos en estos metales. A medida que el ascenso procedió, estas soluciones depositaron su carga de estos elementos, alcanzando concentraciones económicas al interior del depósito en estudio. Estas concentraciones aunque bajas en comparación a grandes yacimientos de oro, constituyen grados económicos para estos elementos.

Presencia de leyes económicas de metales preciosos así como además de metales base entregan información solamente acerca de que grados de mena han sido alcanzados al interior de la zona de estudio. Sin embargo, estos valores no

representan evidencia suficiente para poder indagar acerca del tipo de sistema en estudio o las características de los fluidos que circularon por el sistema al momento de la depositación. Análisis adicionales permiten resolver estas preguntas.

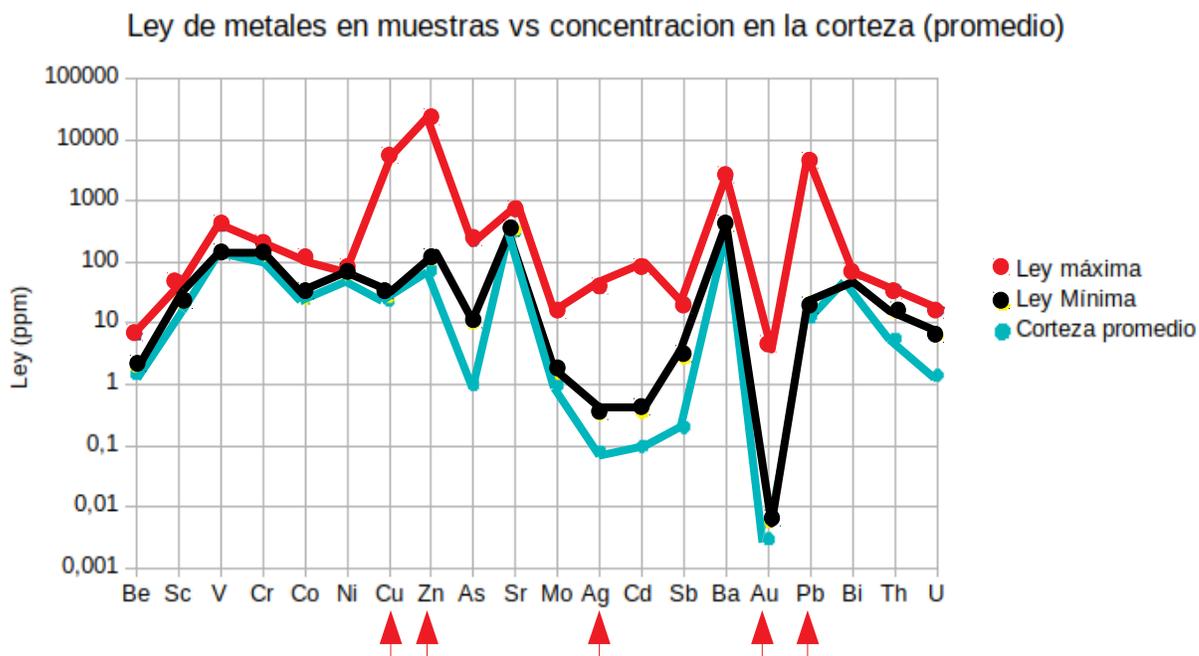


Figura 29: Valores máximo y mínimo de roca total de elementos menores para muestras pertenecientes a la veta Don Leopoldo, y su correspondiente valor promedio en la corteza continental. (Los valores para elementos menores y trazas en la corteza han sido tomados de White W.M., 2013).

La relación existente entre las leyes de oro y metales base al interior del sistema se puede evidenciar a partir de la Figura 30. Tanto para cobre, plomo y zinc se observa una tendencia en sus concentraciones a incrementar conforme aumenta el grado de oro al interior de la veta. Se observa como en los gráficos de cobre y plomo la concentración de puntos no se distribuye predominantemente hacia el centro del diagrama, mostrando una correlación más baja entre estos elementos y oro.

Es posible ver como el metal base con una mas elevada concentración corresponde a zinc. Este elemento muestra un incremento en su ley conforme la ley de oro aumenta. La concentración de puntos dentro del gráfico de zinc versus oro en la Figura 30, se observa ligeramente más concentrada hacia el centro del diagrama mostrando como existe una mejor correlación con este metal que para cobre y plomo.

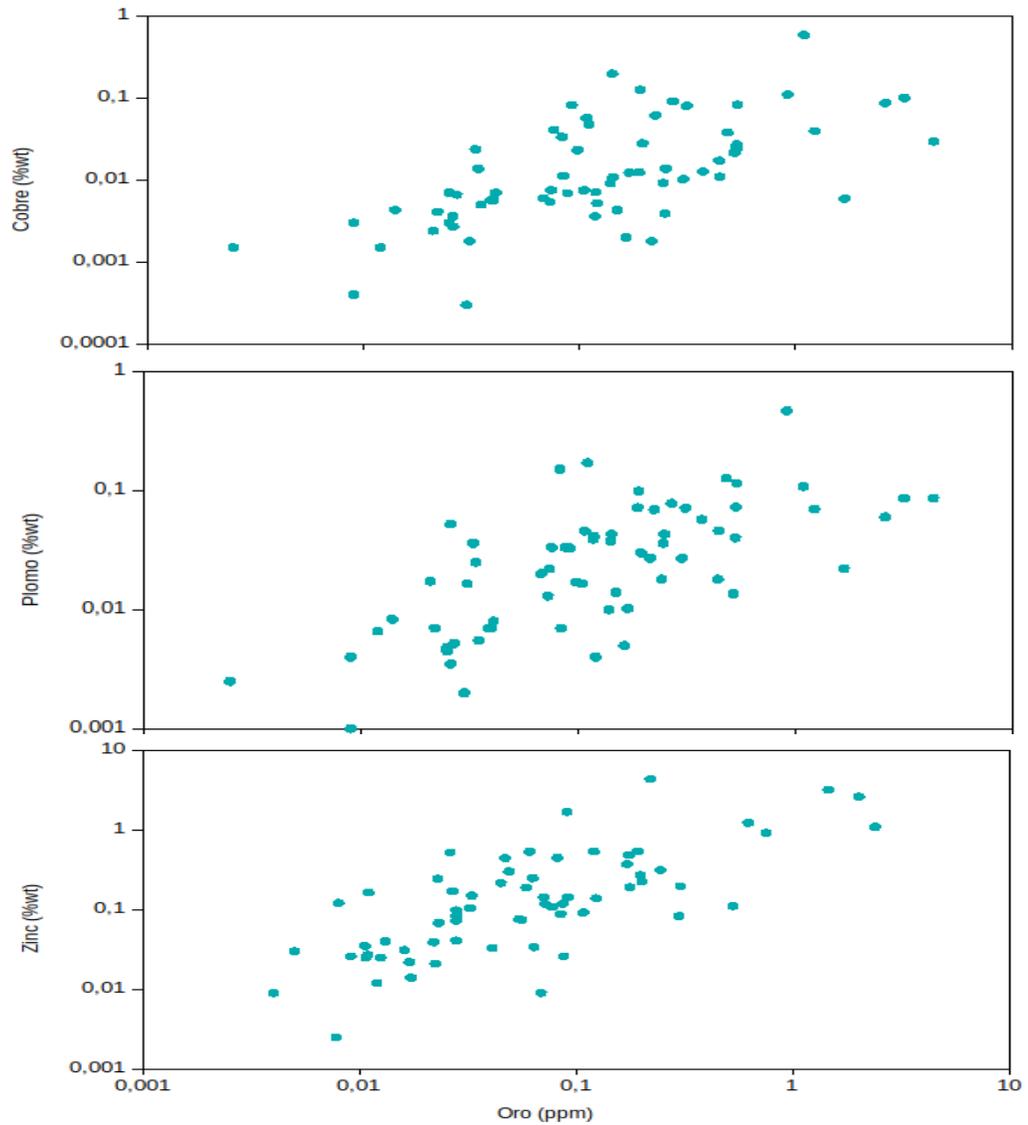


Figura 30: Gráfico mostrando la relación existente entre la concentración de oro versus zinc, plomo y cobre. La concentración de metales base ha sido planteada en porcentaje en peso %wt, mientras que la ley de oro ha sido representada en partes por millón (ppm).

6.2. Análisis textural

Muchos autores han mostrado como las diferentes texturas exhibidas por los minerales dan cuenta de las características y condiciones predominantes durante su deposición a partir del fluido circulante al interior del sistema (Simmons y Christenson, 1994; Dong et al., 1995). En la veta Don Leopoldo diferentes minerales de ganga son identificados. Solamente cuarzo y calcita son estudiados con más detalle dada su mejor aplicabilidad al estudio de inclusiones fluidas.

Cuarzo es el mineral más ampliamente encontrado a lo largo del estudio, el cual muestra una textura tipo mosaico o jigsaw en la mayoría de los casos, junto con cuarzo plumoso, coloforme los cuales se observan más escasamente. Estos diferentes tipos de cuarzo se piensan, ser formados por procesos de recristalización de una fase silíceo o calcedonia, la cual habría precipitado a partir de fluidos ebullo (Dong et al., 1995). De la misma forma Dong et al. (1995) señalan como la presencia de cuarzo coloforme es mejor indicador de la presencia de ebullición que la presencia de cuarzo mosaico, plumoso, entre otras texturas.

La distribución de los diferentes tipos de texturas de cuarzo y calcita dentro del sistema son presentados en la Figura 31. La presencia de una distribución aleatoria de cuarzo tipo jigsaw junto con su gran abundancia al interior del sistema en estudio muestra como esta textura no puede utilizarse como un indicador de cambios en los grados de mena en el depósito, dado que no es posible definir algún tipo de condición particular para aquellos fluidos circulantes dentro del sistema. No obstante, la existencia de texturas menos abundantes pueden ser correlacionadas a distintos grados de mena dada su aparición más acotada dentro del depósito como es hecho en distintos trabajos (Camprubí y Albinson, 2007; Moncada et al., 2012; Moncada y Bodnar, 2012).

La formación de calcita dentro del depósito tiene una relación directa con la presencia de dióxido de carbono dentro de la solución circulante (Simmons y Christenson, 1994). Las diferencias texturales exhibidas dejan ver dos tipos de cristales, calcita rómbica la cual es predominantemente vista por sobre calcita en hoja, formándose en condiciones de crecimiento lento a partir de soluciones hidrotermales sin presencia de ebullición (Simmons y Christenson, 1994). Este tipo de calcita se piensa como resultado de la interacción de aguas vapor calentadas ricas en CO_2 cercanas a la saturación en calcita, en las cuales producto de un incremento de temperatura conforme descienden se causa la precipitación de este mineral, o a consecuencia de un fluido hidrotermal eferveciendo lentamente (Simpson et al., 2001; Simmons et al., 1988).

La existencia de calcita en hoja es señalado ser un indicador de presencia de ebullición y rápida formación de sus cristales a partir de una solución hidrotermal rica en CO_2 (Simmons and Christenson, 1994). El reemplazo de hojas de calcita por cuarzo

mosaico muestra como después de su deposición a partir de un fluido ebullo, un segundo evento se hizo presente en el sistema. Este evento habría provocado disolución y reemplazo de los cristales de las hojas de calcita, quedando atrás sus moldes para posteriormente ser rellenos por cuarzo microcristalino.

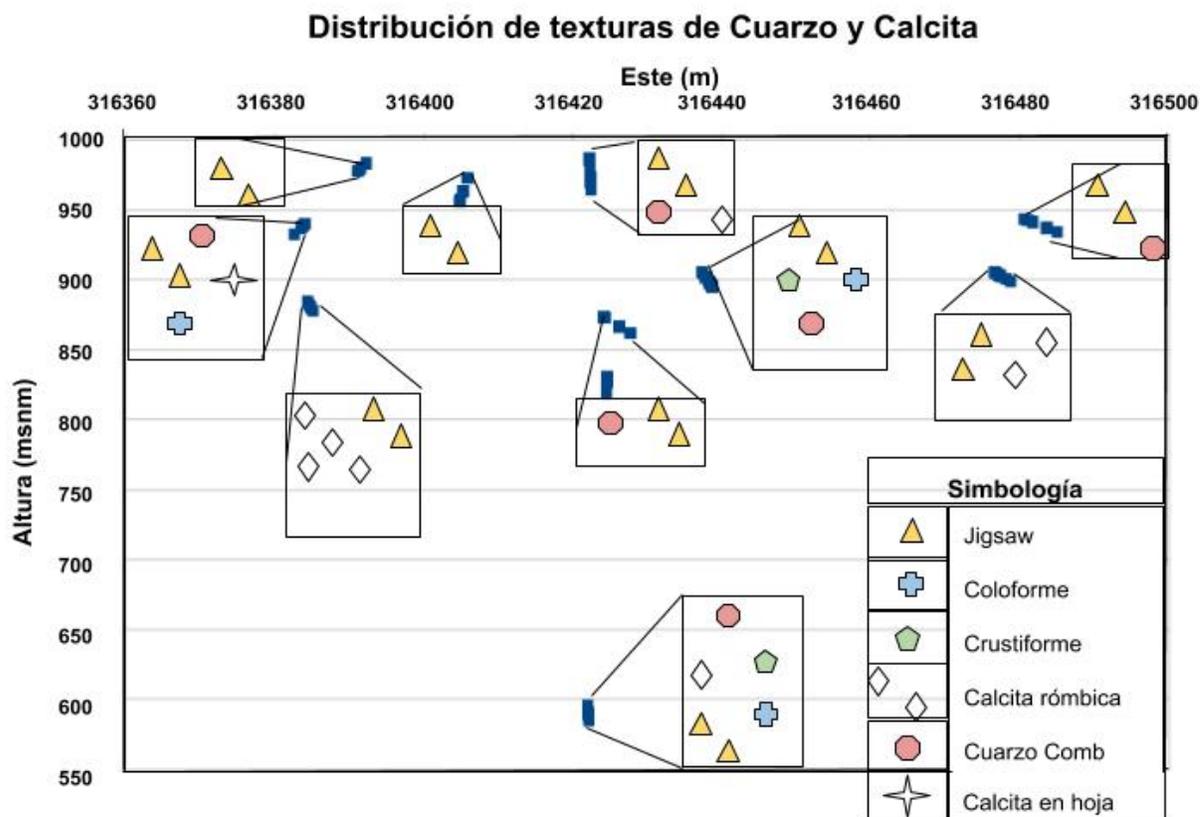


Figura 31: Distribución de los diferentes tipos de texturas encontrados dentro de la veta Don Leopoldo, tanto para cuarzo como calcita, los principales minerales de ganga.

Las diferentes texturas encontradas tienen una directa relación además con el tipo de inclusiones encontradas en cuanto a su origen, y por tanto, en su utilidad en análisis microtermométricos, entre otros. A lo largo del estudio cuarzo mosaico es el tipo de cristal más ampliamente identificado, sin embargo, estudios de inclusiones en cuarzo mosaico pueden llevar a errores dada la falta de información temporal de las FIA's presentes en su interior. Por lo cual relaciones paragenéticas con la mineralización son necesarias.

Del mismo modo cuarzo tipo plumoso, coloforme o cristales cristalinos del mismo lo cuales ofrecen siempre sus caras externas redondeadas, sugiere que podrían haber sido sometidos a algún proceso de alteración posterior o recristalización.

La información de inclusiones en estos cristales para análisis adicionales, debe ser tratada con cuidado. Estos procesos podrían haber alterado el contenido de la inclusión e incluso su temporalidad.

Texturas de cuarzo comb, zonal o cristales euhedrales en vetillas han sido las texturas donde familias de inclusiones se pueden identificar mejor. En ellas se registra tanto el origen primario o secundario. Estas inclusiones podrían ser sometidas a análisis microtermométricos con el fin de conocer las condiciones en las cuales la precipitación de metales se produjo.

Trabajos previos desarrollados en depósitos del tipo epitermal muestran cómo las diferentes texturas de los minerales de ganga, así como el tipo de inclusión pueden estar relacionadas con el grado de metales preciosos presentes en las mismas. Estos trabajos indagan además sobre posibles aplicaciones de las texturas a exploración. Adicionalmente se evidencia que la mena de metales preciosos muestra una estrecha relación al tipo de inclusión (Moncada y Bordar, 2012; Moncada et al., 2012; Camprubí y Albinson, 2007).

En su trabajo, Moncada et al. (2012) señalan como aquellas muestras que presentan la característica de ebullición se relacionan con aquellas leyes de oro más altas. Así mismo también documentan como el grado de oro es más bajo para aquellos especímenes en las cuales la característica no esta presente. Adicionalmente encuentran como las leyes promedio de plata son más bajas en aquellas texturas de no ebullición con excepción de calcita rómbica, resultando consistente con la premisa de ebullición o 'boiling' como mecanismo deposicional.

A partir de las observaciones realizadas se identifica como aquellas texturas de no ebullición, como lo son cuarzo comb y calcita rómbica, son aquellas que muestran una mejor correlación con leyes económicas de metales preciosos oro y plata . Sin embargo las mismas difieren inversamente cuando se considera la presencia del tipo de inclusiones hospedadas por el cristal. Aquellas texturas de cuarzo comb en las cuales la presencia de la característica es observada presentan leyes promedio de Au=0.53 ppm, Ag=5.1 ppm, presentando de esta forma grados económicos de estos metales. Por otra parte, calcita rómbica con ausencia de la característica exhiben aquellas leyes promedio de oro y plata mas altas, correspondiendo a Au=0.69 ppm y Ag=8.6 ppm respectivamente. La presencia de altos grados de mena en cuarzo comb y calcita rómbica, las cuales precipitan desde soluciones que no se encuentran ebuliendo, puede ser explicado a partir de la existencia de un proceso de mezcla, el cual tomó lugar en niveles superficiales y puede haber promovido la deposición de estos metales (Figura 32).

Textura de cuarzo jigsaw la cual es la más comúnmente identificada al interior del sistema se presenta distribuida uniformemente en toda la veta. De acuerdo a esto, este tipo de textura parece no ser un rasgo distintivo o característico que ayude a definir una posible asociación con más altos grados de mineralización de oro y plata.

Sin embargo se identifica como tanto cuarzo de tipo jigsaw con presencia de la característica de ebullición o ausencia de esta, muestran leyes promedios económicas tanto de oro >0.5 ppm y plata >5ppm (Figura 32). Esto es consistente con Moncada et al. (2012) quienes señalan que si bien esta textura es indicadora de ebullición, su relación con la mineralización va a depender del contenido de metales de la solución hidrotermal.

El promedio de metales preciosos en cuarzo crustiforme son representados en la Figura 32. Bandeamiento crustiforme corresponde a una textura que no es completamente característica de ebullición según lo señalado por Dong et al. (1995). Es posible observar como la ocurrencia de textura crustiforme presenta bajas leyes de metales tanto cuando la presencia de la característica está presente como cuando no, alcanzando leyes promedio de oro y plata de 0.05 y 0.03 respectivamente.

En muestras exhibiendo textura de cuarzo coliforme se registran grados de mena para metales preciosos. Estas leyes promedio corresponden aproximadamente a 0.88 y 6.4 para oro y plata respectivamente. Diversos trabajos coinciden con este resultado, donde se llega a concluir como es este tipo particular de textura la cual está más íntimamente asociado a aquellos grados económicos, en soluciones llevando contenido de metal (Camprubí y Albinson, 2007; Moncada y Bodnar, 2012).

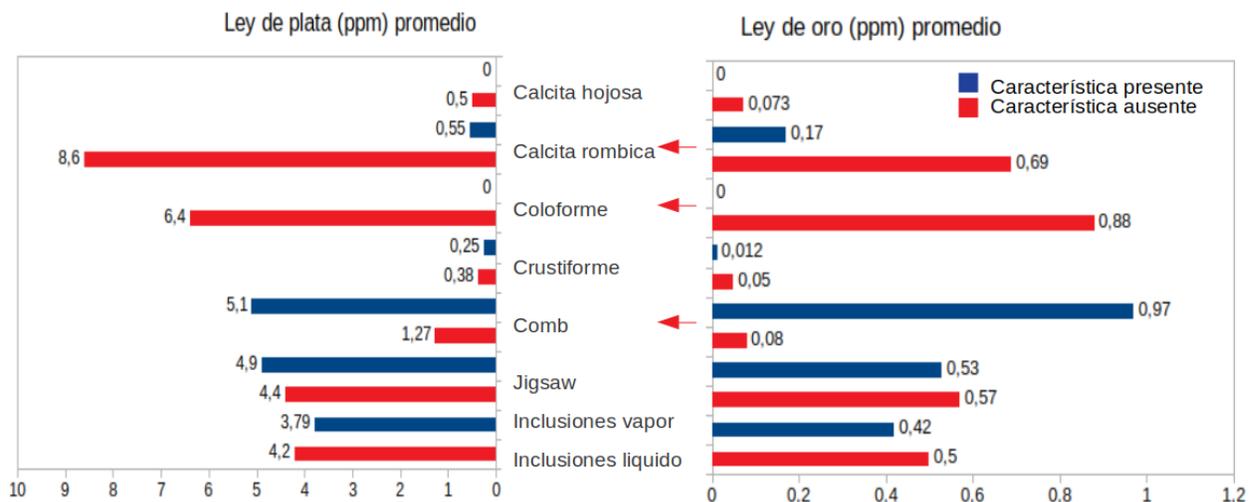


Figura 32: Gráfico representando los diferentes tipos de texturas, presencia de fias de inclusiones ricas en líquido y FIA's de inclusiones ricas en vapor (referido como 'característica' en esta discusión) y su relación con los grados de mena observados.

Como es señalado por Simmons and Christenson (1994), calcita en hoja es formada a consecuencia de fluidos ricos en CO₂ los cuales se encuentran ebulliciendo al momento de la precipitación de calcita. Como señala Simmons et al. (2000), calcita en hoja estéril es también encontrada en zonas periféricas del sistema, formada como consecuencia de aguas marginales que se encuentran colapsando hacia el interior, en porciones donde no hay contenidos de metales dentro del fluido. La presencia de bajas leyes de calcita en hoja, por consiguiente, podría ser debido a consecuencia de haberse formado en zonas periféricas dentro de la veta.

Debido a la escasa aparición que muestran cuarzo plumoso, así como cuarzo zonal y cockade, estas texturas no son representadas en la construcción del gráfico de la Figura 32. Lo anterior es debido a la poca representatividad de llevar a cabo conclusiones a partir de sus tan escasos datos. Si bien estas texturas no son abundantes no se descarta algún tipo de relación con los metales.

De manera más general, en la Figura 32, se observa una comparación entre los grados de mena para texturas con presencia y ausencia de la característica de ebullición. Se observa como la presencia de inclusiones ricas en vapor se asocia con grados de mena más bajos que para aquellos que muestran FIA's ricas en líquido. La falta de una correlación entre inclusiones y metales podría ser producto de distintos pasos de fluidos o una superposición de eventos, los cuales quedaron atrapados en nuevas fracturas en antiguos cristales, así como también a la existencia de un proceso de mezcla, el cual junto con ebullición estarían controlando las leyes dentro del sistema y explicaría la variabilidad entre la presencia de la característica, el tipo textural y los grados de mena.

La existencia de leyes máximas de oro y plata, las cuales no exceden los 4 y 38 ppm en muestras dentro del sistema, podría ser debido al hecho que los grados de mena más elevados al interior de la veta se hacen presentes a niveles más profundos. Este horizonte a mayor profundidad es sugerido por la evidencia FIA's de inclusiones ricas en vapor en niveles profundos de la veta, en cotas de 585 msnm. Aquellos grados económicos más elevados se hallarían mas cercanos al horizonte de ebullición por lo cual, conforme el ascenso de los fluidos se produce, las leyes de mena depositadas disminuirían, homogeneizándose o reduciéndose sus valores.

Leyes de metales preciosos en texturas de cuarzo colofome cuarzo comb, y calcita rómbica se encuentran aproximadamente en un rango promedio similar. El diferente origen en el cual se forman estos tipos texturales correspondientes a condiciones de ebullición y no ebullición es otra evidencia de la falta de correlación entre inclusiones y metales dentro de la veta Don Leopoldo. Esto podría sugerir de igual forma que aquellos niveles de mena más altos pueden encontrarse a mayor en profundidad, donde las leyes de metales disminuirían hacia superficie provocando valores más similares entre las distintas muestras.

6.3. Petrografía

Usando las observaciones petrográficas se pueden identificar diferentes asociaciones minerales las cuales sirvieron como guía en la definición de diferentes etapas de mineralización dentro de la veta Don Leopoldo. La petrografía detallada realizada sobre las setenta muestras, reconoce minerales de ganga como lo son cuarzo, calcita, clorita, epidota, así como minerales económicos de esfalerita, galena y calcopirita. Combinando los datos petrográficos con los datos geoquímicos y de profundidad provenientes de los testigos de sondajes, es posible establecer una zonación dentro del depósito. Se observa como generalmente esfalerita, galena y calcopirita son formados en paragénesis, mientras que en otras ocasiones calcopirita es observada solamente acompañada por pirita.

En base a la mineralogía de mena encontrada dentro del sistema es posible reconocer al menos tres etapas en las cuales fue mineralizada la veta Don Leopoldo. Estas etapas se definieron en base a la relación temporal de la mineralogía con respecto a la depositación de los metales. En la tabla 2, se presenta de manera ilustrativa las tres principales etapas y sub-etapas, mostrando la ocurrencia de cada mineral en las mismas.

El primer evento se define como una etapa de pre-mineralización, en la cual tiene predominancia la deposición de minerales de ganga como cuarzo principalmente, acompañado de cristales de calcita, epidota y clorita (Figura 33A,B). La definición de este evento se corresponde con las relaciones paragenéticas reconocidas donde la mineralización se encuentra generalmente en la parte central de vetillas, o hacia los bordes como relleno de fracturas. Además se observa por la presencia de vetillas estériles cortadas por vetillas mineralizadas.

El evento más importante reconocido fue la segunda etapa o etapa principal de mineralización, la cual es definida por la deposición de los metales oro y plata, junto con minerales de mena como esfalerita, galena, calcopirita (encontrada en menor proporción) y acompañada siempre de pirita la cual se encontró diseminada o en cúmulos. Una etapa post-mineralización es definida en base a diferentes características mineralógicas, las cuales presentan generalmente óxidos de especularita, limonita, junto con cuarzo y arcillas (Figura 33C,D). Esta alteración se presenta de manera mas escasa, encontrándose alterando toda la roca en su conjunto o como en el caso de especularita en patinas sobre la mineralización. Lo anterior sugiere como un evento posterior y nuevas condiciones predominaron en el sistema.

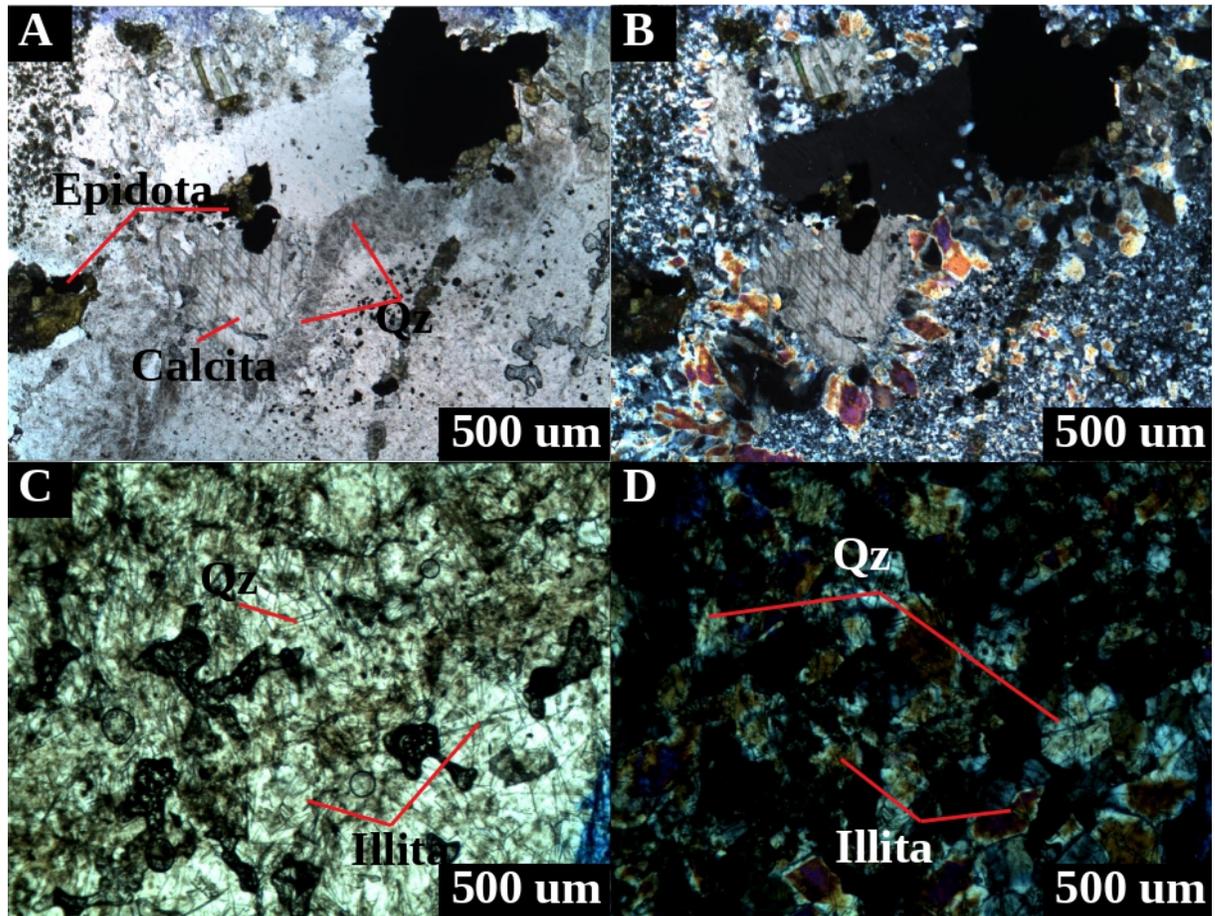


Figura 33: A. Asociación de alteración propilítica de la etapa de pre-mineralización de la veta Don Leopoldo. B. Vista a nicols cruzados. C. Asociación de alteración argílica con desarrollo de illita dentro de cristales de cuarzo. D. Vista alteración argílica a nicols cruzados.

Mineralogía	Etapa pre-mineralización	Etapa mineralización	Etapa post-mineralización
	I	II	III
Cuarzo jigsaw	————	————	————
Coloforme		— — — —	
Crustiforme	————		
Comb	————		
Calcita rómbica	————		
Calcita en hoja		— — — —	
Epidota	————	————	— — — —
Clorita	————	————	— — — —
Pirita	————	————	— — — —
Especularita			— — — —
Limonita			— — — —
Illita			— — — —
Calcopirita		————	— — — —
Galena		————	— — — —
Esfalerita		————	— — — —
Oro		————	————
Plata		————	————
Inclusiones vapor	— — — —	————	
Inclusiones líquido			————

————— Mayor abundancia ————— Etapa IIa ————— Etapa IIIa
 - - - - - Menor abundancia ————— Etapa IIb ————— Etapa IIIb

Tabla 2: Mineralogía, texturas y principales tipos de inclusiones presentes en las tres etapas definidas para la veta Don Leopoldo.

6.4. Petrografía de inclusiones fluidas

De acuerdo a los datos petrográficos de inclusiones fluidas encontrados y la distribución de las mismas a lo largo de la veta, se pueden reconocer al menos tres eventos dentro del sistema hidrotermal. Estos eventos pueden ser reconocidos en base al origen de las inclusiones como primario o secundario, así como su relación líquido-vapor de acuerdo a lo propuesto por Goldstein y Reynolds, (1994). Además la existencia de distintos tipos de inclusiones dentro de un mismo cristal también entregan información acerca que mas de un proceso se hizo presente.

Un porcentaje bajo de familias de inclusiones se hospedan a lo largo de zonas de crecimiento dentro de cristales de cuarzo crustiforme. Esto indica como un primer evento estaría asociado a la deposición de estos cristales partir soluciones hidrotermales ebuliendo conforme se aproximan a la superficie (Figura 34A,B). La presencia de familias de inclusiones ricas en vapor atrapadas en una zona de crecimiento dentro de cristales de cuarzo a niveles provenientes desde los 585 msnm, así como secundarias, sugiere que la soluciones moviéndose hacia niveles superficiales, a este punto ya se encontraban ebuliendo, por lo cual el nivel base desde el cual estas comenzaron a hervir se encontraría todavía a niveles más profundos.

La existencia de este horizonte de ebullición más profundo dentro de la veta queda en evidencia desde la información petrográfica. Este nivel de ebullición tiene como implicancia que dado que nuestro fluido llevaba un contenido de metales de oro y plata (en base a la información aportada por los resultados geoquímicos), entonces aquellas mayores leyes de estos metales debieran estar presentes posiblemente a niveles aún más profundos. Esto grados más altos estarían marcados desde el punto donde la solución comenzó a hervir.

Sin embargo, la mayoría de las FIA's de inclusiones fluidas observadas en las muestras dentro de la veta ocurren a lo largo de microfracturas selladas, que se orientan radial o aleatoriamente dentro de los cristales de cuarzo y en otros casos atraviesan completamente los bordes de estos últimos. Consecuentemente estas inclusiones son interpretadas como secundarias en origen relativas al tiempo de precipitación del cuarzo (Bodnar, 2003; Goldstein y Reynolds, 1994). La existencia de este gran número de arreglos de inclusiones atrapadas posteriormente a la precipitación de cristales de cuarzo, da cuenta de como un segundo evento definido por fracturamiento de los principales minerales de ganga, marca una etapa de posterior dentro del sistema. Este cuarzo posteriormente habría sido fracturado permitiendo el paso de fluidos, los cuales circularon a través de los cristales. Renovado fracturamiento dentro de depósitos hidrotermales permite múltiples eventos de mineralización y atrapamiento de fluidos, de acuerdo al modelo propuesto por Buchanan (1979).

Este segundo evento marcado por el atrapamiento de distintos arreglos de inclusiones ricas en vapor se identifica dentro de la veta marcadamente. Al interior del sistema se presenta una zonación en el tipo de inclusión. Se observa como en profundidad se tiene un horizonte mejor definido marcado por la presencia de abundantes familias de inclusiones ricas en vapor, a aproximadamente 580 msnm, lo cual sugiere que un fluido en ascenso se encontraba ebulviendo.

Si bien las inclusiones secundarias identificadas fueron formadas debido a un evento posterior a la ocurrencia de los principales minerales de ganga como lo es el cuarzo, hay evidencia que ellas fueron atrapadas contemporáneamente con la precipitación de los metales, como pueden ser oro y plata, o metales base, de acuerdo a las relaciones con la mena existente. Generalmente las distintas familias de inclusiones fluidas secundarias muestran no evidente relación con la mena presente en el sistema, dada su distribución aleatoria al interior de los cristales. No obstante, se observa como cristales de pirita se alinean radialmente con respecto a familias de inclusiones ricas en vapor coexistiendo con ricas en líquido, lo cual señala como estas inclusiones fueron contemporáneas a la precipitación de metales dentro del depósito (Figura 34C,D).

La existencia de una zonación en el tipo de inclusión dada por la presencia de inclusiones ricas en líquido al interior del sistema, las cuales se concentran entre los 800-1000 msnm, es interpretada como producto de un tercer evento. En este evento, una nueva solución pudo haber ascendido al interior de la veta, sin mostrar indicios de ebullición, hasta alcanzar niveles aún más superficiales, sin embargo dada la existencia de una correlación entre texturas de no ebullición y leyes económicas, la mezcla de un fluido en ascenso con aguas meteóricas superficiales, podría explicar mejor este tercer evento, lo cual provocaría la deposición de mena. La presencia de este tercer evento es además ratificado como el resultado del hallazgo de familias de inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor, las cuales son independientes las unas de las otras, y sin embargo son encontradas dentro de un mismo cristal de cuarzo (Figura 34E). Este evento habría provocado nuevamente el relleno de vetas y vetillas, las cuales fueron posteriormente sanadas conforme a la depositación avanzó.

La presencia inclusiones fluidas con cristales de illita en su interior también es reconocida en la veta Don Leopoldo (Figura 34F). La existencia de illita al interior de inclusiones es evidencia de que en algún momento las soluciones circulantes presentaron condiciones levemente acídicas. El hallazgo de este tipo de inclusión se hizo presente en los niveles más profundos 585 msnm, sugiriendo que producto del ascenso de los fluidos a superficie, estos comenzaron a neutralizarse mientras interactuaban con la roca huésped. Dada la falta de relación paragénetica de estas inclusiones con la mineralogía de mena y ganga, no es posible reconocerla dentro de los eventos mencionados.

Un esquema resumen de los principales eventos con base en los diferentes arreglos de inclusiones fluidas y a su relación con la mineralización es presentado en la Figura 35.

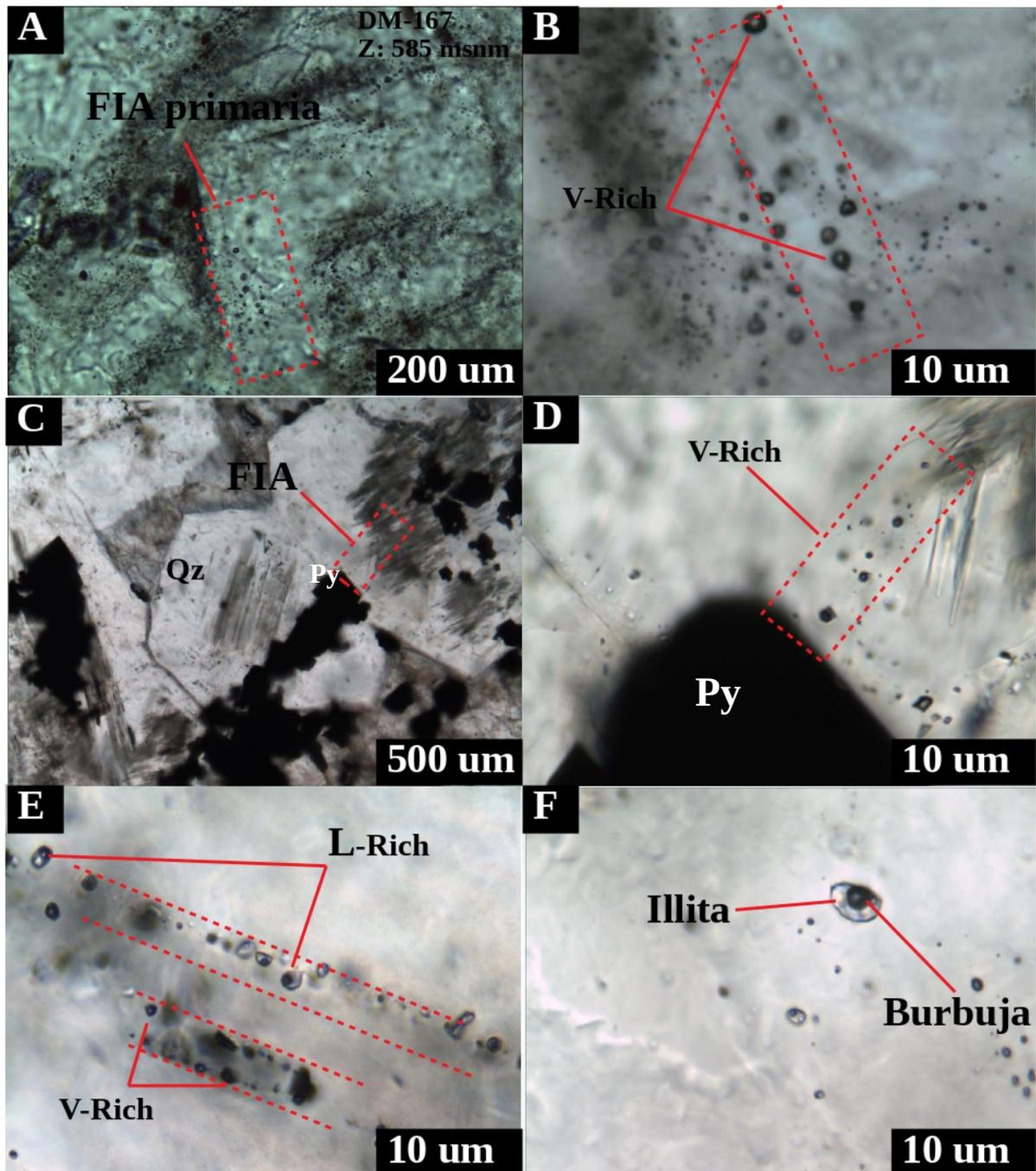
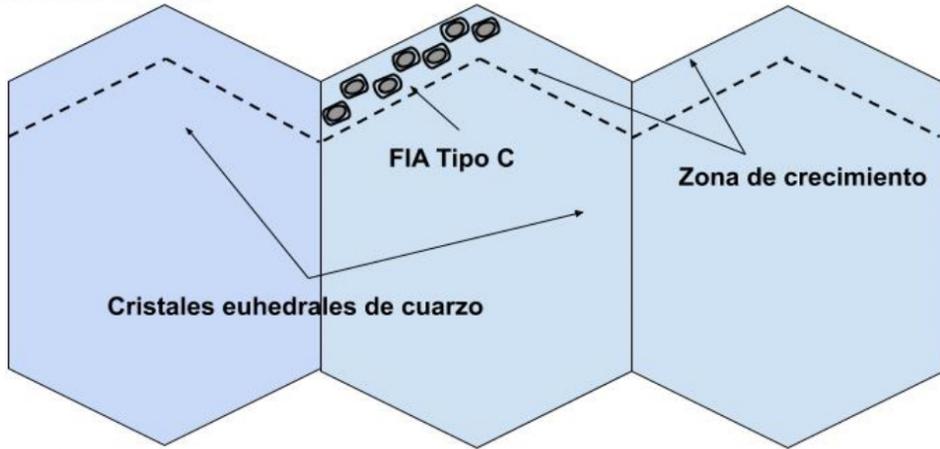
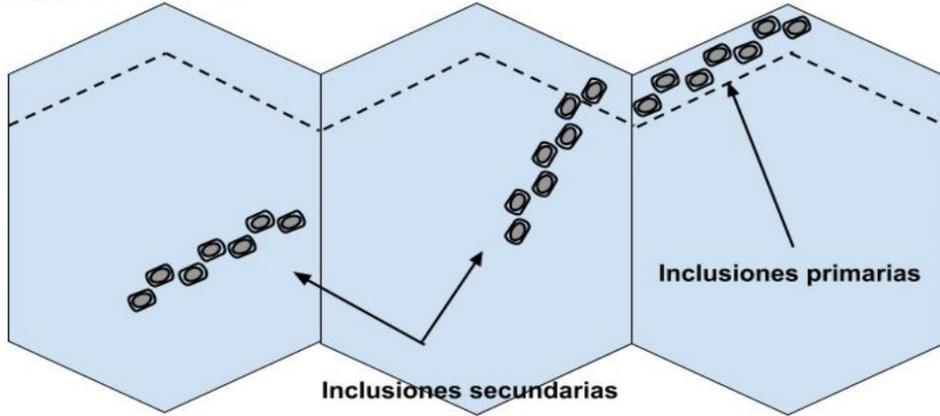


Figura 34: Microfotografía mostrando diferentes arreglos de inclusiones. A. FIA vapor primaria en cuarzo comb. B. Amplificación de microfotografía A, con aumento x80. C. Se muestra cristales de pirita alineados con inclusiones ricas en vapor. D. Vista de microfotografía C, con aumento x80. E. Muestra DM-34, mostrando la presencia de dos eventos de fracturamiento y atrapamiento de inclusiones. F. Inclusiones con illita en su interior.

Primer evento



Segundo evento



Tercer evento

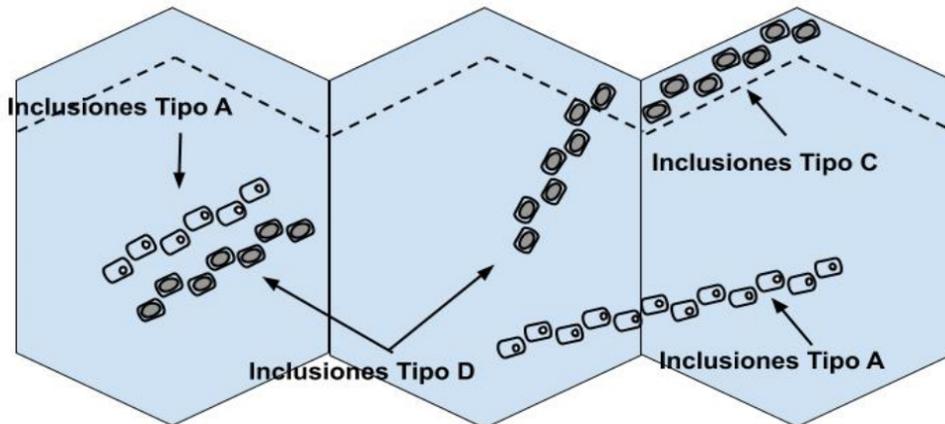


Figura 35: Principales eventos presentes en el sistema y su relación con el tipo de inclusión encontrado.

6.5. Evolución del fluido y ambiente de formación

Para definir el tipo de sistema que se está estudiando es esencial analizar cuales son los posibles caminos seguidos por el fluido mineralizador en cuanto a su evolución, así como sus posibles componentes. Además es importante considerar cómo se produce el ingreso de los metales formadores de mena dentro del sistema. De acuerdo a varios autores los metales son introducidos a partir de fluidos que derivan a partir de magmas (Hedenquist y Lowenstern, 1994).

En sistemas de tipo magmático-hidrotermal se tiene que cuando una intrusión magmática asciende esta comenzará a saturarse en una fase fluida menos densa. La acumulación de este fluido en el techo de la intrusión permitiría luego su separación de debido a diferencias de densidad. Una vez que esta fase es separada, su contenido de metales y otros elementos serán distribuidos en diferentes proporciones en base a los distintos coeficientes de partición que cada elemento posee, entre la fase fundida y la fase fluida separada (Holland 1972; Whitney 1975; Burnham 1967, 1979).

Una vez el magma asciende y la fase fluida es separada desde el fundido original, los distintos elementos en el magma son particionados en distintas proporciones en la fases presentes. Así de acuerdo a Burnham (1979), elementos como el cloro son fuertemente particionados en la fase fluida, lo cual es de gran importancia considerando que este elemento es uno de los principales ligandos para el transporte de oro y plata en solución. Se tiene como el cloro se enriquece en solución por un factor de 500 veces con respecto a la fase fundido (Gammons, 1997).

En cuanto al contenido metálico de las soluciones liberadas a partir de los magmas, elementos como el cobre particionan fuertemente hacia la fase salmuera por sobre la fase vapor al igual que zinc, plomo que muestran el mismo comportamiento que este metal (Williams, et al. 1995; Holland, 1972). Por tanto, de esta forma es como posiblemente los metales son introducidos al interior del sistema. La incorporación de metales extraídos a partir de cantidades trazas presentes en la roca caja se piensa menos probable.

Del análisis y resultados obtenidos, se observa como el principal tipo de alteración que afecta la veta en estudio corresponde a una alteración de tipo propilítica. Esta alteración queda marcada generalmente por la presencia de cuarzo, epidota, clorita y calcita, minerales que definen su aparición. Alteración argílica es encontrada más escasamente en el depósito, siendo reconocida por la presencia de arcillas (illita) y cuarzo.

La presencia de un amplio desarrollo de alteración tipo propilítica indica como el fluido que iba en ascenso se encuentra en condiciones de pH cercanos a neutro-alcalino. Posiblemente la solución se encontró buferado por la interacción con la roca caja, y a medida que se acerca hacia niveles más superficiales la existencia de

ebullición provocaría que especies volátiles acídicas, como CO_2 y H_2S se separaran de la fase salmuera provocando un aumento en el pH de la solución hidrotermal. La exolución de estos gases acídicos ricos en CO_2 y H_2S , podrían luego haber sido absorbidos por aquellas aguas meteóricas emplazadas en profundidad llevado al desarrollo de un tipo de alteración cuarzo-illita en las zonas menos profundas de la veta (Hedenquist, 1990; Simmons y Browne, 2000; Simmons et al., 2000).

La escasa aparición de inclusiones con cristales de halita sugiere como aquellos fluidos se encuentran generalmente subsaturados en NaCl , lo cual podría sugerir que el transporte de metales por medio de complejos clorurados tiene una baja dominancia en el sistema. Sin embargo dada la alta ocurrencia de pitita a lo largo de toda la veta asociada principalmente a mineralización de calcopirita, esfalerita y galena sugiere como estos fluidos posiblemente llevaron cantidades significativas de H_2S . Altas concentraciones de H_2S sugieren que el transporte de metales preciosos es más probable de haber sido mediante complejos sulfurados.

La existencia de distintos tipos de inclusiones en el interior del sistema muestra cómo este fluido en ascenso sufre importantes cambios a través de su historia. Aunque escasamente observadas, inclusiones con presencia de halita, inclusiones ricas en vapor coexistiendo con inclusiones ricas en líquido, inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor dejan ver como el fluido va evolucionando en el transcurso de su ascenso.

La deposición de metales base dentro del sistema se habría producido a medida que un fluido alcalino se desplazaba a niveles más superficiales distribuyendo homogéneamente a lo largo de la veta. Sin embargo dada la presencia de un nivel de ebullición a mayor profundidad, posiblemente estos metales se concentran en niveles aún más profundos. Esta deposición se habría producido como un evento posterior a la formación de los principales minerales de ganga del sistema.

Una vez la deposición de metales base procedió, este mismo fluido de carácter alcalino habría ascendido hacia niveles aún más superficiales. El desplazamiento de estas soluciones caliente a través de las fracturas y microfracturas habría depositado su carga de metales preciosos en respuesta posiblemente a ebullición y leves variaciones de pH. Estos cambios químicos dentro del fluido habrían afectado los complejos transportadores de metales dentro del sistema hidrotermal.

A partir del hallazgo de familias de inclusiones ricas en vapor coexistiendo con inclusiones ricas en líquido, las cuales fueron encontradas dispuestas de forma radial con respecto a cristales de pirita al interior de la veta se puede deducir como aquellas soluciones mineralizadoras depositaron su carga de metales mientras se encontraban ebullendo. La existencia de estas inclusiones alineadas con la mineralización cuyo origen es secundario con respecto al cristal hospedador, marca claramente como un evento posterior a la deposición de la mineralogía de ganga tomó lugar a lo largo de la

veta. Estas soluciones se habrían encontrado ebulviendo y con un pH neutro-alcalino dadas el tipo de alteración presente al momento de la deposición.

Posteriormente a la deposición de los metales base y metales preciosos, las fracturas a través de las cuales las soluciones hidrotermales circularon se habrían sellado impidiendo que nuevos fluidos se movieran a través de las mismas. La presencia de inclusiones ricas en líquido vistas desde las zonas más profundas del sistema, las cuales se superponen con aquellas ricas en vapor sugiere como por el sistema habría circulado una segunda solución. La existencia de este nuevo fluido muestra como un nuevo evento tomó lugar en el sistema.

Dadas las características texturales de la mineralogía encontrada, las cuales algunas veces se encontraron reemplazada por nuevos cristales, como es el caso de calcita hojosa reemplazada por cuarzo dentro del depósito, sugiere como la circulación de estos nuevos fluidos habrían dirigido a procesos de disolución y precipitación de nuevos cristales. Esto sería provocado por diferencias composicionales del nuevo fluido con respecto a la mineralogía presente.

Este nuevo fluido pudo haber sido resultado de una mezcla con aguas meteóricas más superficiales, las cuales producto de la unión con gases magmáticos se habrían calentado y acidificado generando una leve alteración argílica en superficie, mismo proceso el cual pudo promover nueva deposición de metales preciosos. La mezcla de fluidos pudo provocar que tanto mineralogía de cuarzo como calcita precipitaran en condiciones de no-ebullición, dado el contenido de sílice y dióxido de carbono inicial de la solución y su permanencia posterior a la mezcla. Estos fluidos habrían podido además re-movilizar el contenido de metales presente dentro del sistema, dependiendo de los contenidos de H_2S los cuales podrían interactuar con los minerales presentes. Finalmente habría tomado lugar una oxidación del sistema con oxidación marcada por la presencia de especularita limonita, entre otros óxidos.

6.6. Mecanismos de deposición

Diversos estudios llevados a cabo en actuales sistemas geotermales y depósitos hidrotermales muestran cómo ebullición puede llegar a ser un efectivo mecanismo depositacional. Este proceso podría producir significativos cambios en la solución transportadora de metales llevando a la deposición del contenido metálico. Mezcla con aguas superficiales, caídas de temperatura son también mecanismos causantes de la precipitación de metales (Brown, 1986; Dong et al., 1995; Hedenquist et al., 2000; Simmons y Browne, 1990; Simmons et al., 2000).

En el campo geotermal de Broadlands-Ohaaki en Nueva Zelanda, a partir de información de pozos de extracción fue mostrado como la ocurrencia de grandes concentraciones de sulfuros, así como oro y plata fue consecuencia directa de la ocurrencia de boiling. Esta ebullición se habría producido como resultado del pasó de un fluido desde 260°C a 180°C. Solubilidades de oro de ~10 ppb a 260°C, ~1 ppb a 185°C, fueron medidas para un acuífero antes y después a la ebullición, mostrando la importancia de este proceso en la solubilidad de estos metales, lo cual lleva a la deposición de oro (Brown, 1986).

En su trabajo Hedenquist et al. (2000) señalan de igual manera como 'boiling' es el principal mecanismo que lleva a la deposición de la mena de oro cuando esta es transportada como complejo sulfurado en depósitos del tipo epitermal. Además señalan que ciertas características texturales de los minerales de ganga como lo son cuarzo crustiforme, calcita bladed y adularia son el resultado de rápido enfriamiento de los fluidos llevando metales o como consecuencia de ebullición de los mismos. Simmons y Browne, (2000), indican que en muchos depósitos existe una separación entre la localización del oro y la zona desde la cual los fluidos ebulleron, así como también de sus indicadores. Señalan que esta separación puede ser consecuencia de un retraso en la saturación de oro en los fluidos hidrotermales o debido a transporte coloidal.

Otros autores como Dong et al. (1995) indican como en depósitos epitermales los distintos tipos de texturas encontrados, como lo son cuarzo coliforme, calcita en hoja son buenos indicadores de ebullición. Por otro lado texturas tipo cuarzo mosaico, plumoso, crustiforme si bien pueden ser el resultado de este proceso, también podrían originarse producto de la mezcla con fluidos meteóricos o un descenso rápido en la temperatura. Estos resultados también son apoyados por investigaciones realizadas por Moncada et al. (2012), donde señalan como estas texturas están relacionados a grados más altos de mena en comparación con aquellas texturas de no ebullición.

En su trabajo Moncada et al. (2017) describen una herramienta conocida como factor de confianza de ebullición o 'Boiling Confidence Factor' (BCF), con la cual es posible evaluar la ocurrencia de ebullición dentro de un sistema hidrotermal. Este método descansa sobre la premisa de que una muestra que presente un mayor número de características propias de boiling entregará mas confianza acerca de que el proceso ocurrió en tal lugar. El BCF asigna una puntuación a aquellas muestras en estudio,

dichos valores corresponden, de acuerdo al tipo de característica a, inclusiones ricas en liquido coexistiendo con vapor (5), inclusiones vapor (3), calcita hojosa (3) y adularia (3). Otras características menos indicativas de ebullición reciben valores, cuarzo mosaico (1), plumoso (1).

En base a la metodología desarrollada por Moncada et al. (2017), las muestras pertenecientes a la veta Don Leopoldo son ranqueadas según su Factor de Confianza de Ebullición, resultando en la Figura 36. En este gráfico se muestran las leyes de plata en verde, oro en azul y el Factor de ebullición en rojo. Se puede ver como en la veta Don Leopoldo solamente dos muestras presentan un BCF=6, las cuales se localizan en cotas entre los 800-860 msnm y cuyos grados de oro y plata son generalmente no mayores a 0.5 ppm y 4 ppm, respectivamente. Las demás muestras exhiben todos valores de $BCF \leq 4$, donde en aquellas zonas más periféricas de la veta predominan $BCF=1$, mientras que $BCF=4$ se hacen presente más predominantemente en cotas intermedias a superficiales de entre 850-950 msnm.

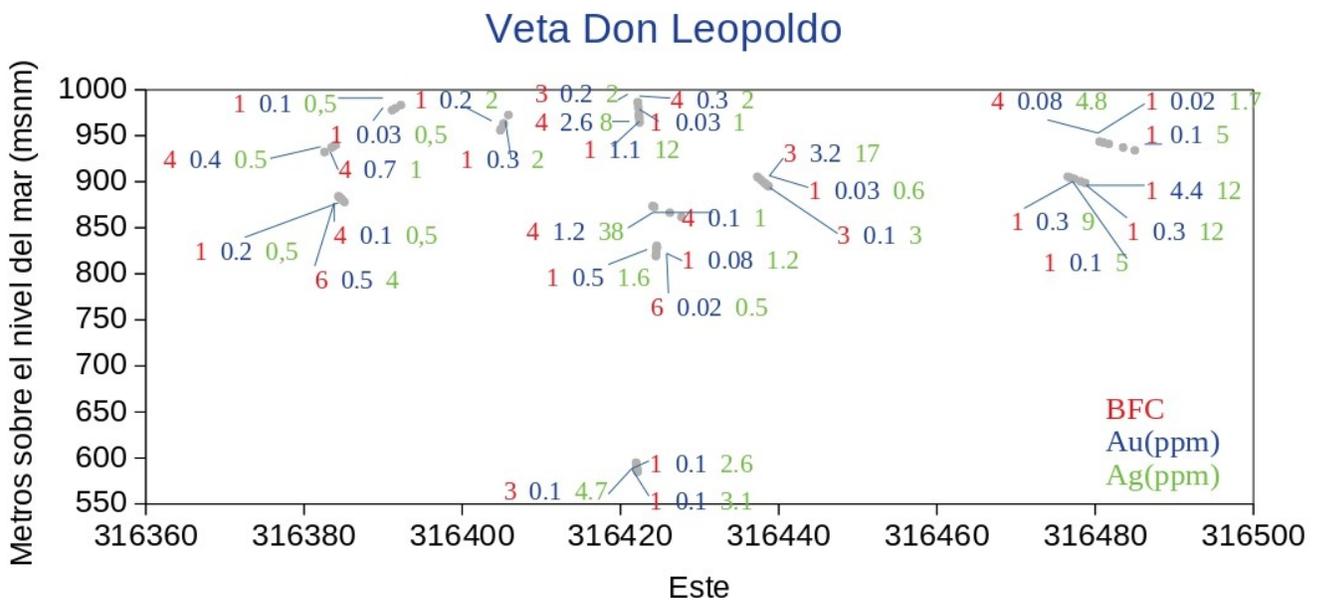


Figura 36: Sección longitudinal de la veta Don Leopoldo, en dirección oeste-este. Los sets de valores señalados para cada muestra corresponden al Factor de confianza de ebullición (rojo), ley de oro (azul) y ley de plata (verde).

Bajos valores de BCF pueden verse relacionados a aquellos grados de mena más elevados dentro de la veta, donde la presencia de estos bajos coeficientes a lo largo de casi todo el sistema, es representativo de que dentro del mismo, un porcentaje solamente del ~20% de las muestras presentaron la característica de ebullición. Lo anterior sugiere que las leyes presentes en la veta en estudio podrían estar controladas por un proceso adicional a ebullición, resultado de mezcla con aguas meteóricas

superficiales, las cuales habrían desestabilizado, enfriado aquellas soluciones en ascenso causando precipitación de metales preciosos, y por lo cual la presencia de ebullición es menos marcada. Otra explicación para tales valores, es que podría tratarse de la zona mas superficial de un sistema donde grados mas altos de metales se encuentren aún mas profundos, cercanos al nivel desde el cual las soluciones ascendentes comenzaron a hervir, lo que provocaría que en nuestro sistema, aquellos grados económicos fueran mas bajos y homogéneos, con una menor correlación con el BCF. De esta forma ebullición muestra ser un mecanismo, si bien presente, menos predominante el la deposición de metales, en la veta Don Leopoldo.

El efecto del pH en la solubilidad de metales preciosos oro y plata, muestra tener un efecto importante de acuerdo a investigaciones realizadas por distintos autores (Seward, 1976; Gammons y Barnes, 1989; Gammons and Williams, 1997). La influencia de este tipo de cambios en la solución y su efecto en la deposición de metales se piensa no tener un efecto significativo dada la homogeneidad de la zonación de alteración propilítica dentro del sistema, la cual sugiere cómo los fluidos mineralizadores se habrían encontrado en condiciones de pH neutro-alcalino. Así mismo, presencia de una alteración argílica en la parte más superficial de la veta, señala como los fluidos habrían evolucionado hacia pH más ácidos lo cual habría permitido la deposición de arcillas y cuarzo. Dada la escasa aparición de este tipo de alteración en el sistema, se descarta cambios de pH como un mecanismo gatillador para la mineralización de la veta Don Leopoldo.

Dada la falta de información acerca de las condiciones de temperatura al momento de precipitación de la mena, no hay evidencia para indicar la contribución que pudo haber tenido este proceso en la precipitación de metales, aunque de acuerdo a la bibliografía disponible, su contribución sería solamente minoritaria y dependería del tipo de complejo transportando los metales en solución (Seward, 1976; Gammons and Williams, 1997). La existencia de ebullición en profundidad entre los 550-600 msnm, sugiere que mayores leyes podrían ser alcanzados aun más profundo, y junto con la aparición de texturas de cuarzo y calcita las cuales señalan ebullición, como lo son cuarzo coloforme y calcita en hoja reemplazada por cuarzo, junto con el BCF con baja correlación a grados económicos de oro, dan cuenta de cómo boiling fue un proceso el cual tomó lugar en el sistema, pero que posiblemente tuvo una participación conjunta en el control de la leyes con un proceso de mezcla. Si bien dilución con aguas meteóricas pudo haber tenido lugar su contribución es ambigua y se considera pudo haber resultado en que grados altos de metales mostraran relación a texturas de no ebullición, como calcita rómbrica y cuarzo comb, así como al desarrollo de una alteración levemente argílica.

7. CONCLUSIONES

El análisis textural de los diferentes minerales de ganga es de suma importancia para la examinación del sistema en estudio. La información que entregan los tipos de texturas hablan acerca de las condiciones de precipitación, diferentes eventos que pudieron haber ocurrido dentro del sistema, y muestran relación con los grados de mena. Además su conocimiento es esencial para llevar a cabo un correcto estudio de inclusiones fluidas.

Aquellas texturas donde los cristales de cuarzo llegaron a estar bien desarrollados, así como en cuarzo comb y zonal, y donde además el tamaño alcanzado por el cristal fue generalmente milimétrico, se presentaron aquellas inclusiones mejor conservadas y más fácilmente identificables bajo el microscopio. Por otro lado, cuarzo mosaico presentó generalmente inclusiones muy pequeñas, incluso llegando a ser no identificables. Por consiguiente, el tamaño del cristal hospedador es crucial para la formación de buenas inclusiones.

A partir de los diferentes tipos de texturas identificadas se pudo observar como muestras con cuarzo coliforme, cuarzo comb y calcita rómbica fueron aquellas que se asociaron a los grados más altos de mena. Textura de cuarzo coliforme y calcita rómbica las cuales no mostraron presencia de la característica de ebullición se correspondieron con aquellas leyes más elevadas. Por el contrario se dió que en cuarzo comb los grados más altos estuvieron en aquellas muestras con la presencia de la característica. La existencia de texturas de no ebullición relacionadas a leyes económicas de oro y plata sugiere que otro mecanismo, como puede ser mezcla, controló la concentración de estos elementos en el sistema.

La presencia de distintos tipos de inclusiones vistas a lo largo del estudio muestran principalmente como distintos procesos tomaron lugar. Estas inclusiones entregan información de aquellos cambios en la composición de la soluciones formadoras de mena. La presencia de inclusiones de halita reconocidas escasamente dejan ver cómo en algún punto las concentraciones de sales estuvieron por encima de la saturación, pero que mayoritariamente los fluidos se encontraron subsaturados en NaCl.

La existencia de inclusiones ricas en vapor al interior del sistema indicó como aquellas soluciones que ascendieron a través de la veta sufrieron un proceso de ebullición, en el cual fluidos se atraparon a lo largo de fracturas, las cuales posteriormente serían selladas resultado de la precipitación mineral. La presencia de familias de inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor, las cuales se encontraron alineadas de manera radial a cristales de pirita, sugiere como aquellas inclusiones fueron atrapadas contemporáneamente con la mineralización de la veta Don Leopoldo. Se concluye como estas soluciones portadoras de metales se habrían atrapado a partir de fluidos los cuales se encontraban ebulliciendo.

La existencia de inclusiones ricas en líquido mostró corresponder a un segundo evento o fluido, el cual ascendió a través del sistema por medio de fracturas donde se encontraron atrapadas inclusiones ricas en vapor dentro de cristales donde también se identificaron inclusiones ricas en líquido. Esta superposición de eventos deja ver la complejidad de estos sistemas. Lo anterior sugiere que una buena petrografía de inclusiones puede ser esencial para entender la evolución dentro de un sistema hidrotermal.

En base a la distribución mostrada en profundidad por los diferentes metales, se tiene que existe una zonación vertical de la mineralización. Aquellas leyes de oro mostraron alcanzar sus valores más altos entre los 900-950 metros, mientras los mayores grados de plata se encontraron entre los 820-900 metros. Por otro lado la concentración de metales base al interior de la veta mostraron estar uniformemente distribuidas, sin mostrar una tendencia particular.

Evidencia proveniente desde inclusiones fluidas ricas en vapor las cuales se encuentran en zonas de crecimiento de cuarzo en niveles profundos de la veta aproximadamente a 585 msnm, muestran cómo el horizonte desde el cual los fluidos comenzaron a hervir se hallaría aún más en profundidad. Inclusiones secundarias ricas en vapor en niveles profundos son también evidencia de la existencia de este nivel. Un horizonte de ebullición más profundo dentro del sistema junto con los bajos grados de mena encontrados en las muestras en estudio, sugiere que aquellos grados más económicos para la veta aún no han sido explorados y que deberían encontrarse a una mayor distancia desde los 585 msnm.

El reconocimiento de una zonación vertical a lo largo de la veta Don Leopoldo sumado a una alteración propilítica dominante dentro del sistema y levemente argílica hacia la superficie, son características propias de sistemas epitermales. Los bajos grados económicos presentes para las principales menas de oro y plata, sumado a la existencia de un nivel de ebullición más profundo sugiere que la veta en estudio podría formar parte de un sistema mesotermal o epitermal. La caracterización de la veta como parte de algún tipo de depósito requiere mayores análisis.

La existencia de texturas de no ebullición relacionadas con leyes promedio altas de metales preciosos, junto con una alteración de tipo argílica desarrollada en la zona más superficial sugieren que los grados de elementos oro y plata estuvieron controlados posiblemente por un proceso de mezcla. En este proceso producto de la intersección de aguas meteóricas con gases ácidos habrían podido generar aguas vapor calentadas que alteraron la roca más superficial. Los bajos valores del factor de confianza de ebullición y su falta de correlación con leyes económicas de metales preciosos indican como posiblemente ebullición junto a un segundo proceso tomaron lugar y permitieron la deposición de metales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aliste, N., Pérez, E. y Carter, W.D. (1960). Definición y edad de la Formación Patagua, Provincia de Aconcagua, Chile. *Rev. Minerales*, Año XV, No 71, p. 40-50, Santiago de Chile.
- Adam, S. F. (1920). A microscopic study of vein quartz. *Economic Geology*, 15, p.623-664.
- Arribas, A., Jr. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid: Mineralogical Association of Canada Short Course, Vol.23, p. 419-454.
- Benning, L.G., and Seward, T.M. (1996). Hydrosulfide complexing of gold(I) in hydrothermal solutions from 150 to 500°C and 500 to 1500 bars: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.60, p. 1849-187.
- Bodnar R. (2003). Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshalls. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32: 1-8p.
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D., Steele-MacInnis, M. (2014). *Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits*. H. Holland and K. Turekian, *Treatise on Geochemistry*. Vol.13: 119-142p.
- Bravo, P. (2001). Geología del borde oriental de la Corallera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Brown, K.L. (1986). Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand: *Economic Geology* , Vol.81, p. 979–983.
- Buchanan L.J. (1979). The Las Torres Mine, Guanajuato, Mexico; Ore controls of a fossil geothermal system, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, PhD Thesis.
- Burnham, C.W. (1979). Magmas and hydrothermal fluids. In H.L. Barnes (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edn. John Wiley & Sons, p. 71-136.
- Camprubí, A., Canals, À., Cardellach, E., Prol-Ledesma, R.M., Rivera, R. (2001). The La Guitarra Ag-Au low sulfidation epithermal system, Temascaltepec district, Mexico. Vein structure, mineralogy, and sulfide-sulfosalt chemistry: *Society of Economic Geologists Special Publication Series*, Vol. 8, p. 133–158.
- Camprubí, A., Albinson, T. (2007). Epithermal deposits in Mexico - update of current knowledge, and an empirical reclassification. *Geological Society of America Special Paper* 422, p. 377-415.
- Candela, P.A. and Holland, H.D. (1984) The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 373-80.
- Charrier, R., Pinto, L. & Rodriguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En T. Moreno, y W. Gibbons, *The Geology of Chile*. The Geological Society, London. p. 21-114p.
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F. (2000). Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, p. 221– 44.
- Cotton, W.B. III., Atkinson, W. W. J R & Sharaky, A.M. (1999). Geology and ore deposits of the Maqui vein, Alhué mining district, Coast Range of Central Chile.

- Geological Society of America, Annual Meeting, Denver, Colorado, USA, Abstract 52241.
- Crerar, D.A., and Barnes, H.L. (1976). Ore solution chemistry, V: Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solutions at 200°C to 300°C: *Economic Geology*, Vol.71, p. 772-794.
- Dong G., Morrison G., Jaireth S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Econ. Geol.* Vol.90, 1841-1856.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W. & Inan, E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologist Special Publication*. Vol.10, p.285-314.
- Gammons C. H. and Barnes H. L. (1989). The solubility of Ag₂S in near-neutral aqueous sulfide solutions at 25 to 300°C. *Geochim Cosmochim. Acta* 53, p.279-290.
- Gammons, C.H., Williams-Jones, A.E. (1997). Chemical mobility of gold in the porphyry epithermal environment. *Economic Geology*, 92, p.45-59.
- Gana, P. y Tosdal, R. M. (1996). Geocronología U–Pb y K–Ar en intrusivos del Paleozoico y Mesozoico de la Cordillera de la Costa, región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 23, p.151–164.
- Gema Ribeiro Olivo and Anthony E. Williams-Jones. (2002). Genesis of the Auriferous Quartz-Tourmaline Vein of the Siscoe Mine, Val d'Or District, Abitibi Subprovince, Canada: Structural, Mineralogical and Fluid Inclusion Constraints.
- Giggenbach, W. F. (1997). The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. En J. Wiley & Sons (Edits.). New York: Barnes, H. L. p.737-796.
- Godoy, E., Loske, W. (1988). Plutonismo sintectónico de dioritas jurásicas al sur de Valparaíso: nuevos datos U-Pb sobre la "Fase Quintay". *Revista Geológica de Chile*, 15, p.119–127.
- Goldstein R.H., Reynolds T.J. (1993). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course, Notes*, p.31, 213.
- Goldstein, R. (2003). Petrographic analysis of fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canada, Short Course 32*: p.9-53.
- Hedenquist, J.W. (1990). The thermal and geochemical structure of the Broadlands Ohaaki geothermal system, New Zealand: *Geothermics*, Vol.19, p. 151–185.
- Hedenquist J.W., Arribas R A., Gonzalez-Urien E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, Vol.13, p.245-277.
- Hedenquist, J. W., and Lowenstern, J.B., (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits: *Nature*, v. 370, p. 519–527.
- Holland H.D. (1972). Granites, solutions, and base metal deposits. *Economic Geology* 67: 2 p.301.
- Levi, B. (1968). Cretaceous volcanic rocks from a part of the Coast Range west of Santiago, Chile: a study in lithologic variation and burial metamorphism in the Andean Geosyncline. Ph. D. Thesis, Univ. California, 191 p. Berk1ey.
- Lindgren, W. (1933). *Mineral Deposits*. McGraw-Hill, p.930.

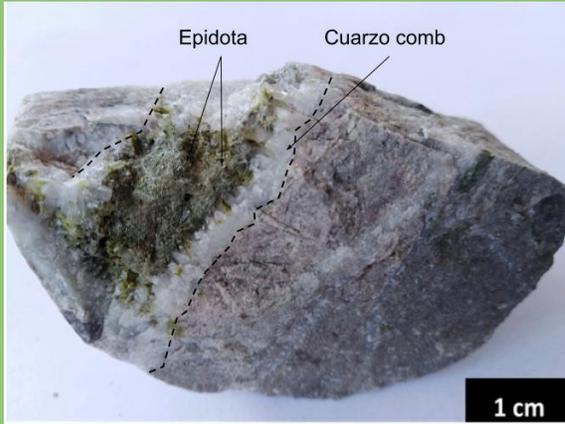
- Maksaev, V. (1975). Geología del Sector Sur Oriental del Cuadrángulo El Melón, Provincia de Aconcagua, V Región de Chile. Curso Proyecto 11, Depto. Geología Univ. Chile.
- Maksaev V., Townley B., Palacios C., Camus F. (2007). Metallic ore deposits. In: Moreno T, Gibbons W (eds) The geology of Chile. The Geological Society, London, p. 179-199
- Moncada, D., S. Mutchler, A. Nieto, T. J. Reynolds, J. D. Rimstidt and R. J. Bodnar (2012). Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 114: p.20-35.
- Moncada, D. and Bodnar, R. J. (2012). Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. *Central European Journal of Geosciences*. Vol 4(2), p.300-309.
- Moncada, D., Baker, D. & Bodnar, R. J. (2017). Structural and fluid controls on epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, Mexico, with applications to exploration. *Ore Geology Reviews*.
- Nasi, C. y Thiele, R. (1982). Estratigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la Costa al sur del río Maipo, entre Melipilla y Laguna de Aculeo (Chile Central). *Revista Geológica de Chile*. Vol.16, p.81-99.
- Piraces, R. (1976). Estratigrafía de la Cordillera de la Costa entre la Cuesta El Melón y Limache, provincia de Valparaíso, Chile. In Congreso Geológico. Chileno, No. 1, Actas, Vol.1, p. A65-A82
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore Forming Processes*, Blackwell, Oxford. p.75-128.
- Robert, F., and Kelly, W.C. (1987). Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada: *Economic Geology*, v. 82, p. 56-74.
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12.
- Sander M.V. and Black J.E. (1988). Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluid inclusion studies. *Economic Geology*, 83, p.1052-1060.
- Sernageomin. (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica Digital. No 4.
- Seward T. M. (1976). The stability of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, p.1329–1341.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H. (1988). High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16, p.551-555.
- Simon A.C., Frank M.R., Pettke, T., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Heinrich, C.A. (2005). Gold partitioning in melt-vapor-brine systems. *Geochim Cosmochim Acta* 69: p.3321-3335.
- Simmons, S.F., Gemmill, J.B., Sawkins, F.J. (1988). The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas; Part II, Physical and chemical nature of ore-forming solutions. *Economic Geology* 83 (8), p.1619–1641.
- Simmons, S.F., and Christenson, B.W. (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system: *American Journal of Science*, Vol. 294, p.361–400.

- Simmons, S.F., and Browne, P.R.L. (1997). Saline fluid inclusions in sphalerite from the Broadlands-Ohaaki geothermal system: A coincidental trapping of fluids being boiled toward dryness: *Economic geology*, v. 92, p. 485–489.
- Simmons, S.F., Arehart, G., Simpson, M.P., and Mauk, J, L. (2000). Origin of massive calcite veins in the Golden Cross, low-sulfidation epithermal Au-Ag deposit, New Zealand: *Economic Geology*, vVol.95, p. 99–112.
- Simmons S.F., White N.C., John D.A. (2005). Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Economic Geology; One Hundredth Anniversary Volume, 1905-2005*, p.485-522.
- Simpson, M.P., Mauk, J.L., Simmons, S.F. (2001). Hydrothermal Alteration and Hydrologic Evolution of the Golden Cross Epithermal Au-Ag Deposit, New Zealand. *Economic Geology* 96 (4), p.773–796.
- Skinner, B.J., (1997). Hydrothermal mineral deposits: What we do and don't know. In H.L. Barnes (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons, p. 1-29.
- Spooner, E.T.C., Bray C.J., Wood, P.C., Burrows, D.R., and Callan, N.J. (1987). Au quartz vein and Cu-Au-Ag-Mo-anhydrite mineralization, Hollinger-McIntyre Mines, Tim-mins, Ontario: $\delta^{13}\text{C}$ Values McIntyre., fluid inclusion gas chemistry, pressure depth estimation, and $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ phase separation as a precipitation and dilation mechanism: Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper 136, p. 35-56.
- Tagirov, B. R., Seward, T. M. (2010). Hydrosulfide/sulfide complexes of zinc to 250°C and the thermodynamic properties of sphalerite. *Chemical Geology*. Vol 269: 301-311p.
- Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de BarrigL Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol., No. 2, p.86.
- Van der Kerhof, A. & Hein, U. (2001). Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 44: p.27-47.
- Vergara, M.; Drake, R. E. 1979. Edades K-Ar en secuencias volcánicas continentales post-neocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Asoc. Geol. Argent., Rev.*, Vol 34, No. 1, p. 42-52.
- White, W.M. (2013) *Geochemistry*. First Edition, Wiley-Blackwell, Oxford, 660 pp.
- White, N. C. & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologist newsletter*. Vol.23: 1- 13p.
- Wilkinson J.J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229-272.
- Williams T. J., Candela P. A., and Piccoli P. M. (1995). The partitioning of copper between silicate melts and 2-phase aqueous fluids - An experimental investigation at 1 kbar, 800-degrees-C and 0.5-kbar, 850°C. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 121, p. 388-399.
- Zotov, A.V., Baranova, N.N., Dar'yina, T.G., and Bannykh, L.M. (1991). The solubility of gold in aqueous chloride fluids at 350-500°C and 500-1500 atm Thermodynamic parameters of $\text{AuCl}_2(\text{aq})$ up to 750°C and 5000 atm: *Geochemistry International*, v. 28,p.63-71.

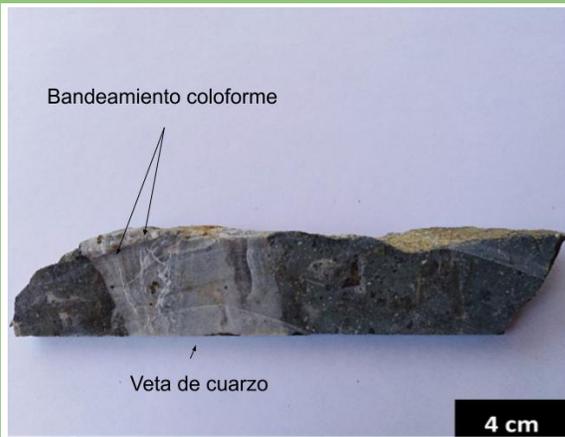
9. ANEXOS

Anexo A: Descripción muestras de mano.

Tabla 3: Descripción de muestras de mano.

<p>DDH23 / DM-55:</p> <p>Veta de cuarzo con epidota de aproximadamente unos 3 cm de ancho, mostrando textura de cuarzo comb desarrollada desde las paredes de la veta. Hacia el interior es posible ver cómo crece epidota acicular.</p>	<p>DDH23 / DM-58:</p> <p>Vetilla de cuarzo con textura comb de aproximadamente 1.5 cm. Se puede ver como los cristales de cuarzo se encuentran bien desarrollados dado que esta textura se desarrolla en espacio abierto, lo cual claramente se observa en la imagen. Al interior de la vetilla se identifica un mineral de color oscuro correspondiente a especularita, la cual aparece diseminada y acicular.</p>
	
<p>DDH23 / DM-60:</p> <p>Muestra conteniendo una veta de cuarzo de textura coloforme, de un ancho de alrededor de 7 cm de grosor. Se observa una sucesión de bandas de pocos milímetros, algunas de las cuales se señalan en la imagen. Hay presencia de pirita diseminada, la cual se encuentra uniformemente distribuida y corresponde</p>	

a aproximadamente un $\lt;0\%$ de la veta.



DDH26 / DM-114:

Cuarzo en vetilla con pirita y calcopirita diseminada en pequeñas cantidades ~ 2 de la roca entre los dos. Se identifica esfalerita cuya proporción es menor al $\lt;1\%$. Especularita está presente solo en un ~1%.

DDH26 / DM-113:

Muestra conteniendo veta de cuarzo con abundante mineralización al interior, el ancho de la veta es de aproximadamente unos 2.5 cm. La mineralización ocurre de dos diferentes manera en la roca, hay presencia de pirita y calcopirita diseminada dentro de la veta, como también en la matriz. Se identifica galena en paragénesis con esfalerita, las cuales se distribuyen principalmente al interior de la veta, además hay abundante especularita 2% aprox.



DDH34 / DM-117:

Se tiene una vetilla de cuarzo menor a 2 cm, en la cual este se observa principalmente masivo. La presencia de pirita y calcopirita se deja ver por toda la muestra, no solamente asociada a la vetilla y corresponde a un 20% y 15%, respectivamente. La esfalerita 1%, se muestra especialmente en cúmulos y en paragénesis con calcopirita en la vetilla. Minerales de alteración como epidota y clorita (10% y 15%) también se hacen presentes lo cual sugiere una alteración del tipo propilítica para nuestra roca.

DDH34 / DM-121:

Veta de cuarzo crustiforme, con múltiples bandas dispuestas de manera casi paralela unas con otras y anchos de unos cuantos milímetros, las cuales pasan a cuarzo comb con epidota y clorita en el centro, aproximadamente 15% y 10% de la veta. Se puede observar esfalerita y calcopirita diseminada en la veta, y es



DDH18 / DM-141

Presencia de homogéneamente distribuido junto con calcita. La mineralización se encuentra como cúmulos de pirita, galena y esfalerita en paragénesis. Especularita solo se identifica en pequeñas proporciones dentro de la muestra.

**DDH18 / DM-144**

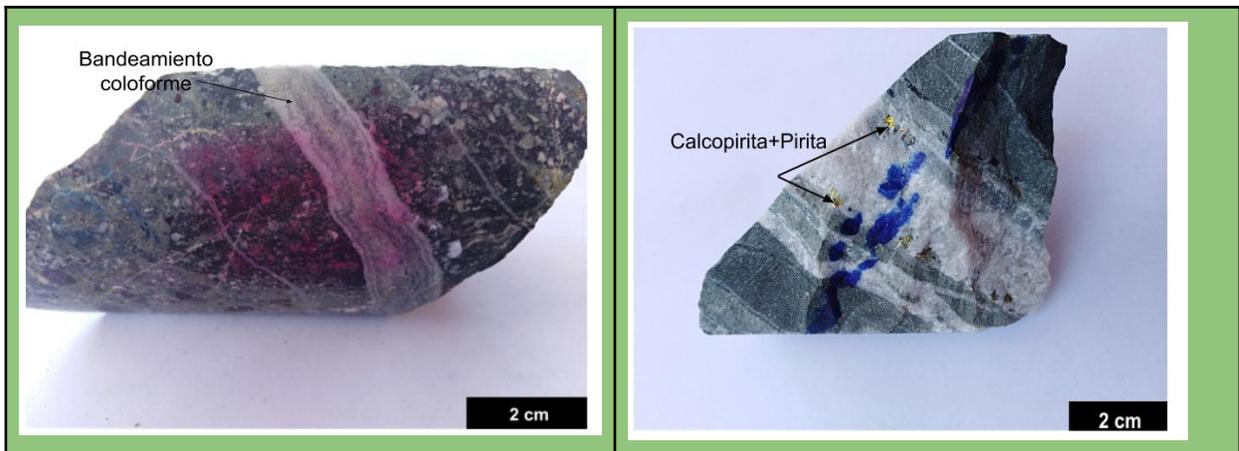
Veta de cuarzo de aproximadamente 2 cm de grosor, con cuarzo de textura coliforme, donde las bandas son de tamaños milimétricas. Se identifica pirita generalmente distribuida a lo largo de la pared de la vetilla.

**DDH18 / DM-146**

Vetilla de 1.5 cm de cuarzo crustiforme completamente simétrico desde ambas paredes de la vetilla, el bandamiento es milimétrico y no hay presencia de mineralización.

DDH19 / DM-153

Veta de cuarzo de 2cm con pirita, calcopirita y galena en paragénesis. Los sulfuros se encuentran a ambos lados de la veta en las paredes, lo cual claramente se observa en la imagen. Hay un mineral con tonos púrpura rojizos que no se pudo identificar. El cuarzo se presenta con textura coliforme principalmente.

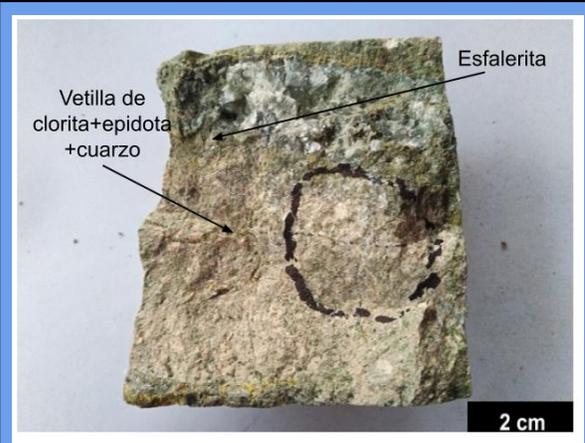
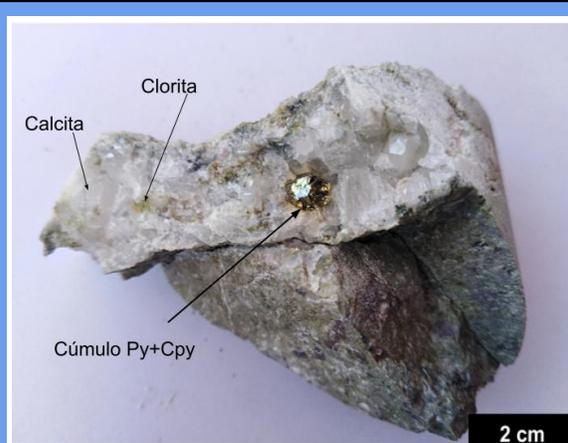


DDH19 / DM-158

Vetilla de 1.5 cm de calcita rómbica, hay presencia de cúmulos de calcopirita, y pirita de hasta 4 mm, la cual corresponde a <1% de la vetilla. Fue posible identificar además epidota en los bordes, pirita en paragénesis con galena en muy bajas proporciones, y presencia también de clorita en la vetilla.

DDH21 / DM-176

Roca muy alterada con abundante feldespato potásico, vetillas de unos cuantos milímetros de cuarzo con presencia de esfalerita y algo de pirita diseminada. Se observa una vetilla de cuarzo de ancho 1.5 cm con esfalerita en la pared.

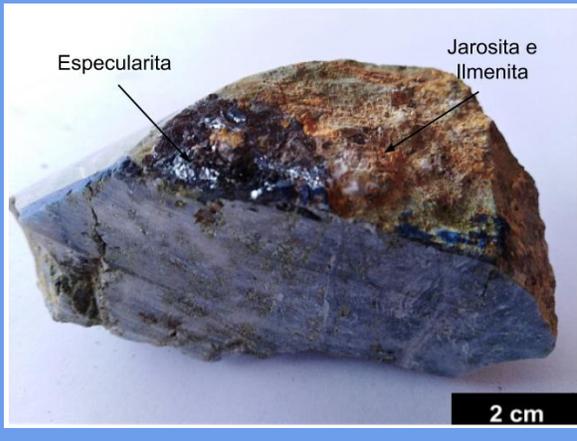


DDH30 / DM-132

Muestra de roca bastante alterada, la cual presenta un color oscuro y presencia de pirita diseminada en toda la roca, la cual constituye aproximadamente el 1%, además se identifica mineral especularita y otros óxidos de hierro que podrían corresponder a jarosita o ilmenita.

DDH30 / DM-134

Roca con vetillas de diferentes tamaños, las cuales van desde 2 mm de ancho, hasta 1 cm. Las vetillas están principalmente rellenas de cuarzo microcristalino, del cual no es posible apreciar su textura. Las vetillas más pequeñas se encuentran rellenas de cuarzo, epidota y clorita. Hay presencia de pirita la cual se observa diseminada, tanto alrededor de la matriz como al interior de la vetillas.



Anexo B: Resultados de análisis geoquímicos.

Tabla 4: Resultados de los análisis geoquímicos de roca total. Se muestran los principales metales oro, plata, cobre, zinc y plomo, juntos con los no metales de arsénico y antimonio.

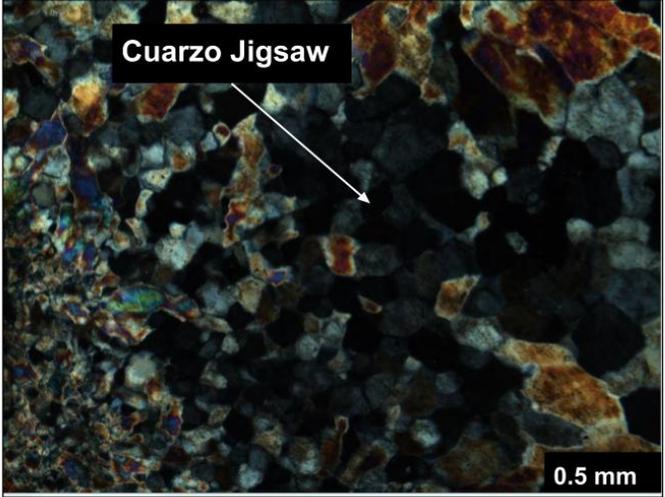
	Au (ppm)	Ag (ppm)	Zn (%wt)	Pb (%wt)	Cu (%wt)	As (ppm)	Sb (ppm)
Sample							
DM-29	0,373	2	0,172	0,057	0,0127	115	8
DM-30	0,033	1	0,041	0,036	0,0236	27	5
DM-31	0,041	0,5	0,028	0,008	0,007	36	2,5
DM-32	0,447	10	0,082	0,046	0,0109	75	5
DM-33	0,196	2	0,304	0,03	0,028	47	2,5
DM-34	2,6	8	2,03	0,06	0,0868	58	2,5
DM-35	1,1	12	2,41	0,108	0,584	146	11
DM-36	1,1	12	2,41	0,108	0,584	146	11
DM-37	0,034	2	0,064	0,025	0,0137	24	2,5
DM-38	0,248	4	0,063	0,036	0,0039	157	5
DM-39	0,216	2	0,045	0,027	0,0018	176	2,5
DM-40	0,084	1	0,028	0,007	0,0112	41	2,5
DM-41	0,121	0,5	0,008	0,004	0,0052	45	2,5
DM-42	0,143	2	0,071	0,043	0,0108	75	7
DM-43	0,302	2	0,049	0,027	0,0102	79	12
DM-55	0,164	2	0,011	0,005	0,002	73	6
DM-56	0,03	0,5	0,005	0,002	0,0003	46	2,5
DM-57	0,009	0,5	0,004	0,001	0,0004	64	2,5
DM-58	0,098	0,5	0,028	0,017	0,0231	29	6
DM-59	0,073	0,5	0,028	0,013	0,0054	42	2,5
DM-60	0,074	1	0,056	0,022	0,0075	25	7
DM-61	0,443	0,5	0,047	0,018	0,0172	36	6
DM-112	1,7	4	0,091	0,022	0,0059	56	18
DM-113	1,2	38	0,625	0,07	0,0396	40	16
DM-114	0,092	1	0,108	0,033	0,0821	49	10
DM-115	0,025	0,5	0,0125	0,0048	0,007	24	2,5
DM-116	0,022	0,5	0,017	0,007	0,0041	17	5

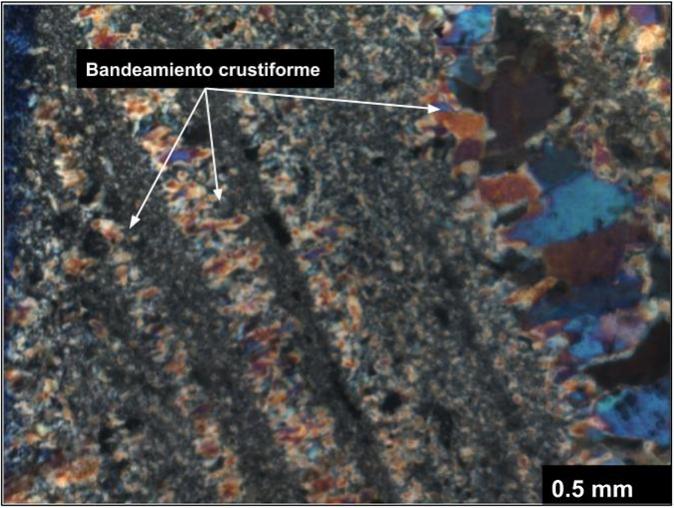
DM-117	0,5	4	0,061	0,04	0,0241	158	2,5
DM-118	0,251	0,5	0,063	0,043	0,0137	61	2,5
DM-119	0,15	0,5	0,033	0,014	0,0043	10	2,5
DM-120	0,189	0,5	0,059	0,072	0,0124	9	2,5
DM-121	0,039	0,5	0,022	0,007	0,0057	10	2,5
DM-122	0,9	12	0,755	0,466	0,11	26	9
DM-123	0,244	1	0,023	0,018	0,0092	12	2,5
DM-130	0,139	5	0,124	0,01	0,0091	216	2,5
DM-131	4,4	12	0,221	0,086	0,0296	85	11
DM-132	4,4	12	0,221	0,086	0,0296	85	11
DM-133	0,225	9	0,202	0,069	0,0614	62	12
DM-134	0,314	12	0,245	0,071	0,08	89	14
DM-135	0,271	2	0,198	0,078	0,0906	34	16
DM-136	0,076	1,8	0,0546	0,0332	0,0409	83	2,5
DM-141	3,2	17	1,465	0,086	0,1	51	16
DM-142	3,2	17	1,465	0,086	0,1	51	16
DM-143	0,119	2	0,087	0,041	0,0071	52	2,5
DM-144	0,118	3	0,072	0,039	0,0036	91	2,5
DM-145	0,035	0,6	0,0106	0,0055	0,005	37	2,5
DM-146	0,025	0,25	0,0107	0,0045	0,003	32	2,5
DM-147	0,0025	0,25	0,0078	0,0025	0,0015	35	2,5
DM-148	0,026	0,25	0,0091	0,0035	0,0036	39	2,5
DM-152	0,17	1	0,0269	0,0102	0,0123	43	2,5
DM-153	0,105	2,1	0,0324	0,0166	0,0075	197	2,5
DM-154	0,5	1,6	0,121	0,0725	0,0271	95	8
DM-155	0,083	1,2	0,299	0,151	0,0335	100	6
DM-156	0,027	0,25	0,0109	0,0052	0,0066	117	2,5
DM-157	0,04	0,25	0,0132	0,007	0,0056	72	2,5
DM-158	0,068	0,25	0,0232	0,0201	0,006	86	5
DM-159	0,5	0,25	0,0262	0,0136	0,0214	40	5
DM-160	0,5	7,1	0,193	0,115	0,0825	23	11

DM-161	0,142	4,7	0,0918	0,0375	0,198	22	12
DM-162	0,108	3,1	0,0774	0,0456	0,0569	17	14
DM-163	0,484	2,1	0,1755	0,127	0,0379	19	14
DM-164	0,111	2,6	0,532	0,171	0,0477	18	19
DM-165	0,031	0,25	0,0161	0,0165	0,0018	51	7
DM-166	0,014	0,25	0,0173	0,0083	0,0043	25	2,5
DM-167	0,012	0,25	0,012	0,0066	0,0015	25	6
DM-175	0,026	1,7	0,0878	0,0522	0,0027	81	5
DM-176	0,021	0,6	0,0224	0,0173	0,0024	122	2,5
DM-177	0,088	4,8	0,0849	0,0332	0,0069	134	2,5
DM-178	0,009	0,5	0,069	0,004	0,003	30	2,5
DM-179	0,191	5	0,178	0,099	0,126	41	8

Anexo C: Texturas minerales de ganga veta Don Leopoldo.

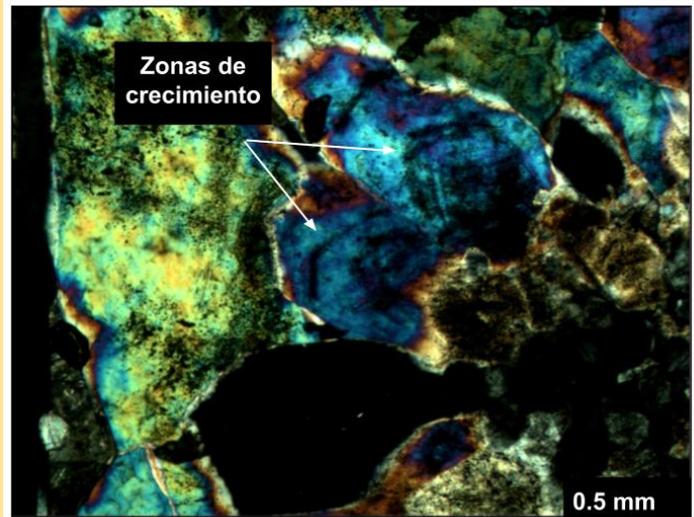
Tabla 5. Texturas de cuarzo y calcita.

DM-32	Textura de cuarzo jigsaw. Se puede observar como los bordes de los granos de cuarzo se encuentran interpenetrados.	 <p>Cuarzo Jigsaw</p> <p>0.5 mm</p>
DM-59	Cuarzo dispuesto alrededor de fragmento de roca en forma concéntrica dejando ver una textura cockade.	 <p>Cuarzo cockade</p> <p>0.5 mm</p>

<p>DM-59</p>	<p>Bandeamiento cristiforme de cuarzo, donde las bandas son de aproximadamente unos 2-4 mm de ancho y se disponen de manera paralela rellenando la vetilla.</p>	
<p>DM-119</p>	<p>Calcita rómbica vista a nicoles cruzados rellenando vetillas. Se puede ver de manera muy notoria la macla, rasgo característico de este mineral.</p>	

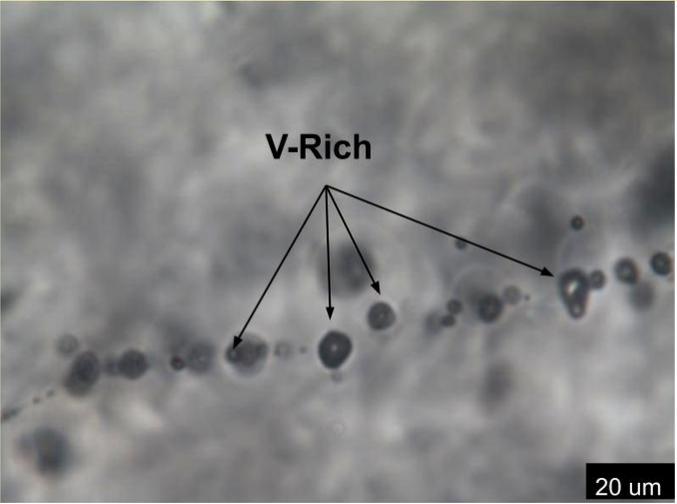
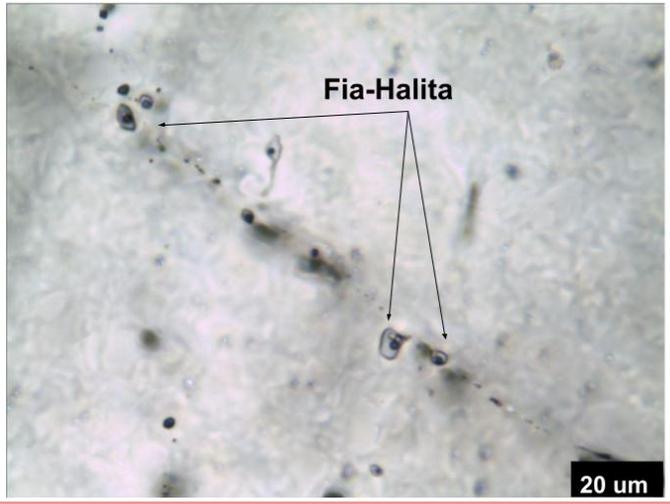
DM-167

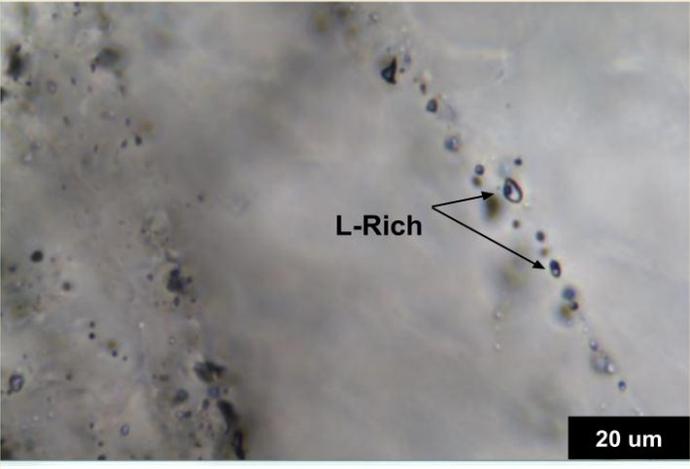
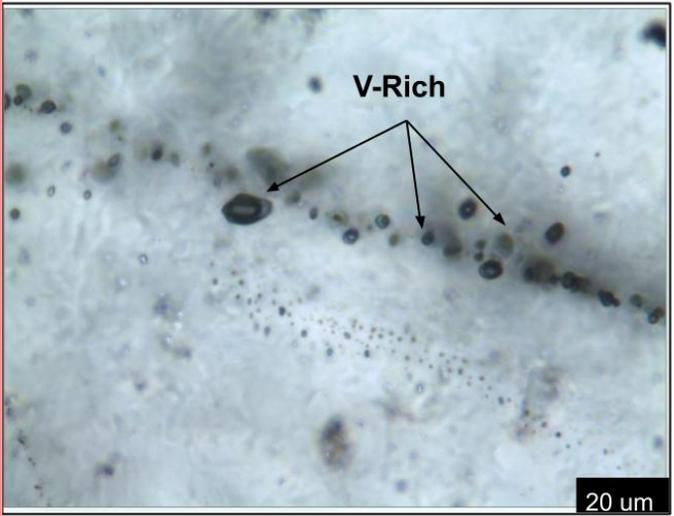
Cristales de cuarzo zonal visto a nicoles cruzados, en los cuales es posible ver numerosas inclusiones dentro de las zonas de crecimiento del cristal, las cuales marcan dichos límites.

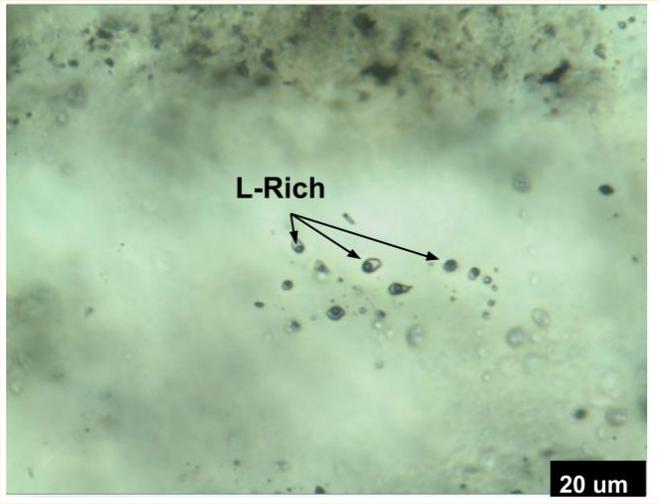


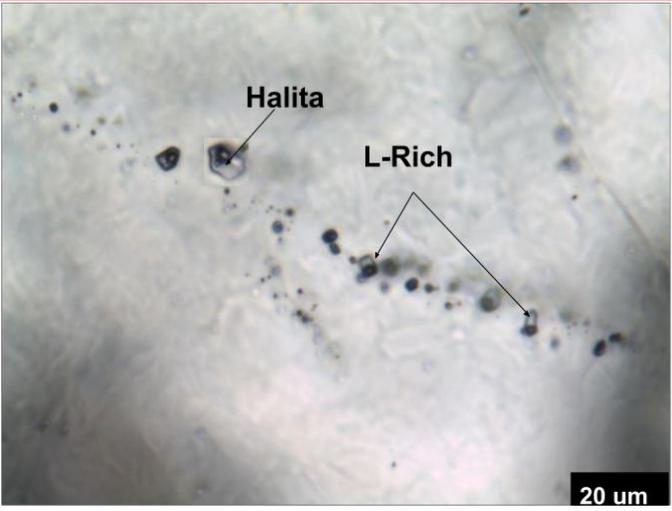
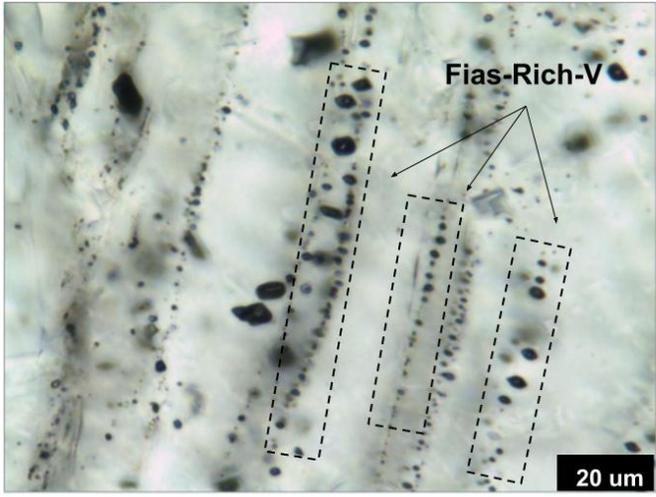
Anexo D: Petrografía de inclusiones fluidas

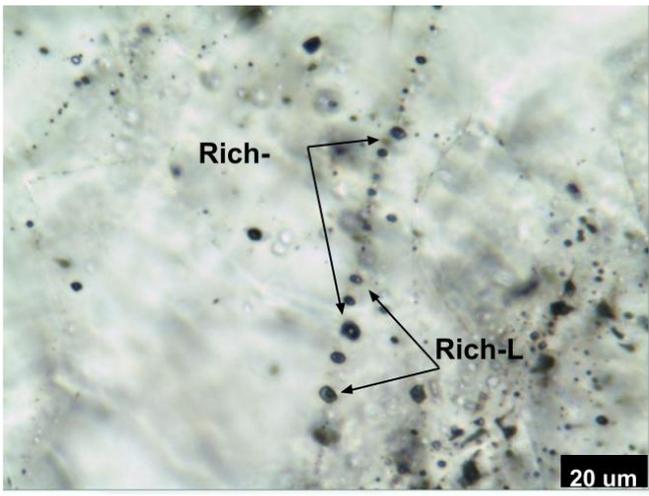
Tabla 6. Petrografía de inclusiones fluidas

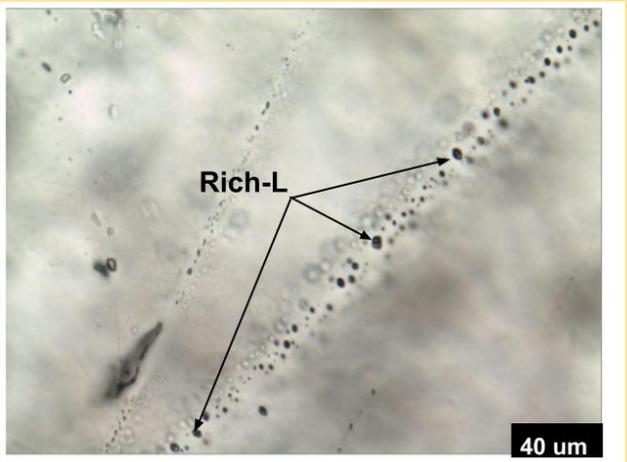
DM-167	Muestra de cristal de cuarzo de textura comb. En su interior se encuentran fias de inclusiones de fase vapor de entre 2-12 μm .	 <p>A micrograph showing a quartz crystal with a complex texture. Several small, dark, circular fluid inclusions are visible, labeled as 'V-Rich' with arrows. A scale bar in the bottom right corner indicates 20 μm.</p>
DM-37	Muestra conteniendo cristales de cuarzo de textura jigsaw con abundantes familias de inclusiones fluidas ricas en líquido. Entre ellas destacan inclusiones con cristales hijos de halita en su interior.	 <p>A micrograph showing a quartz crystal with a jigsaw texture. Several fluid inclusions are visible, labeled as 'Fia-Halita' with arrows. A scale bar in the bottom right corner indicates 20 μm.</p>

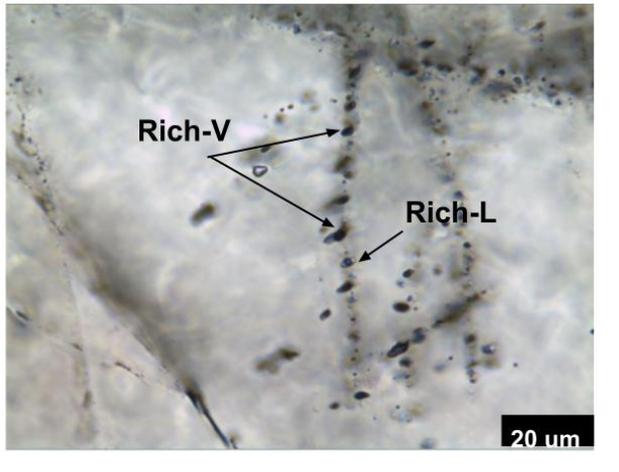
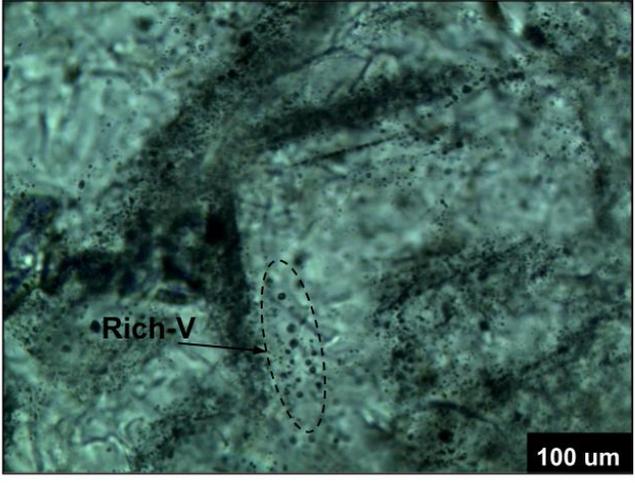
<p>DM-31</p>	<p>Inclusiones fluidas ricas en líquido, dentro de cuarzo euهدral. Las inclusiones se observan alargadas y con tamaños entre 2-8 μm.</p>	
<p>DM-34</p>	<p>Inclusiones ricas en vapor de origen secundario encontradas en fracturas selladas en cuarzo de tipo euهدral.</p>	

DM-58	Cuarzo comb el cual presenta abundantes inclusiones ricas en líquido, las cuales pueden o no encontrarse en familias.	 <p>A micrograph showing a quartz crystal with numerous small, dark, circular inclusions. Two arrows point to specific inclusions labeled "L-Rich". A scale bar in the bottom right corner indicates "20 um".</p>
-------	---	---

<p>DM-60</p>	<p>Cuarzo euhedral el cual presenta inclusiones ricas en líquido en su interior. Además en algunas fias hay presencia de cubos de halita, como se señala en la imagen.</p>	 <p>A micrograph showing euhedral quartz crystals. One crystal contains a small, dark, cubic inclusion labeled 'Halita'. Another crystal contains a cluster of dark, rounded inclusions labeled 'L-Rich'. A scale bar in the bottom right corner indicates 20 μm.</p>
<p>DM-117</p>	<p>Diferentes trails de familias de inclusiones ricas en vapor las cuales se presentan todas alineadas de forma paralela. Estas están hospedadas por cuarzo euhedral.</p>	 <p>A micrograph showing euhedral quartz crystals with multiple trails of dark, rounded inclusions. The trails are aligned parallel to each other and are enclosed in dashed rectangular boxes. One trail is labeled 'Fias-Rich-V'. A scale bar in the bottom right corner indicates 20 μm.</p>

<p>DM-117</p>	<p>Cuarzo euهدral con fia de inclusiones ricas en líquido coexistiendo con inclusiones ricas en vapor, las cuales tienen un tamaño de entre 5-12 μm.</p>	
---------------	--	--

<p>DM-122</p>	<p>Cristales de cuarzo euهدral los cuales presentan inclusiones de tipo secundaria ricas en líquido cortando al cristal.</p>	
---------------	--	---

<p>DM-130</p>	<p>Coexistencia de inclusiones ricas en líquido con vapor, las cuales tienen un origen secundario, y se hospedan en cuarzo de textura jigsaw.</p>	 <p>A micrograph showing a quartz matrix with a jigsaw texture. Two types of inclusions are labeled: 'Rich-V' (vapor-rich) and 'Rich-L' (liquid-rich). The 'Rich-V' inclusions are small, dark, and irregularly shaped, while the 'Rich-L' inclusions are larger, more rounded, and contain a lighter, more homogeneous material. A scale bar in the bottom right corner indicates 20 μm.</p>
<p>DM-167</p>	<p>Cuarzo zonal el cual presenta inclusiones ricas en vapor de origen primario, las cuales se observan al interior de una zona de crecimiento.</p>	 <p>A micrograph showing a zonal quartz structure. A central zone is outlined with a dashed line and contains several small, dark, irregular inclusions labeled 'Rich-V'. The surrounding quartz matrix has a more uniform, crystalline appearance. A scale bar in the bottom right corner indicates 100 μm.</p>

Anexo E: Petrografía de inclusiones fluidas.

Tabla 7: Resultados del tipo de inclusión con su cristal hospedador.

	Tipo de cuarzo	Inclusión	Origen	Tipo
Muestra				
DM-29	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-30	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-31	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-32	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-33	Comb	Vapor	Primario	C
DM-34	Jigsaw	Vapor	Secundaria	D
DM-35	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-36	Jigsaw	Ausencia		
DM-37	Comb	Halita	Secundario	B
DM-38	Jigsaw	Ausencia		
DM-39	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-40	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-41	X			
DM-42	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-43	Jigsaw	Ausencia		
DM-55	X			
DM-56	Jigsaw	Ausencia		
DM-57	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-58	Comb	Líquido	Secundario	A
DM-59	Jigsaw	Halita	Secundario	B
DM-60	Euhedral	Halita	Secundario	B
DM-61	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-112	X			
DM-113	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-114	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-115	X			
DM-116	Euhedral	Coexistencia	Secundario	E

DM-117	Euhedral	Coexistencia	Secundario	E
DM-118	Jigsaw	Líquido y Vapor	Secundario	A+D
DM-119	Jigsaw	Líquido y Vapor	Secundario	A+D
DM-120	Calcita	Líquido y Vapor	Secundario	A+D
DM-121	Jigsaw	Ausencia		
DM-122	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-123	Jigsaw	Líquido y Vapor	Secundario	A+D
DM-130	Jigsaw	Ausencia		
DM-131	Calcita	Ausencia		
DM-132	Euhedral	Líquido	Secundario	A
DM-133	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-134	X			
DM-135	Euhedral	Vapor	Primario	C
DM-136	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-141	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-142	Coloforme	Líquido	Secundario	A
DM-143	Zonal/comb	Líquido	Secundario	A
DM-144	Euhedral	Ausencia		
DM-145	Jigsaw	Ausencia		
DM-146	Comb	Líquido	Secundario	A
DM-147	Jigsaw	Ausencia		
DM-148	Zonal/comb	Líquido	Secundario	A
DM-152	X			
DM-153	Comb	Líquido	Secundario	A
DM-154	Zonal	Líquido	Secundario	A
DM-155	Jigsaw	Ausencia		
DM-156	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-157	X			
DM-158	X			
DM-159	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-160	X			
DM-161	Coloforme	Líquido	Secundario	A

DM-162	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-163	Jigsaw	Vapor	Secundario	D
DM-164	Euhedral	Ausencia		
DM-165	Comb	Líquido	Secundario	A
DM-166	Euhedral	Vapor	Secundario	D
DM-167	Zonal/comb	Vapor	Primario	C
DM-175	C. bladed	Ausencia		
DM-176	C. bladed	Ausencia		
DM-177	Comb	Vapor	Secundario	D
DM-178	Jigsaw	Líquido	Secundario	A
DM-179	Euhedral	Líquido	Secundario	A

Anexo F: Boiling Confidence Factor

Tabla 8: Se muestra el calculo del factor de confianza de ebullición (FCB). V: Inclusiones vapor; TJ: TC: textura coloforme; TP: cuarzo plumoso; CH: calcita hojosa; CR: calcita rómbica; CC: cuarzo comb.

Muestra	UTM (x)	UTM (y)	Elevacion (m)	Au (ppm)	Ag (ppm)	V	TJ	TC	TP	CH	BCF	CR	CC
DM-29	316422,191	6235782,44	986,5	0,37	2	1	1	0	0	0	4	0	0
DM-30	316422,203	6235783,27	985,5	0,03	1	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-31	316422,253	6235786,89	980,7	0,04	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-32	316422,342	6235793,22	972,5	0,45	10	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-33	316422,351	6235793,86	971,7	0,20	2	1	0	0	0	0	3	0	1
DM-34	316422,371	6235795,34	969,7	2,60	8	1	1	0	0	0	4	0	1
DM-35	316422,389	6235796,6	968,1	1,10	12	0	1	0	0	0	1	1	0
DM-36	316422,389	6235796,6	968,1	1,10	12	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-37	316422,428	6235799,37	964,5	0,03	2	0	0	0	0	0	0	0	1
DM-38	316422,327	6235792,15	973,9	0,25	4	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-39	316405,841	6235775,12	972,6	0,22	2	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-40	316405,263	6235781,48	963,5	0,08	1	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-41	316405,218	6235782	962,8	0,12	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-42	316404,906	6235785,68	957,5	0,14	2	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-43	316404,816	6235786,76	956,0	0,30	2	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-55	316392,246	6235789,8	983,3	0,16	2	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-56	316391,544	6235792,72	979,9	0,03	0,5	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-57	316391,135	6235794,45	977,8	0,01	0,5	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-58	316384,023	6235826,61	940,2	0,10	0,5	0	1	0	0	0	1	0	1
DM-59	316383,712	6235828,09	938,5	0,07	0,5	0	0	0	0	1	3	0	0
DM-60	316383,479	6235829,22	937,2	0,07	1	0	0	1	1	0	4	0	0
DM-61	316382,6	6235833,43	932,3	0,44	0,5	1	1	0	0	0	4	0	0
DM-112	316424,058	6235722,01	873,5	1,70	4	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-113	316424,16	6235722,25	873,2	1,20	38	1	1	0	0	0	4	0	0
DM-114	316424,275	6235722,53	872,8	0,09	1	1	1	0	0	0	4	0	0
DM-115	316427,718	6235730,65	861,8	0,03	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-116	316426,237	6235727,19	866,5	0,02	0,5	5	1	0	0	0	6	0	0
DM-117	316384,359	6235762,82	884,3	0,50	4	5	1	0	0	0	6	0	0
DM-118	316384,543	6235764,28	882,7	0,25	0,5	1	1	0	0	0	1	1	0
DM-119	316384,826	6235766,5	880,4	0,15	0,5	1	1	0	0	1	4	1	0
DM-120	316384,87	6235766,84	880,1	0,19	0,5	1	0	0	0	0	0	1	0
DM-121	316385,115	6235768,74	878,1	0,04	0,5	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-122	316384,434	6235763,42	883,6	0,90	12	0	1	0	0	0	1	1	0
DM-123	316384,706	6235765,57	881,4	0,24	1	1	1	0	0	0	1	1	0

DM-130	316476,551	6235660,38	905,5	0,14	5	0	1	0	0	0	1	1	0
DM-131	316476,749	6235660,75	904,9	4,40	12	0	0	0	0	0	0	1	0
DM-132	316476,749	6235660,75	904,9	4,40	12	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-133	316477,145	6235661,5	903,6	0,23	9	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-134	316477,41	6235662	902,8	0,31	12	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-135	316478,17	6235663,43	900,4	0,27	2	1	1	0	0	0	1	0	0
DM-136	316478,735	6235664,48	898,7	0,08	1,8	0	1	0	0	0	1	1	0
DM-141	316437,785	6235728,69	901,9	3,20	17	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-142	316437,785	6235728,69	901,9	3,20	17	0	0	1	0	0	3	0	0
DM-143	316437,311	6235725,23	905,4	0,12	2	0	0	0	0	0	0	0	1
DM-144	316437,402	6235725,9	904,7	0,12	3	0	0	1	0	0	3	0	0
DM-145	316438,183	6235731,55	899,0	0,04	0,6	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-146	316438,369	6235732,85	897,6	0,03	0,25	0	0	0	0	0	1	0	0
DM-147	316438,578	6235734,3	896,1	0,00	0,25	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-148	316438,73	6235735,34	895,1	0,03	0,25	0	1	0	0	0	1	0	1
DM-152	316424,594	6235689,53	830,4	0,17	1	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-153	316424,581	6235690,21	829,1	0,11	2,1	0	1	0	0	0	1	0	1
DM-154	316424,567	6235690,95	827,6	0,50	1,6	0	1	0	0	0	1	0	1
DM-155	316424,562	6235691,23	827,1	0,08	1,2	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-156	316424,499	6235694,28	821,1	0,03	0,25	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-157	316424,514	6235693,61	822,4	0,04	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-158	316424,489	6235694,73	820,2	0,07	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-159	316424,478	6235695,19	819,3	0,50	0,25	1	1	0	0	0	1	0	0
DM-160	316421,971	6235804,66	594,9	0,50	7,1	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-161	316421,99	6235805,13	594,0	0,14	4,7	0	0	1	0	0	3	0	0
DM-162	316422,013	6235805,73	592,7	0,11	3,1	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-163	316422,061	6235807,12	589,9	0,48	2,1	1	1	0	0	0	1	0	0
DM-164	316422,08	6235807,73	588,7	0,11	2,6	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-165	316422,114	6235808,77	586,6	0,03	0,25	0	0	0	0	0	0	0	1
DM-166	316422,131	6235809,22	585,7	0,01	0,25	1	0	0	0	0	0	1	0
DM-167	316422,148	6235809,67	584,8	0,01	0,25	1	0	0	0	0	0	0	1
DM-175	316480,557	6235665,27	943,6	0,03	1,7	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-176	316481,053	6235666,2	942,6	0,02	0,6	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-177	316481,717	6235667,44	941,2	0,09	4,8	1	1	0	0	0	4	0	1
DM-178	316483,532	6235670,83	937,3	0,01	0,5	0	1	0	0	0	1	0	1
DM-179	316485,01	6235673,58	934,2	0,19	5	0	1	0	0	0	1	0	1