

Petrografía y estudio de inclusiones fluidas de las venillas y vetas aflorantes en Mina Guitarra, flanco oriental de la Serranía de San Lucas (Corregimiento Los Canelos, municipio Santa Rosa del Sur, Bolívar)

Jorge Luis Rueda Delgado

Trabajo de Grado para optar al Título de Geólogo

Director:

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	8
1. Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General .....	10
1.2 Objetivos Específicos .....	10
2. Localización del área de estudio .....	11
3. Metodología .....	12
3.1 Fase de Pre-Campo.....	12
3.2 Fase de Campo .....	12
3.3 Fase de Laboratorio .....	12
3.3.1 Análisis petrográfico.....	12
3.3.2 Ensayo al fuego acoplado a espectroscopia de absorción atómica (AA) .....	13
3.3.3 Difracción de Rayos X (DRX).....	14
3.3.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	14
3.3.5 Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas (IF).....	15
3.4 Análisis e interpretación de datos.....	16
3.5 Elaboración del informe final.....	16
4. Antecedentes .....	16
5. Marco geológico.....	19

5.1	Evolución geológica de la Serranía de San Lucas.....	19
5.2	Litoestratigrafía.....	21
5.3	Geología estructural.....	23
6.	Resultados.....	25
6.1	Características macroscópicas de la mina.....	26
6.1.1	Roca encajante.....	26
6.1.2	Dique monzogranítico.....	27
6.1.3	Estructuras y alteraciones hidrotermales.....	28
6.1.4	Análisis de ensayo al fuego.....	32
6.2	Análisis petrográfico.....	32
6.2.1	Roca encajante.....	33
6.2.2	Venillas de magnetita.....	34
6.2.3	Estructuras de specularita.....	35
6.2.4	Alteraciones hidrotermales.....	36
6.3	Difracción de Rayos X.....	42
6.4	Microscopía electrónica de barrido.....	43
6.5	Estudio de inclusiones fluidas.....	44
6.5.1	Petrografía.....	44
6.5.2	Microtermometría.....	51
7.	Discusión.....	54
8.	Conclusiones.....	60
9.	Recomendaciones.....	62
	Referencias Bibliográficas.....	63

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Ubicación geográfica de mina Guitarra.....	11
Figura 2 Mapa geológico del área de estudio .....	23
Figura 3 Características de las fallas observadas en la mina.....	25
Figura 4 Poligonal de mina Guitarra.....	26
Figura 5 Características macroscópicas de la roca encajante .....	27
Figura 6 Características macroscópicas del dique monzogranítico .....	28
Figura 7 Venillas de magnetita .....	30
Figura 8 Venillas y vetas de especularita .....	31
Figura 9 Microfotografías de la roca encajante .....	34
Figura 10 Microfotografías de las venillas de magnetita .....	35
Figura 11 Microfotografías de veta de especularita.....	36
Figura 12 Microfotografías de alteración potásica .....	37
Figura 13 Microfotografías de alteración argílica intermedia .....	38
Figura 14 Microfotografías de alteración cuarzo-sericita .....	40
Figura 15 Microfotografías de alteración illita-esmectita-cuarzo.....	41
Figura 16 Microfotografías de alteración supérgena .....	42
Figura 17 Inclusiones fluidas en venillas de magnetita.....	46
Figura 18 Inclusiones fluidas en venillas de magnetita.....	48
Figura 19 Inclusiones fluidas en veta de especularita.....	49
Figura 20 Inclusiones fluidas con modificaciones post-atrapamiento .....	50
Figura 21 Relaciones entre temperaturas de homogenización .....	53

Figura 22 Diagramas de estabilidad química entre magnetita y hematita.....56

Figura 23 Secuencia paragenética propuesta para mina Guitarra.....58

Figura 24 Interpretación de variables microtermométricas.....59

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Resultados de ensayos al fuego.....	32

## Resumen

**Título:** Petrografía y estudio de inclusiones fluidas de las venillas y vetas aflorantes en Mina Guitarra, flanco oriental de la Serranía de San Lucas (Corregimiento Los Canelos, municipio Santa Rosa del Sur, Bolívar) \*

**Autor:** Jorge Luis Rueda Delgado \*\*

**Palabras Clave:** Serranía de San Lucas, granítico, alteraciones hidrotermales, epigenético, pórfido, epitermal.

### Descripción:

La mineralización de metales preciosos de la Mina Guitarra, localizada en área del Municipio de Santa Rosa del Sur, Departamento de Bolívar (Colombia), se encuentra hospedada en rocas ígneas (plutónicas y subvolcánicas), de edad Jurásico Tardío-Jurásico Medio (~174 Ma), formadas en un arco magmático de margen continental activo. Las rocas ígneas plutónicas son fundamentalmente granitoides de variedad granodiorítica, y las rocas ígneas subvolcánicas son fundamentalmente diques monzograníticos. Eventos hidrotermales epigenéticos (de edad aún no determinada), percolaron el conjunto de rocas ígneas referido, generando durante su paso por éstas, diferentes productos de interacción-fluido roca, composicionalmente correlacionables con sistemas magmático-hidrotermales tipo pórfido. Los contextos paragenéticos reconocidos en estos productos de interacción fluido-roca, al igual que la tipología de inclusiones fluidas identificadas, apuntan a procesos de superposición de alteraciones hidrotermales, las cuales inician en ambientes porfiríticos, transitan a un ambiente epitermal de intermedia sulfidación, y culminan con procesos de alteración supérgena. Considerando que éste es el primer estudio realizado en ese sector del Sur de Bolívar, se sigue un estudio areal con muestreo de mayor densidad, para fines de establecer el potencial metalogénico y la edad del magmatismo causativo de las alteraciones hidrotermales referidas y su metalogenia asociada.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geólogo PhD.

### Abstract

**Title:** Petrography and fluid inclusions study of veins outcropping in Guitarra Mine, eastern side of San Lucas Mountain range (Los Canelos village, Santa Rosa del Sur municipality, department of Bolívar).

**Author:** Jorge Luis Rueda Delgado

**Key Words:** San Lucas Range, granitic, hydrothermal alterations, epigenetic, porphyry, epithermal.

### Description:

The precious metals mineralization in Guitarra Mine, located in area of the Municipality of Santa Rosa del Sur, Department of Bolívar (Colombia), is hosted in igneous rocks (plutonic and subvolcanic), of Late Jurassic-Middle Jurassic age (~174 Ma), formed in an active continental margin magmatic arc. Plutonic igneous rocks are fundamentally granitoids of granodioritic variety, and subvolcanic igneous rocks are fundamentally monzogranitic dykes. Epigenetic hydrothermal events (age not yet determined) percolated the set of igneous rocks referred to, generating during their passage through them, different rock-fluid interaction products, compositionally correlatable with porphyry-type magmatic-hydrothermal systems. The paragenetic contexts recognized in these fluid-rock interaction products, as well as the typology of fluid inclusions identified, point to superposition processes of hydrothermal alterations, which begin in porphyritic environments, transition to an epithermal environment of intermediate sulfidation, and culminate with supergenic alteration processes. Considering that this is the first study carried out in that sector of Southern Bolívar, an areal study should be followed with higher density sampling, in order to establish the metallogenic potential and the age of the magmatism causative of the hydrothermal alterations referred to and its associated metallogeny.

---

\* Degree Work

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Geology School. Advisor: Luis Carlos Mantilla Figueroa. PhD. in Geology.

## Introducción

La Serranía de San Lucas está localizada en el sector más septentrional de la Cordillera Central, al sur y noreste de los departamentos de Bolívar y Antioquia, respectivamente. Tectónicamente ha sido catalogada como un bloque alóctono desprendido del sistema de fallas Palestina, que se encuentra bajo esfuerzos transpresivos con dirección noreste (García-Delgado y Velandia, 2020). Un amplio registro de rocas ígneas plutónicas y subvolcánicas, de edad Jurásica Temprano-Jurásico Medio, formadas en un contexto de margen continental activo, afloran en ese sector del territorio, y han sido agrupadas dentro de la unidad ígnea denominada ‘Granito de Norosí’ (González et al., 2015). La presencia de alteraciones hidrotermales epigenéticas, apuntan a procesos de percolación de fluidos hipógenos, relacionados con eventos magmático-hidrotermales, con características propias de un sistema tipo pórfido (Bodnar et al., 2014; Corbett y Leach, 1997). Esto confiere a la región un valor estratégico debido a su eventual potencial en recursos minerales (SGC, 2019). Esto se ve reflejado en la ocurrencia de minería artesanal principalmente al norte de la serranía, que en comparación con el sector centro-sur, tiene mejor infraestructura vial y menor incidencia del conflicto armado. Lo cual favorece la elaboración de estudios geológicos, que en su mayoría constan de cartografía geológica superficial, basada en interpretaciones fotogeológicas con escaso control de campo.

La Mina Guitarra, objeto del presente estudio, presenta mineralizaciones de metales preciosos principalmente (Au-Ag), hospedadas en las rocas ígneas plutónicas y subvolcánicas Mesozoicas antes referidas (González et al., 2015). Las relaciones de campo observadas en el presente proyecto, apuntan a que estos eventos hidrotermales son epigenéticos (posiblemente de edad Cenozoica?), y fueron los responsables de la formación de estructuras hidrotermales tipo venas, venillas, brechas y stockworks. Así mismo, la presencia de alteraciones hidrotermales tipo

potásica, argílica intermedia y cuarzo-sericita, con presencia de sulfuros, principalmente pirita y calcopirita, sugieren que su desarrollo se dio en ambientes porfiríticos. Por otro lado, la presencia de alteraciones tipo cuarzo-illita-esmectita ( $\pm$ clorita), con presencia de pirita y calcopirita, sugieren una superposición de eventos hidrotermales asociados a ambientes epitermales de sulfidación intermedia. La presencia de óxidos, hidróxidos y arcillas distribuidos aleatoriamente en el área, apuntan a procesos de alteración supérgena, desarrollados por la percolación descendente de aguas meteóricas. La mineralización de Au-Ag en la mina Guitarra, se asocia principalmente a los ambientes epitermales. Las eventuales mineralizaciones asociadas a los procesos de interacción fluido-roca de ambiente porfirítico, aún están desestimadas en el área.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un estudio petrográfico y de inclusiones fluidas en las venillas y vetas aflorantes en mina Guitarra, flanco oriental de la Serranía de San Lucas (Corregimiento Los Canelos, municipio Santa Rosa del Sur, Bolívar), con el fin de proponer un modelo geológico (metalogénico) preliminar de la misma.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Describir macroscópica y petrográficamente las vetas y venillas, y su roca encajante, a lo largo del túnel de mina Guitarra.

Definir la secuencia paragenética de la zona estudiada, teniendo en cuenta las asociaciones minerales y relaciones texturales identificadas mediante análisis petrográficos.

Analizar las inclusiones fluidas presentes en minerales asociados a los eventos hidrotermales, con el propósito de determinar las condiciones fisicoquímicas de los paleofluidos.

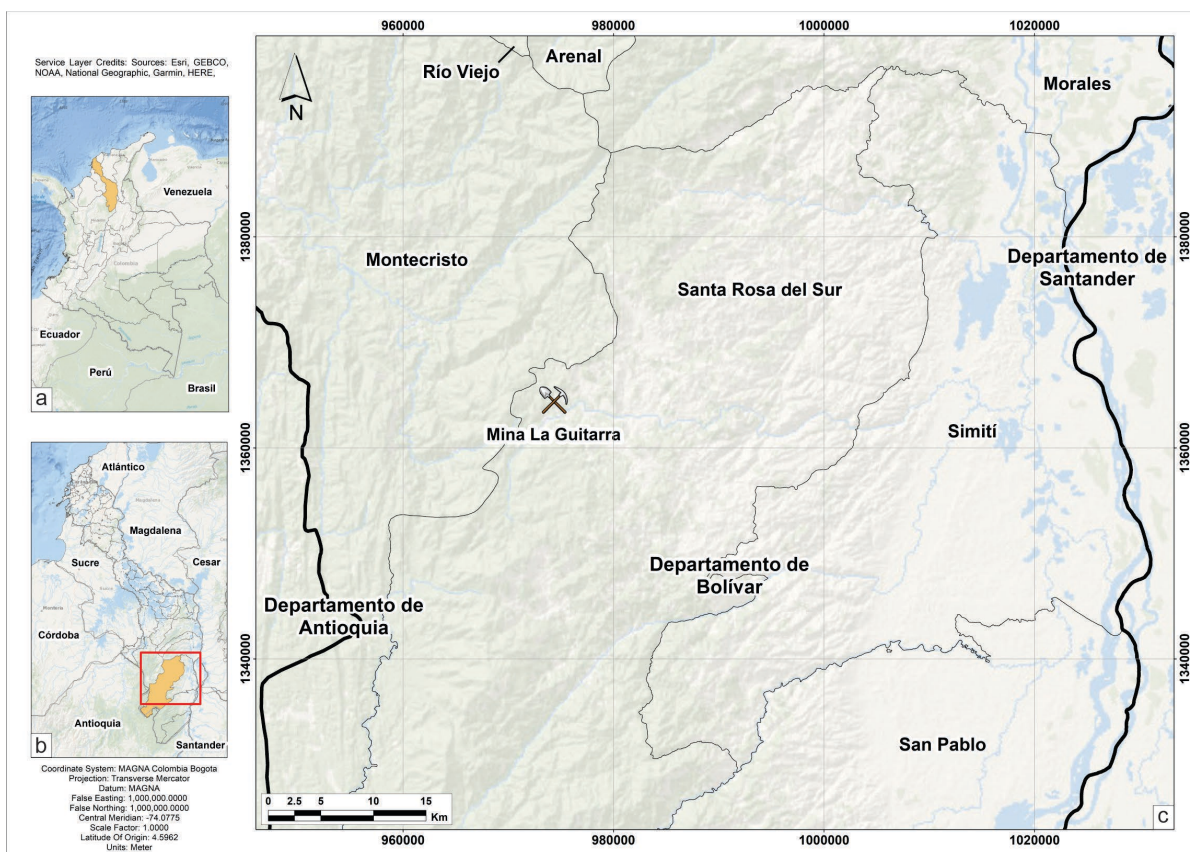
Proponer un modelo geológico (metalogénico) preliminar para el sector objeto de estudio.

## 2. Localización del área de estudio

El campamento de mina Guitarra está ubicado en la zona oeste de la jurisdicción del municipio de Santa Rosa del Sur (Dpto. Bolívar) (Figura 1), más específicamente al oeste del corregimiento Los Canelos entre las veredas Cañaveral y La Libertad. Ubicada en la Serranía de San Lucas, que compone la terminación norte de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Las coordenadas UTM de la bocamina son 1'364.619 N y 974.318 E, localizada en la hoja topográfica 84IVC (escala 1:25.000) de la base cartográfica del IGAC.

**Figura 1**

*Ubicación geográfica de mina Guitarra*



*Nota:* Localización geográfica de la mina objeto de estudio a escala (a) nacional, (b) departamental y (c) municipal.

### **3. Metodología**

El presente proyecto de investigación se desarrolló a partir de cinco fases secuenciales descritas a continuación:

#### **3.1 Fase de Pre-Campo**

Mediante bases de datos e información suministrada por la empresa operadora de la mina (Canelos Minerales S.A.S.), se realizó la recopilación bibliográfica. Por medio de la estructuración y análisis de la información encontrada, se definió el área de interés y su contexto geológico. Esto permitió la planeación de actividades a desarrollar durante las jornadas de campo.

#### **3.2 Fase de Campo**

Inició con el reconocimiento de zonas aledañas a la bocamina, para identificar unidades litológicas y manifestaciones hidrotermales en superficie. Posteriormente, se ingresó a la mina y en cada una de los niveles o guías se caracterizó la roca encajante, cuerpos vetiformes y alteraciones hidrotermales. En algunas zonas no se pudo obtener información, ya que las paredes rocosas se encontraban totalmente recubiertas por sostenimiento y/o inundadas. Con la finalidad de establecer variaciones litológicas, sistemáticamente fueron descritos afloramientos incluyendo datos estructurales, se hizo muestreo y se realizó documentación fotográfica. Así mismo, mediante el uso de brújula y decámetro se elaboró la poligonal de la mina.

#### **3.3 Fase de Laboratorio**

##### ***3.3.1 Análisis petrográfico***

Las 23 muestras recolectadas durante la fase de campo se analizaron mediante el uso de lupa de mano, para definir macroscópicamente características como el color, hábito, dureza, raya, magnetismo, texturas y estructuras, con el fin de identificar preliminarmente la mineralogía

y tipo de roca. Con base en las observaciones realizadas, se escogieron 5 muestras representativas de la roca encajante, estructuras hidrotermales y alteraciones para la elaboración de secciones delgadas, que se emplearon en los análisis de microscopía óptica, donde se describió el contenido mineralógico y texturas, según el conteo de 300 puntos.

En los análisis de microscopía óptica se usaron los equipos modelo Nikon Eclipse 50i POL (luz transmitida), Leica DM750P (luz transmitida) y Nikon Optiphot 100 (luz reflejada), los cuales se encuentran ubicados en el laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La toma de microfotografías se llevó a cabo mediante los sistemas de cámara digital DS-5M y MC120 HD, acoplados a los microscopios Nikon Eclipse 50i POL y Leica DM750P, respectivamente. Las abreviaturas minerales usadas en las microfotografías se definieron según lo propuesto por Whitney y Evans (2010). La clasificación del tamaño absoluto de los cristales empleada fue la siguiente: grueso >5 mm, medio 1-5 mm, fino 1-0.5 mm y muy fino <0.5 mm.

### ***3.3.2 Ensayo al fuego acoplado a espectroscopia de absorción atómica (AA)***

Las muestras de dos cuerpos vetiformes fueron sometidas al análisis de ensayo al fuego, con el fin de conocer la concentración de oro. Los estudios fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Servicios Químicos, Minero-Metalúrgicos y Ambientales (GIMBA)-UIS. El procedimiento seguido para la obtención de resultados fue el siguiente: fueron pulverizados aproximadamente 60 g de roca, a los cuales se le añadió plomo como colector de metales y una carga específica de fundente para el tipo de material. La muestra se calentó a 1050 °C por 2 horas hasta obtener un botón de plomo, que se copeló para reducir el plomo remanente y obtener el doré o gránulo que contenía el metal de interés. Con base en el estándar SM 3111 B, el gránulo se sometió al proceso de digestión completa en agua regia y se analizó mediante

espectroscopia de absorción atómica con llama (AA). El equipo usado para las lecturas fue el espectrofotómetro Agilent Spectraa 240 S.

### ***3.3.3 Difracción de Rayos X (DRX)***

Las mismas dos muestras de cuerpos vetiformes se analizaron en difracción de rayos X (DRX), para reconocer las principales especies minerales que componen el material de relleno. Debido a que el difractómetro analiza muestras muy finas de polvo, aproximadamente 100 g de roca se trituraron, pulverizaron y tamizaron para homogenizar y alcanzar dicho tamaño de partículas (5-10 micras). El registro de los difractogramas, se realizó en el Laboratorio de Rayos X-UIS, empelando un difractómetro con geometría Da Vinci, para muestras policristalinas referencia Bunker D8 Discover. Después de recibir los difractogramas, se interpretaron mediante el software DIFFRAC.SUITE EVA V5.2., a partir de la base de datos PDF-2 (Powder Diffraction File™) 2021 del “International Centre for Diffraction Data” (ICDD).

### ***3.3.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)***

Dos secciones de alteración y relleno hidrotermal fueron analizadas con el fin de obtener composición química de los minerales. La información de los elementos químicos se obtuvo de forma semicuantitativa con la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS). Las secciones fueron recubiertas con carbono para favorecer la conductividad y, posteriormente, analizadas bajo condiciones de alto vacío en el microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG (“Field Emission Gun”) 650, en el Laboratorio de Microscopía-UIS. La adquisición de microfotografías se realizó con la ayuda de detectores de electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE).

### 3.3.5 *Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas (IF)*

En este caso, se usaron dos secciones de relleno y alteración hidrotermal doblemente pulidas con un espesor aproximado de 60 a 100 micras. Los minerales hospedantes de las IF seleccionados, hacen parte del relleno hidrotermal de las diferentes estructuras encontradas en la mina. Como es habitual en esta técnica, los análisis fueron hechos en cristales de cuarzo, debido a su transparencia y ocurrencia común. El estudio de IF se desarrolló en dos etapas sucesivas, la petrografía y microtermometría.

En el análisis petrográfico se describió la morfología, el tamaño, los tipos de fases presentes (líquido, vapor, sólido) y las relaciones volumétricas entre estas, la cronología de las IF (primarias, secundarias y pseudosecundarias) y las posibles deformaciones o modificaciones post-atrapamiento. Para lo anterior, se empleó el microscopio Nikon Eclipse 50i POL, ubicado en el laboratorio de microscopía de la escuela de geología UIS. Incorporada al microscopio se tiene una cámara digital DS-5M, por medio del cual se realizó la toma de microfotografías.

La microtermometría midió las temperaturas a las cuales ocurrían los cambios de fases en las IF. Las mediciones se realizaron en una platina de enfriamiento-calentamiento, adaptada a un microscopio petrográfico y contaba con un rango de temperaturas entre  $-200^{\circ}\text{C}$  y  $600^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, el equipo presentaba algunos problemas técnicos y únicamente se pudo realizar calentamiento. Los cambios de fases observados fueron la homogenización de vapor a líquido y el punto de fusión en sólidos. Se usó una platina modelo Linkam THMS600, controlada mediante un sistema de regulación térmica marca Linkam TP94 y calibrada previamente con estándares de inclusiones fluidas sintéticas. Este sistema estaba acoplado a un microscopio Zeiss Axiolab, adscrito al laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) y ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

### **3.4 Análisis e interpretación de datos**

Se analizaron e interpretaron los datos obtenidos durante las etapas previas. Dichas interpretaciones permitieron caracterizar y clasificar la roca encajante, los cuerpos vetiformes y sus alteraciones, proponer una secuencia paragenética, definir la temporalidad de los eventos hidrotermales y condiciones fisicoquímicas de los paleofluidos y, por último, proponer un modelo geológico preliminar para mina Guitarra.

### **3.5 Elaboración del informe final**

Los resultados obtenidos en las fases previas, fueron plasmados en el documento final del proyecto de grado, el cual tiene como propósito realizar un aporte al conocimiento geológico de la Serranía de San Lucas.

## **4. Antecedentes**

La actividad minera en la Serranía de San Lucas data de antes de la conquista en el siglo XV, época en la que los indios Simitíes y Malibúes extraían oro de los cerros y las riberas de los ríos (Murillo, 1991). Durante los siglos XVII y XVIII, el municipio de Simití y principalmente el corregimiento de Guamocó, los dos ubicados al sur de la serranía, fueron el eje y punto de partida de la explotación minera en la región (Rey, 2008).

La mayoría de los estudios detallados sobre las mineralizaciones se concentran en la jurisdicción del municipio de San Martín de Loba y municipios aledaños, posiblemente porque esta zona presenta menos problemas de orden público relacionados con el conflicto armado, en comparación con el centro-sur de la región. De la Espriella (1960) en uno de los primeros estudios sobre ocurrencias minerales en la SSL, reportó en el municipio de San Martín de Loba manifestaciones de oro aluvial en antiguas minas y en cantidades no explotables.

Galvis y De la Espriella (1990) al noreste de la SSL, afirman que los depósitos auríferos encontrados tienen un origen primario en los sedimentos detríticos precámbricos de migmatitas y un posterior transporte y acumulación por medio de hidrotermalismo asociado a magmatismo ácido, en el Cenozoico Tardío. Estos eventos hidrotermales originaron los siguientes tipos de ocurrencias minerales: (1) en zonas de alteración cuarzo-adularia alrededor de edificios volcánicos, (2) en zonas de contacto entre pórfidos y migmatitas, (3) en contactos entre los stocks graníticos y rocas volcánicas, (4) en filones mesotermales y epitermales y (5) en aluviones.

Muñoz (1993) en un estudio realizado al noreste de la SSL entre San Martín de Loba, Río Viejo y Barranco de Loba, agrupa las mineralizaciones filonianas en dos ambientes geológicos. Al sur, las zonas enriquecidas en oro se encuentran en rocas volcánicas riolíticas a riodacíticas, en forma diseminada y bandas depositadas rítmicamente, todo esto dentro de una zona de cizallamiento tipo “stockwork” con venillas de espesores entre 10 a 90 cm, compuestas mineralógicamente por cuarzo, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, oro y sulfosales de plata. Mientras que la mineralización al norte de la zona de estudio está encajada en rocas intrusivas granodioríticas, rellenando fracturas y con espesores entre 1 a 4 m, relacionada con zonas de falla; la mineralogía para este caso se compone de pirita, sulfosales de plata y oro en estado libre o incorporado a la estructura de los sulfuros y las sulfosales. Las orientaciones de los cuerpos mineralizados son variables, como se muestra a continuación: N40°-60°W/55°-68°SW, N85°E/65°NW, N20°E/72°NW, N30°-40°E/90° y N3°E/90°. En ese trabajo, el origen de las mineralizaciones fue asignado a soluciones acuosas calientes, formadas a profundidades intermedias que se movilizaron por medio de sistemas de fracturas y que por cambios en la presión provocaron la ebullición y posterior precipitación de los minerales.

Clavijo (1995) en la memoria de la plancha 75 – Aguachica asocia la mineralización aurífera del noreste de la Serranía de San Lucas con cuerpos intrusivos granodioríticos e hipoabisales dacítico-andesíticos, así como con rocas volcánicas efusivas y piroclásticas de edad Jurásica. Además, señaló que el principal control para la depositación de los fluidos enriquecidos en metales fueron las fallas normales con componente de rumbo orientadas SW-NE. La paragénesis la definió como cuarzo, pirita y oro. Estos minerales se encuentran en forma de filones, venillas y diseminados, evidenciando características de un depósito epitermal. Así mismo, el autor asocia la provincia de San Lucas como genética y petrológicamente similar al distrito aurífero Zaragoza-Segovia-Remedios, ubicado el suroeste de esta.

MINERALCO S.A. (1997) realiza un estudio al noreste de la Serranía de San Lucas, donde indica que las zonas mineralizadas se encuentran como vetas, venilla y en enrejado, encajadas en rocas plutónicas y volcánicas. La asociación mineral se compone de cuarzo, calcita, pirita, galena, esfalerita, calcopirita, turmalina, oro nativo y electrum, y sus minerales de alteración hidrotermal son sericita, adularia, barita, epidota, clorita y menos frecuentemente montmorillonita, zeolita, cloruros, esmectita y sílice amorfa. Según lo anterior, proponen que la mineralización corresponde a un depósito epitermal de baja sulfuración tipo cuarzo-adularia-sericita.

Serrano (2006) realiza un estudio petrográfico y microtermométrico de las inclusiones fluidas encontradas en venas y filones al este y noroeste de la Serranía de San Lucas. La mineralogía del material de relleno se compone de cuarzo, calcita, barita, pirita, calcopirita, esfalerita, galena, moscovita, covelina, ilmenita y oro. Las inclusiones fluidas son de tipo primario y secundario, en su mayoría bifásicas conformadas por líquido y vapor. Dichas inclusiones son predominantemente acuoso-salina ( $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  y  $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ ) y sus

temperaturas mínimas de atrapamiento varían entre 80°C y 370°C, indicando condiciones de formación epitermal que tuvieron lugar durante procesos de exhumación, probablemente relacionados con las orogenias pre-andina y andina.

Figuroa (2019) describe las mineralizaciones en Culoalzaio y San Pedro Frio, ubicados en las jurisdicciones de los municipios de San Martín de Loba y Santa Rosa del Sur, respectivamente. La ganga es cuarzo-carbónica y la mena es de sulfuros (pirita, pirita arseniosa, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita), telururos de plata y oro (hessita, petzita), óxidos de hierro y oro con altos contenidos de plata, además, se encontró la asociación adularia-sericita. La mineralización en vetas está orientada N60°-70°E/47°-60°SE y en algunos sectores hay estructuras tipo stockwork. Se usan las esfaleritas como geotermómetro y arrojan temperaturas de formación para estos depósitos minerales entre 225°C y 240°C. El autor señala que hay una fuerte relación entre la pureza del oro y la presencia de telururos, puesto que los últimos incorporan cantidades considerables de plata en su estructura cristalina, retirándola del medio y de esta forma disminuyendo los índices de cristalización de la variedad de oro tipo electrum, el cual se compone por más de un 20% de plata y, por lo tanto, es de menor pureza. Según los análisis mineralógicos y texturales, la mineralización en los dos sectores se clasifica como epitermal de baja sulfuración.

## **5. Marco geológico**

### **5.1 Evolución geológica de la Serranía de San Lucas**

La Serranía de San Lucas cuenta con un registro geológico que se extiende desde el basamento metamórfico mesoproterozoico hasta los depósitos cuaternarios. En los principales modelos de regionalización tectonoestratigráfica del territorio colombiano esta zona ha sido incluida en diferentes unidades litotectónicas, como lo son el Terreno Payandé - San Lucas

(Etayo et al., 1983), Terreno Chibcha (Restrepo y Toussaint, 1988) y Terreno Chicamocha - Bloque San Lucas (Cediel et al., 2003). Entre el Mesoproterozoico tardío y Neoproterozoico temprano, inició la historia evolutiva de la zona, por medio del evento metamórfico de medio-alto grado que dio lugar a la formación del basamento cristalino, denominada unidad Neis de San Lucas (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2019; Clavijo et al., 2008). Esta unidad conforma un cinturón granulítico alóctono, formado por procesos de acreción sucesiva de bloques tectónicos en la Orogenia Grenville-Orinoco (1300-900 Ma), durante la fase final de ensamblaje del supercontinente Rodinia (Cediel et al., 2003; Royero y Clavijo, 2000). Durante el Ordovícico y Silúrico tuvo lugar un evento metamórfico de medio-bajo grado, relacionado con la Orogenia Quetame – Caparonensis, que dio origen a las unidades metamórficas de Pinillos (Oeste SSL) y La Virgen (Noroeste Cordillera Oriental) (Clavijo et al., 2008).

Entre el Triásico Superior y Jurásico Inferior, inició la fragmentación del supercontinente Pangea, mediante un proceso de “rifting” intercontinental. A causa de los esfuerzos generados, se produjo el Graben de San Lucas (Clavijo, 1995). El progresivo crecimiento de la cuenca permitió el desarrollo de volcanismo explosivo subaereo acompañado de sedimentación fluviolacustre (Fm. Noreán) y magmatismo metalumínico, calcoalcalino y de composición félsica a intermedia (Granito de Norosí) (Clavijo et al., 2008). Durante el Jurásico Medio se desarrolló la etapa final de vulcanismo, dando lugar a la formación de diques y silos integrados por coladas de lavas traquiandesíticas, tobas dacítico – andesíticas y cuerpos hipoabisales dioríticos. A finales del Jurásico, el graben alcanzó su máxima amplitud y profundidad, lo cual provocó un ascenso en los bloques marginales de la cuenca que correspondían a estribaciones incipientes de lo que son hoy la Serranía de San Lucas y el Macizo de Santander (Clavijo 1995; Clavijo et al., 2008). A inicios del Cretácico, finalizó la subsidencia mecánica por el fallamiento de la etapa sinrift e

inició la subsidencia termal de la postrift (Fabre, 1987; Sarmiento, 2002. Como se citó en Clavijo et al, 2008). Durante el Albiano – Cenomaniano hubo vulcanismo explosivo de composición andesítica a dacítica, que formó domos de depósitos piroclásticos, flujos lávicos y enjambres de diques correspondientes a la Unidad Extrusiva de las Brisas (Mantilla et al., 2006).

En el Paleoceno, inició la Orogenia Andina, que generó una inversión tectónica de la cuenca extensional, por medio de la transformación de fallas normales en inversas, y permitió el levantamiento de la SSL (Restrepo y Toussaint, 1988). Desde el Cuaternario hasta la actualidad, se han formado depósitos sedimentarios producto de la intensa erosión en las zonas levantadas. La disposición de estos depende de la topografía del terreno y los patrones hidrográficos (Consortio GSG, 2015).

## 5.2 Litoestratigrafía

En el sector de Mina Guitarra y sus zonas aledañas aflora el Granito de Norosí (Figura 2). Hacia el este, se encuentran rocas del Complejo Volcánico de Noreán, específicamente los miembros correspondientes al conjunto hipoabisal andesítico y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas. El basamento de dichas unidades es el Neis de San Lucas. El registro geológico más reciente corresponde a depósitos fluviales de canal cuaternarios, sedimentados por la acción de la Quebrada Inanea. Según el Consortio GSG (2015), las estructuras vetiformes presentes en la SSL están hospedadas en las rocas del Granito de Norosí, el Complejo Volcánico de Noreán y, en menor medida, el Neis de San Lucas. Concordante con lo anterior, las venas hidrotermales estudiadas en el presente proyecto se encuentran albergadas en el Granito de Norosí.

La unidad **Neis de San Lucas** fue descrita inicialmente por Feininger et al. (1972). Mantilla et al. (2006) la describen como neises con buen bandeamiento, cuarzo-feldespáticos, hornbléndicos, biotíticos, en ocasiones con textura augen, con anfibolitas, cuarcitas, metagabros

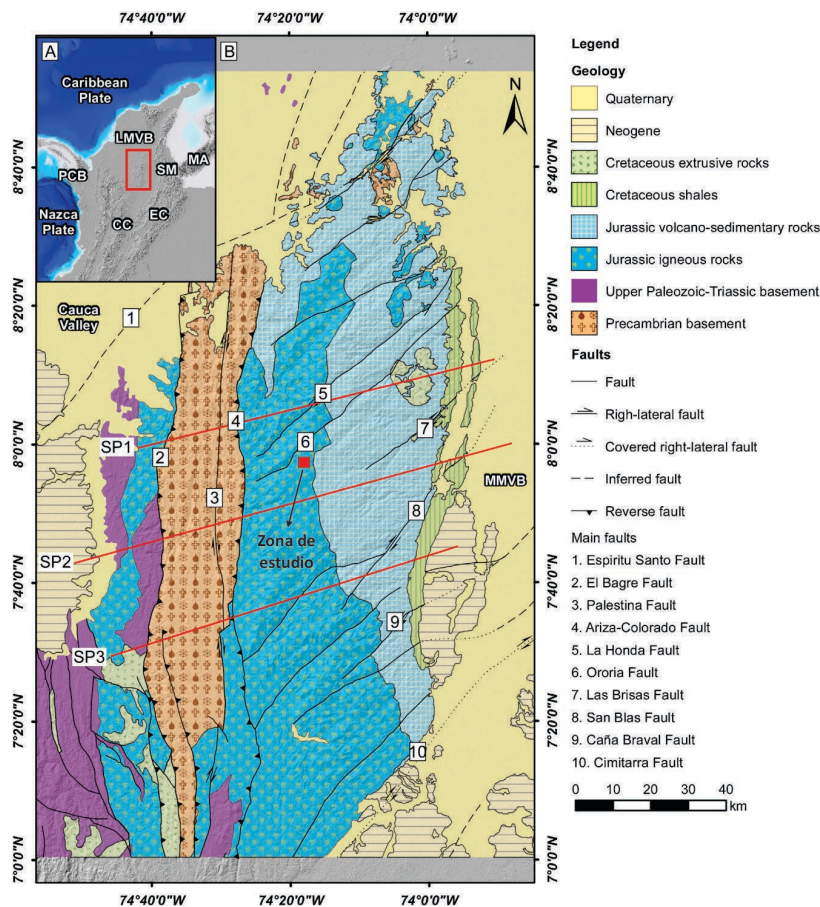
y granulitas que afloran localmente en bandas o lentes. Estas rocas afloran en franjas al oeste de la serranía y en forma de ventanas pequeñas en las estribaciones nororientales de la misma (Royero y Clavijo, 2000). El protolito de esta unidad compuesto por asociación bimodal de monzogranitos y monzogabros, sufrió metamórfico principal de facies granulita y posteriormente metamorfismo retrogrado de facies anfibolita (Cuadros et al., 2014). Según dataciones U-Pb, las edades de cristalización para el protolito ígneo varían entre 1300 – 1685 y para el evento metamórfico de alto grado se encuentran entre 910 – 1170 Ma (Consorcio GSG, 2015).

El **Complejo Volcánico de Noreán** fue caracterizado inicialmente por Kassem y Arango (1977). El Consorcio GSG (2015) la clasificó como unidad litodémica de edad Jurásico Inferior (dataciones U-Pb:  $187\pm 0.96$ ,  $189\pm 3$ ), bajo el nombre de Complejo Volcánico de Noreán, debido a que no cumple las leyes de superposición y no es posible determinar techo ni base. Clavijo (1995) planteó dividirla en cuatro conjuntos según su litología, composición y estilo de emplazamiento: (1) Piroclastitas, epiclastitas y tobas, (2) Brechas volcánicas andesíticas, (3) rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas y (4) conjunto hipoabisal andesítico.

El Consorcio GSG (2015) definió la unidad **Granito de Norosí**, con base en su composición de facies graníticas y el nombre geográfico que le asignaron con anterioridad otros autores. En dicho estudio lo describen como rocas grises a verde claro, faneríticas de grano fino a medio, equigranulares, constituidas mineralógicamente por cuarzo, plagioclasa, feldespato, hornblenda, biotita y clinopiroxeno, las cuales varían composicionalmente entre monzogranitos, tonalitas, granodioritas, sienogranitos y monzodioritas. Según dataciones U-Pb las edades de cristalización varían entre 193 Ma y 189 Ma, correspondientes al Jurásico Inferior. Los análisis geoquímicos indican que es un granito tipo I, metalumínico a peralumínico y con tendencia calcoalcalina asociada a un ambiente de formación de arco magmático en margen continental.

Figura 2

Mapa geológico del área de estudio



Nota: Ubicación de Mina Guitarra en un contexto geológico y estructural regional. Tomado de García-Delgado y Velandia, 2020.

Los **Depósitos Fluviales de Canal** cuaternarios, corresponden a sedimentos no consolidados en las zonas de influencia de los cauces hídricos, compuestos por gravas, arenas y limos (Consortio GSG, 2015). En la zona de estudio, son depositados principalmente por la acción de la Quebrada Inanea y, además, representan un interés económico, ya que pueden contener cantidades considerables de oro aluvial producto de acumulación secundaria.

### 5.3 Geología estructural

La Serranía de San Lucas es un bloque tectonoestratigráfico aislado, ubicado en la terminación norte de la Cordillera Central y limitado al norte por la Falla Espíritu Santo, al sur

por la Falla Cimitarra, al oeste por las fallas Palestina – El Bagre y al este por la falla inferida Morales (Figura 2). El régimen de esfuerzos tectónicos en esta región es de tipo transpresivo y genera un desplazamiento en dirección noreste, producto de las diferentes velocidades cinemáticas entre las fallas de rumbo dextral Espíritu Santo y Cimitarra. Esto da lugar a la formación de un sistema de cizalla simple (Clavijo et al., 2008; Consorcio GSG, 2015).

La zona de estudio del presente proyecto está influenciada estructuralmente por la acción de las fallas de rumbo dextral Ororia y Jogajoga (Figura 2). La Falla Ororia tiene inclinación hacia el sureste y una orientación N40°E, y genera control estructural sobre la Quebrada Ororia por una distancia de 53 km (Consorcio GSG, 2015; Clavijo, 1995). La Falla Jogajoga está orientada en dirección N60°E a lo largo de 35 km, en los cuales controla el cauce de la Quebrada Platanal y forma amplios valles sobre la Quebrada Inanea (Consorcio GSG, 2015).

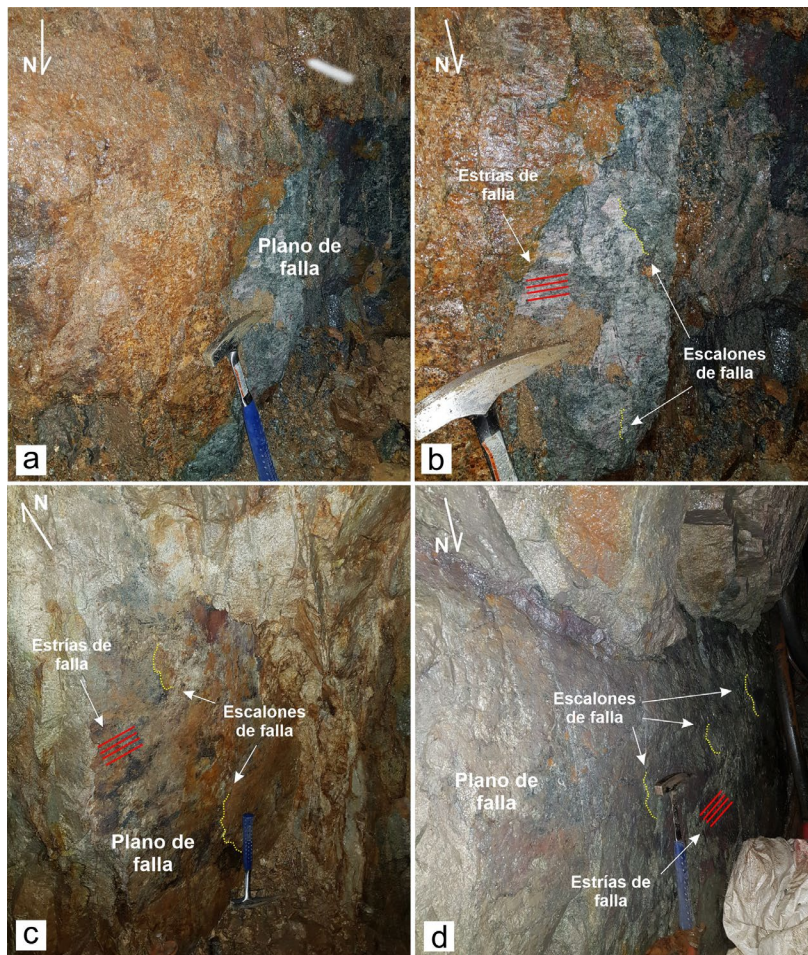
El estilo estructural predominante de los cuerpos vetiformes en la región es definido por el sistema de fallas Palestina – El Bagre y la Falla Espíritu Santo, ya que dichos cuerpos se encuentran orientados en dirección NE y buzando hacia el SE, como es el caso de la veta-falla explotada en el sector de Mina Walter al sur de la SSL. En menor medida, se han reportado filones orientados NW-SE, los cuales pueden estar asociados a fallas satélite locales (Figuroa, 2019) y las intersecciones de estos con las estructuras NE-SW representan zonas de alto interés económico, debido a su potencial para formar “ore-shoots”.

Con respecto a la mina objeto de estudio, se encontraron zonas de falla, donde los espacios de acomodación producidos por las mismas, permitieron el emplazamiento de estructuras vetiformes. A 70 m de profundidad en la guía con dirección oeste (Figura 4), se encontró una falla con azimut de rumbo 237/74, que según las estrías (pitch = 27°) y escalones de falla, tiene cinemática inversa dextral (Figuras 3a y b). A 90 m de profundidad en la guía con

dirección noroeste, se observaron dos fallas con azimut de rumbo 90/76 y 180/62, las cuales están ubicadas a 23 m (Figura 3c) y 43 m (Figura 3d) del inclinado principal, respectivamente. Con base en los indicadores cinemáticos (pitch = 29°), ambas tienen cinemática normal dextral.

**Figura 3**

*Características de las fallas observadas en la mina*



*Nota:* (a) y (b) falla con cinemática inversa dextral ubicada a 70 m de profundidad en la guía con dirección oeste. (c) y (d) fallas con cinemática normal dextral ubicadas a 90 m de profundidad en la guía con dirección noroeste.

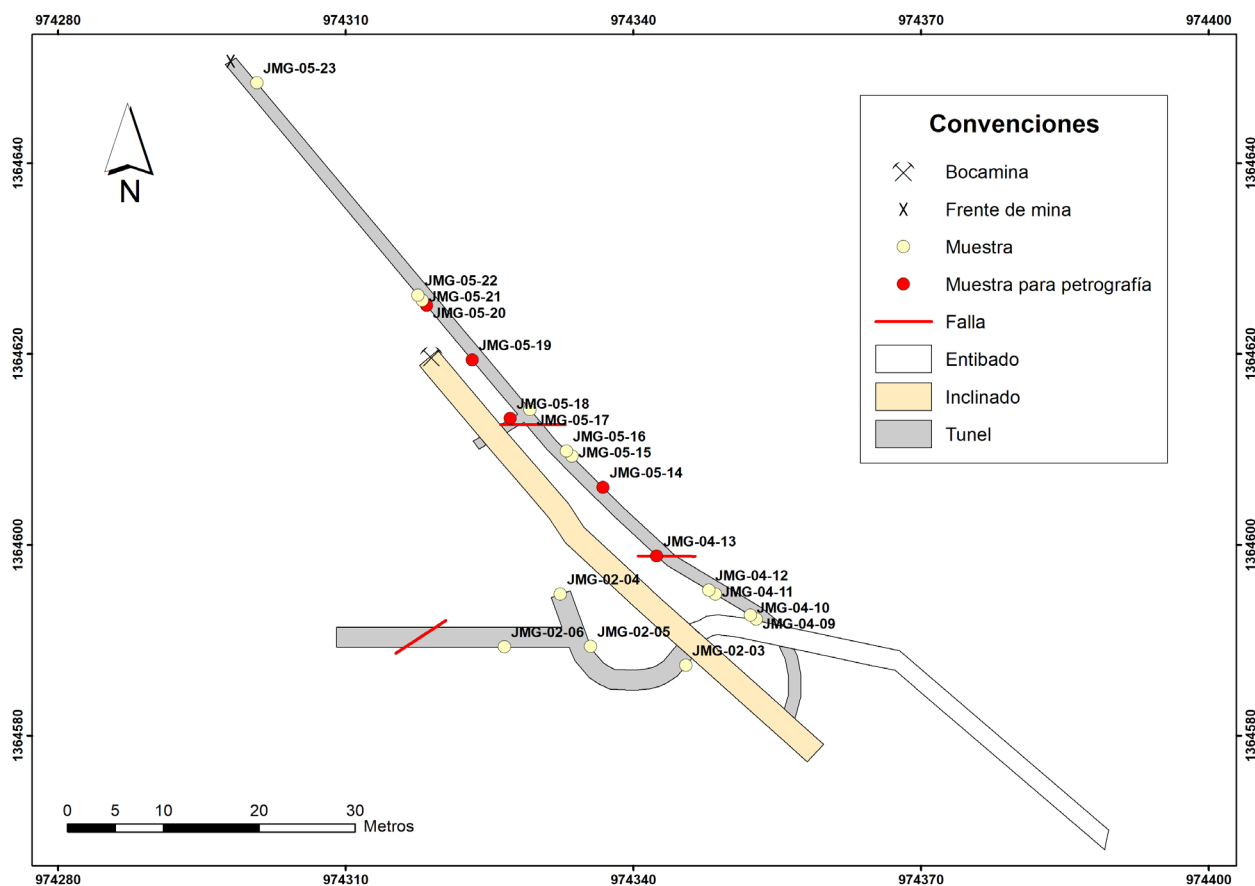
## 6. Resultados

Durante las jornadas de campo se recolectaron 23 muestras, de las cuales cuatro fueron tomadas en los alrededores de mina Guitarra y las 19 muestras restantes en el interior de esta. Se

definieron puntos de control por medio de la medición de azimuts y distancias, con la finalidad de elaborar la poligonal de la mina objeto de estudio (Figura 4).

**Figura 4**

*Poligonal de mina Guitarra*



*Nota:* La bocamina tiene coordenadas 1°364.619 N, 974.318 E y 1157 msnm.

### 6.1 Características macroscópicas de la mina

En el Anexo A se adjuntan las descripciones detalladas para cada litología.

#### 6.1.1 Roca encajante

Según la Plancha 84 – Los Canelos del SGC, corresponde a la unidad Granito de Norosí.

En las zonas aledañas a la bocamina se encuentran cuerpos saprolíticos, los cuales representan la expresión más superficial de esta unidad. Estos tienen un estado de alteración avanzado y

preservan la textura original de la roca. Es común hallar venillas y venas cortando en diferentes direcciones el saprolito. La roca tiene color gris moteado, es equigranular con tamaños finos a medios y contiene enclaves máficos subredondeados, equigranulares finos a muy finos con aureolas félsicas de reacción, que indican indicios de mezcla de magmas (Figura 5).

### 6.1.2 Dique monzogranítico

A 90 m de profundidad en la guía con dirección noroeste, la roca caja es intruida por un dique monzogranítico con textura holocristalina, fanerítica, equigranular y tamaños de cristales fino. Tiene espesor de 1,2 m y orientación NE-SW. Se encuentran venillas de cuarzo-especularita cortándolo, indicando temporalidad relativa (Figura 6).

**Figura 5**

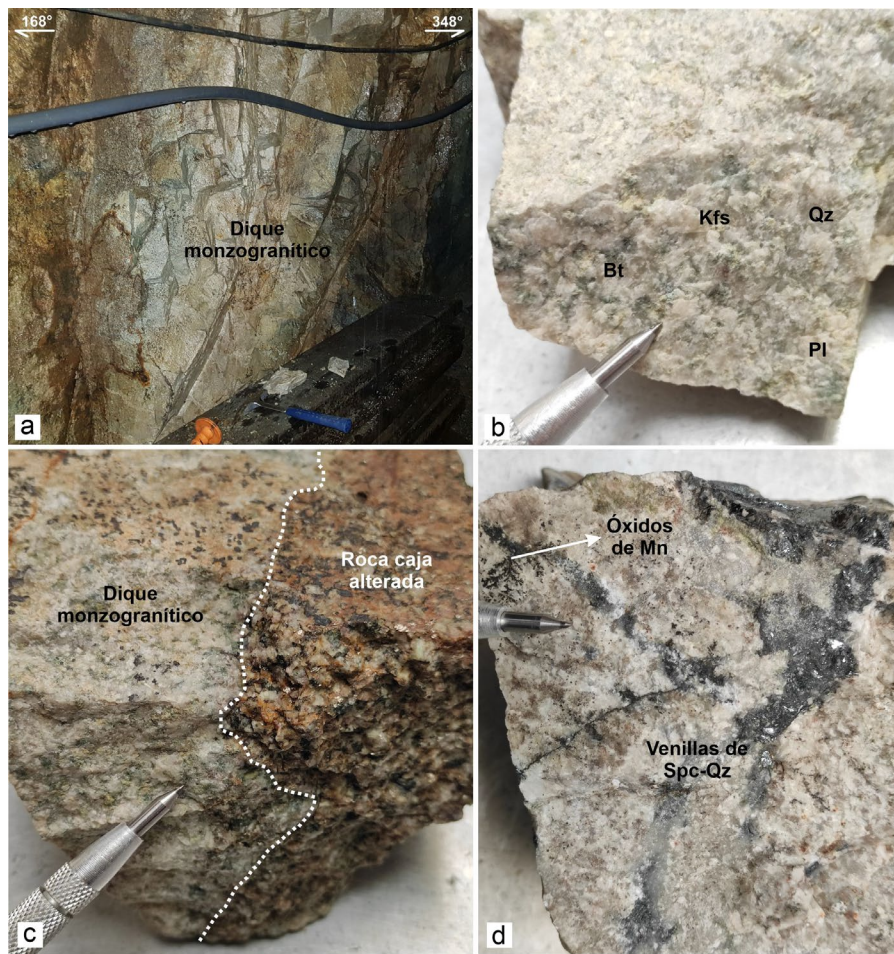
*Características macroscópicas de la roca encajante*



*Nota:* (a) afloramiento y (b) muestra de mano con pirita y calcopirita diseminadas. (c) sericita y clorita, producto de alteración. (d) enclave microgranular. Abreviaturas: Pl = Plagioclasa, Qz = Cuarzo, Kfs = Feldespato Potásico, Bt = Biotita, Hbl = Hornblenda, Py = Pirita, Ccp = Calcopirita, Chl = Clorita, Ser = Sericita.

**Figura 6**

*Características macroscópicas del dique monzogranítico*



*Nota:* (a) afloramiento y (b) muestra de mano, incluyendo la clorita y sericita producto de alteración. (c) zona de contacto entre el dique y la roca caja. (d) venillas de cuarzo-especularita cortando el dique y óxidos de manganeso asociados a estas. Abreviaturas: Pl = Plagioclasa, Qz = Cuarzo, Bt = Biotita, Chl = Clorita, Ser = Sericita, Spc = Especularita.

### 6.1.3 Estructuras y alteraciones hidrotermales

Los espesores de estas permiten clasificarlas en venillas (menor a 1 cm), venas (1-10 cm) y vetas (mayor a 10 cm). Están orientadas este-oeste con buzamiento subvertical. Considerando las concentraciones modales de los minerales, se identifican dos dominios, correspondientes a

magnetita y hematita especular. Estos tienen asociadas alteraciones hidrotermales, que afectan la roca caja selectiva y pervasivamente. Están emplazadas en zonas de falla, por lo que se puede observar un grado elevado de deformación dinámica y alteraciones supérgenas sobreimpuestas por percolación de aguas meteóricas. Indicando el trazo de las estructuras, en superficie se hallan “riegos” o fragmentos de minerales.

- *Estructuras de magnetita*

Se encuentran a 90 m de profundidad en el sector más noroeste de la mina, en un tramo de 20 m. Principalmente afloran en forma de venillas subparalelas y anastomosadas, que producen textura brechada. Están compuestas por agregados de magnetita masiva, cuarzo, especularita y, en menor proporción, pirita y calcopirita. Asociados a estas venillas se observan halos de alteración de hasta 15 cm color salmón de alteración potásica (Figura 7). A su vez, sobreimpuestos a esta alteración aparecen parches verdosos correspondientes a alteración argílica intermedia.

**Figura 7**
*Venillas de magnetita*


*Nota:* (a) y (b) afloramientos y muestras de mano (c) y (d) de venillas magnetita-cuarzo con sulfuros finos (pirita, calcopirita) y textura anastomosada. Se evidencian los halos de alteración potásica con zonas verdosas correspondientes a alteración argílica intermedia sobreimpuesta. Abreviaturas: Py = Pirita, Ccp = Calcopirita.

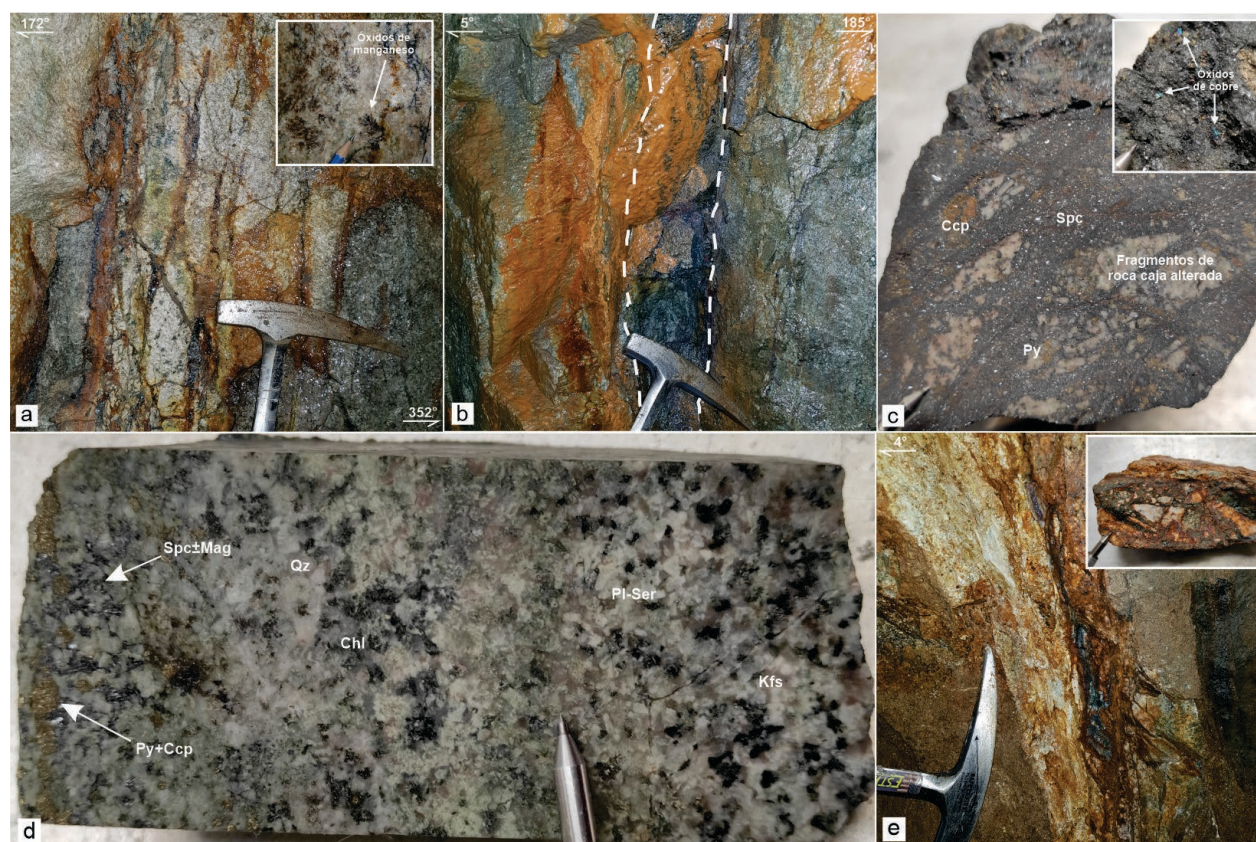
- *Estructuras de especlarita*

Predominan a lo largo de toda la mina en forma venillas y vetas. Están conformadas por especlarita, cuarzo, pirita, calcopirita ( $\pm$ magnetita) y fragmentos de roca caja alterada incorporados por su textura brechoide (Figura 8). Es común encontrar óxidos de Mn surgiendo de las venillas, con habito dendriforme característico. Asociados a las estructuras se observan halos centimétricos a métricos con coloraciones verdosas y blancuzcas, producidos por alteración

argílica intermedia y cuarzo-sericita. Los minerales máficos y feldespatos son reemplazados por clorita, sericita y cantidades subordinadas de carbonatos. Debido a percolación descendente de aguas meteóricas, principalmente en zonas de falla y diaclasamiento con porosidad secundaria, alteraciones supérgenas de oxidación y argilización se superponen a las alteraciones mencionadas con anterioridad, formando óxidos e hidróxidos de Fe, Cu y Mn, y arcillas.

**Figura 8**

*Venillas y vetas de specularita*



*Nota:* venillas de cuarzo-especularita con halos de alteración cuarzo-sericítica (a) y argílica intermedia (b). (c) muestra de mano de veta de cuarzo-especularita con sulfuros, y textura brechoide incorporando fragmento de roca caja. (d) contacto entre veta y roca caja alterada. (e) desarrollo de alteraciones supérgenas. Abreviaturas: Spc = Especularita, Mag = Magnetita, Qz = Cuarzo, Pl = Plagioclasa, Kfs = Feldespato potásico, Chl = Clorita, Ser = Sericita, Py = Piritita, Ccp = Calcopirita.

#### 6.1.4 *Análisis de ensayo al fuego*

El método de muestreo empleado fue “chip sample”, el cual consiste en extraer fragmentos de roca de forma lineal en dirección perpendicular al rumbo de la estructura, utilizando maceta y cincel, hasta coleccionar aproximadamente 2 Kg de muestra en una bolsa plástica transparente. Se muestrearon dos afloramientos correspondientes a venillas de magnetita-cuarzo y veta de especularita-cuarzo, con el fin de obtener la concentración de oro en dichas estructuras. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1. Para el tipo de explotación artesanal empleada en la mina, con extracción de bajo tonelaje (aproximadamente 15 toneladas diarias), las concentraciones de oro obtenidas no representan potencial económico para la operación. A lo anterior se le suma que estas estructuras tienen espesores máximos de 60 cm y normalmente se pinchan o reducen su espesor al seguir el rumbo de estas. Al realizar las jornadas de campo, solo había un nivel o guía con frente activo, el cual se estaba avanzando en estéril con la finalidad de interceptar estructuras con un mejor potencial económico.

Tabla 1.

*Resultados de ensayos al fuego*

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Concentración de oro (g/t)</b>
Venillas de magnetita-cuarzo	0.5
Veta de especularita-cuarzo	1.6

#### 6.2 **Análisis petrográfico**

Por medio de microscopía óptica de luz transmitida y reflejada, se analizaron 5 secciones delgadas pulidas de roca encajante y estructuras hidrotermales con sus alteraciones asociadas. En la Figura 4 se observa la ubicación dentro de la mina de dichas muestras. En el Anexo A se adjuntan las descripciones detalladas para cada litología.

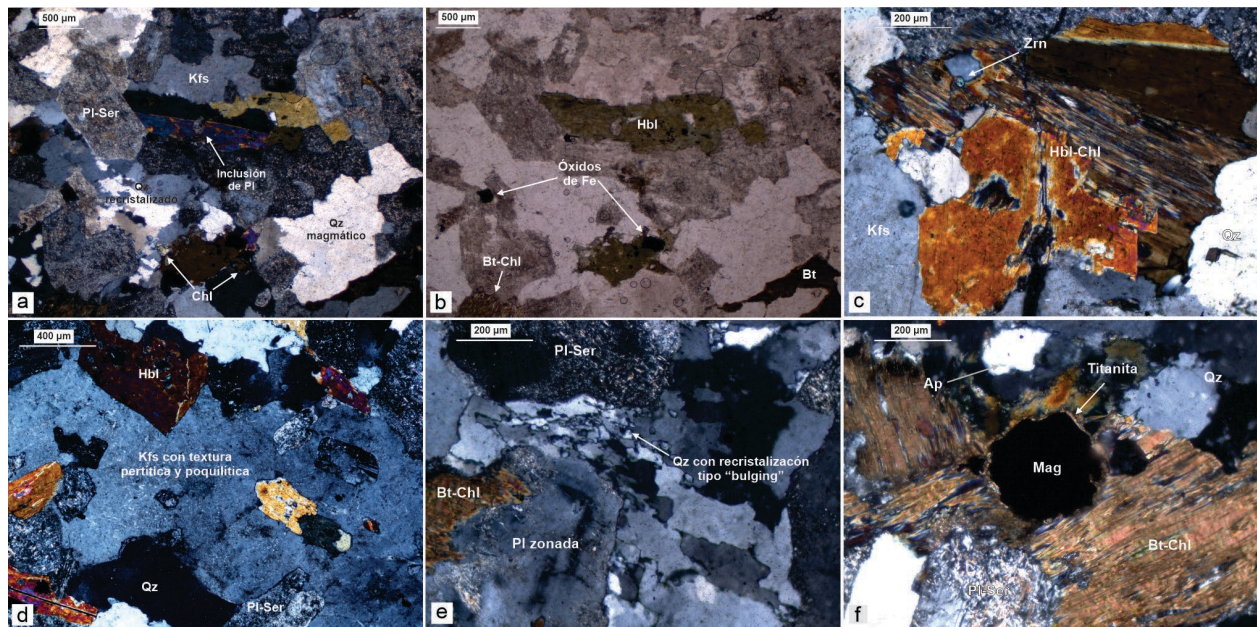
### 6.2.1 Roca encajante

En sección delgada se observa textura equigranular, mineralógicamente compuesta por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda, biotita y en menor medida magnetita con coronas titaníferas, apatito y zircón (Figura 9). Las descripciones detalladas para cada mineral se adjuntan en el Anexo A. Con base en el conteo sistemático de 300 puntos, se clasificó por medio del diagrama de Streckeisen (QAPF) para rocas ígneas plutónicas. Los contenidos modales mineralógicos obtenidos fueron plagioclasa (37%), cuarzo (23%) y feldespato potásico (18%), indicando que la roca pertenece al campo 4 del diagrama ternario, por lo que es de composición *granodiorítica* (ver Anexo A).

Está alterada de forma selectiva y hacia el contacto con las estructuras hidrotermales incrementa el grado de alteración. Los feldespatos presentan alto grado de sericitización, en el caso de la plagioclasa puede encontrarse saussuritizada. La saussuritización es común en rocas cloritizadas, lo cual provee el  $K^+$  y  $Fe^{2+}$  necesario para dicha reacción (Morad et al., 2010). Hay cuarzo masivo y recristalizado con abultamientos (“bulging”) de cristales muy finos hacia los bordes, desarrollando textura de mosaico incipiente con diferentes dominios de extinción ondulante. La biotita y hornblenda tienen grados variables de cloritización, que a su vez tiene como minerales subproducto titanita, óxidos de hierro y epidota-clinozoisita. Alrededor de la zona alterada, es común la presencia de pirita y, puntualmente, calcopirita.

**Figura 9**

*Microfotografías de la roca encajante*



*Nota:* (a,b,c) hornblenda con textura poiquilítica y cloritización, cuarzo magmático y recristalizado, biotita intersticial y óxidos de Fe producto de alteración de máficos; (d, e) feldespato potásico con textura poiquilítica y plagioclasa zonada composicionalmente; (f) magnetita con corona de titanita. Abreviaturas: Qz = Cuarzo, Pl = Plagioclasa, Kfs = Feldespato potásico, Chl = Clorita, Ser = Sericita, Bt = Biotita, Hbl = Hornblenda.

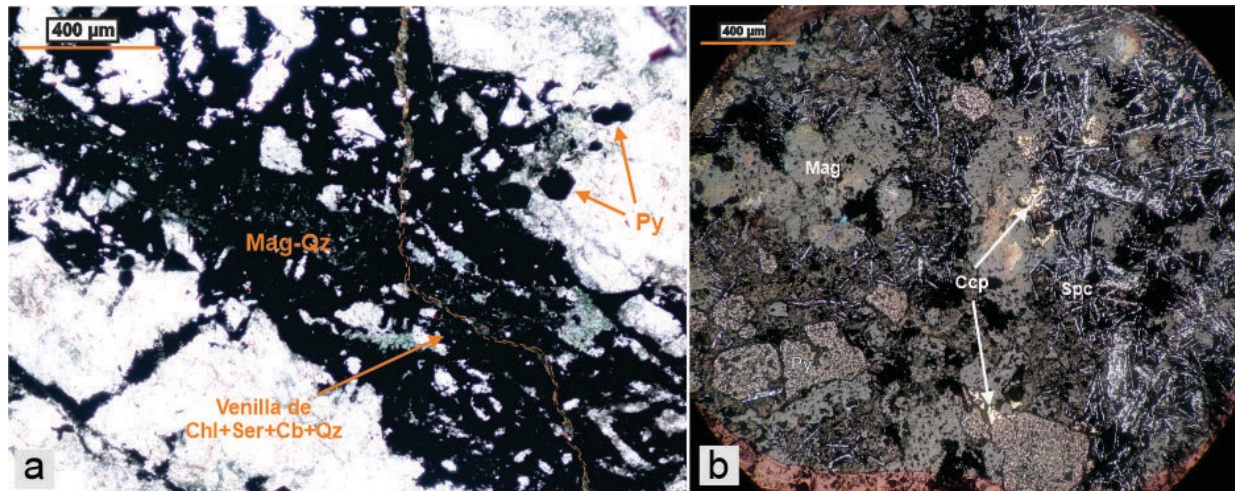
### 6.2.2 Venillas de magnetita

Así como se evidencia en muestra de mano, se observa textura brechoide, incluyendo fragmentos subangulares con tamaños variables de roca caja alterada. Las venillas están interconectadas entre sí, con bordes irregulares de baja integridad. La magnetita forma agregados de cristales anhedrales con leve fracturamiento, acompañada por agregados de cuarzo masivo. Dentro y alrededor de las venillas se encuentran cristales de pirita y calcopirita (Figura 10). Debido a la elevada dureza, la pirita exhibe relieve diferencial, por lo que sobresale con respecto a los minerales más blandos. La calcopirita es intersticial y comúnmente está incluida en la magnetita. Especularita de tamaño medio a grueso, con patrones flujo rodea cristales de magnetita, debido a procesos de sobreimposición por eventos hidrotermales posteriores. Cristales

finos de especularita dispuestos aleatoriamente están relacionados con procesos supérgenos de oxidación.

**Figura 10**

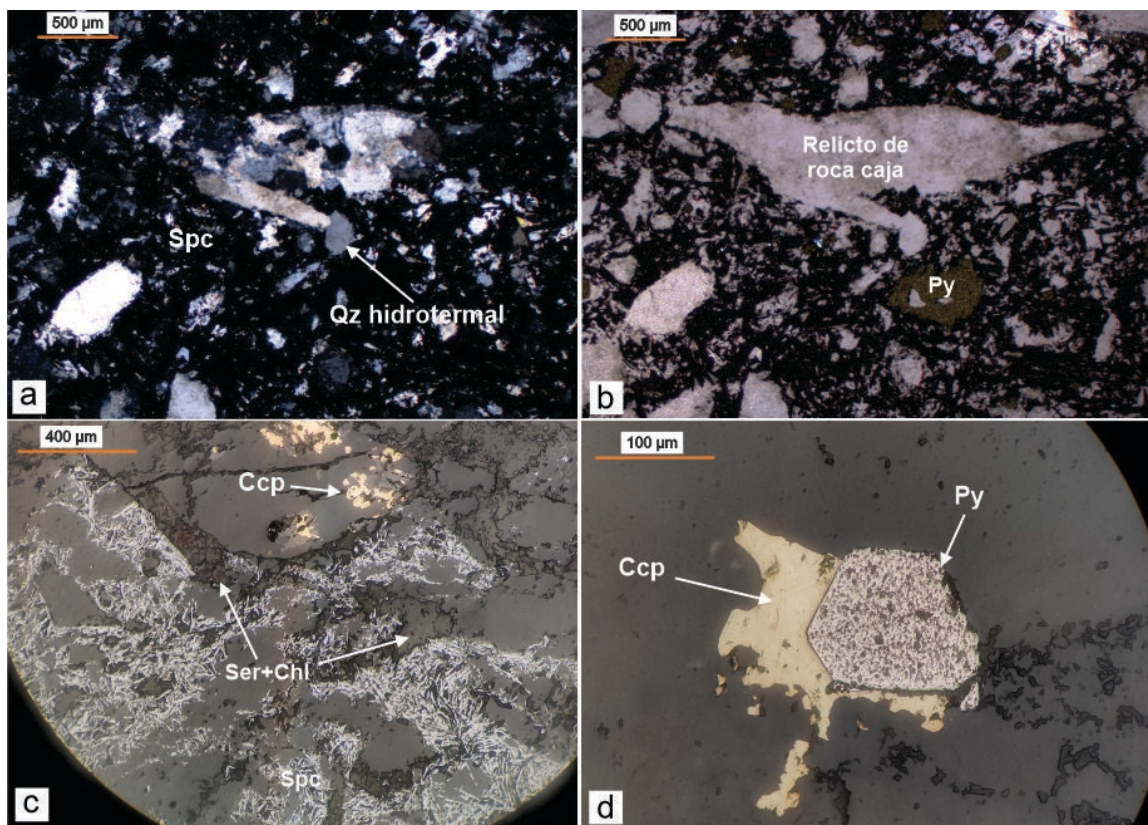
*Microfotografías de las venillas de magnetita*



*Nota:* (a) venillas de magnetita-cuarzo con pirita fina, cortadas por venilla de Chl-Ser-Qz-Cb. (b) microfotografía en luz reflejada de venilla magnetita-cuarzo. Abreviaturas: Qz = Cuarzo, Chl = Clorita, Ser = Sericita, Cb = Carbonatos, Mag = Magnetita, Spc = Especularita, Py = Pirita, Ccp = Calcopirita.

### 6.2.3 Estructuras de especularita

También tienen textura brechoide y están conformadas por especularita de tamaño medio a grueso orientada formando patrones de flujo, cuarzo masivo en agregados con microinclusiones de rutilo, cuarzo idiomórfico con habito hexagonal por espacios de apertura disponibles durante la cristalización, y mayor concentración de pirita y calcopirita, en comparación con las venillas de magnetita (Figura 11). Debido al área reducida que abarcan las secciones delgadas no se observa magnetita, pero se infiere su presencia en pequeñas cantidades por las características ferromagnéticas que tienen algunos sectores puntuales de la roca.

**Figura 11***Microfotografías de veta de especularita*

*Nota:* (a, b) agregados de especularita con patrones de flujo y textura brechoide. (c y d) microfotografías de luz reflejada, agregados de especularita con pirita y calcopirita asociadas. Abreviaturas: Spc = Especularita, Ccp = Calcopirita, Py = Pirita, Qz = Cuarzo.

#### **6.2.4 Alteraciones hidrotermales**

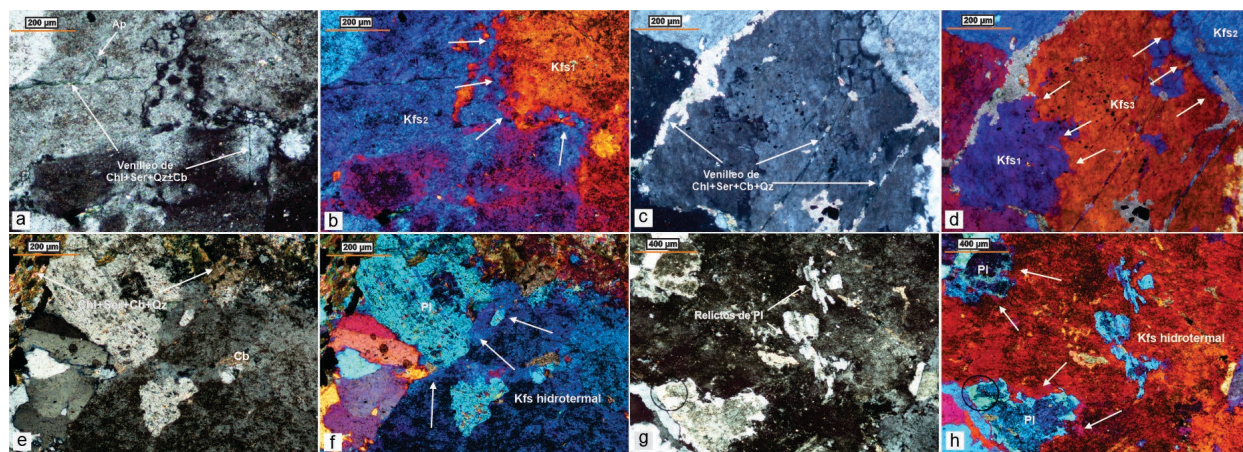
##### **- Alteración potásica**

Asociada a las venillas de magnetita, selectivamente produce sobrecrecimientos sobre los feldespatos magmáticos, que fueron identificados y caracterizados según lo propuesto por Rong y Wang (2016), por medio de la inserción de la cuña de cuarzo en NX, permitiendo observar las orientaciones cristalográficas. El feldespato potásico metasomático nuclea de forma epitaxial sobre uno magmático y, por lo tanto, las orientaciones de estos dos coinciden, pero debido al tamaño de los cristales puede que no se observen simultáneamente en la sección. El

reemplazamiento ocurre desde los bordes hacia el interior del cristal, dejando a su paso relictos del mismo y límites tortuosos con aspecto “mordisqueado”. Las plagioclasas son reemplazadas por redes cristalinas no paralelas (no epitaxial) entre los cristales, ya que si los límites de dichas redes son paralelos o epitaxiales eliminan la porosidad y con esto se evita el ingreso de fluidos que propician los procesos metasomáticos. Son reemplazadas a través de los bordes, planos de exfoliación y en forma de parches, dando una apariencia de tablero de ajedrez. Remanentes de estas se encuentran hacia los bordes y como inclusiones subredondeadas hasta de 0.3 mm (Figura 12).

**Figura 12**

*Microfotografías de alteración potásica*



*Nota:* según las diferentes orientaciones cristalográficas, se observa: (a y c) NX y (b y d) NX con cuña de cuarzo, feldespato potásico hidrotermal (Kfs<sub>2</sub>, Kfs<sub>3</sub>) reemplazando feldespato potásico magmático (Kfs<sub>1</sub>, Kfs<sub>2</sub>). (e y g) NX y (f y h) NX con cuña de cuarzo, feldespato potásico reemplazando plagioclasa. Se encuentran relictos del mineral reemplazado hacia los bordes o interior del mineral reemplazante.

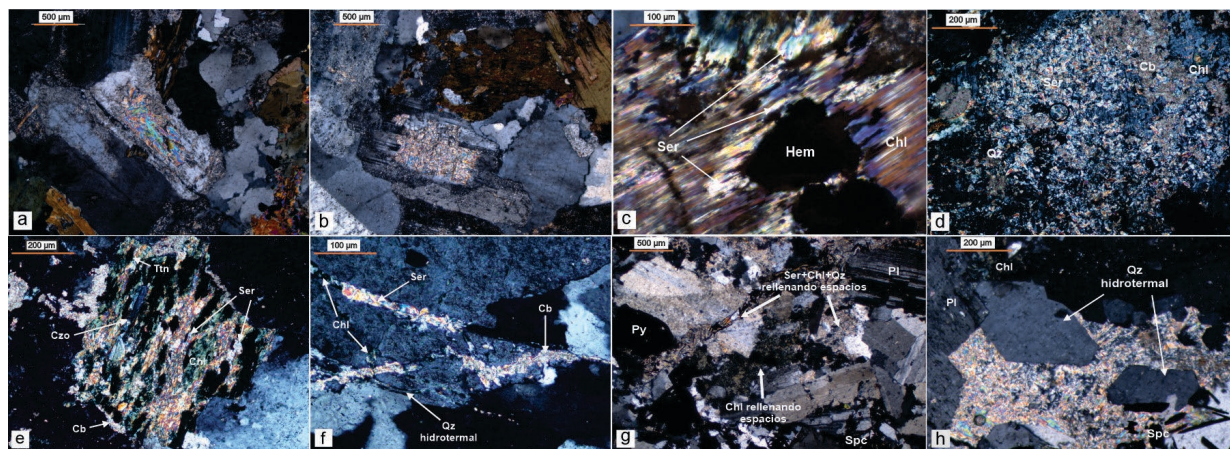
**- Alteración argílica intermedia**

Asociada a las estructuras de especularita, afecta de forma selectiva y selectivamente pervasiva los minerales máficos y feldespatos, formando sericita, clorita, cuarzo y carbonato. Es común encontrar la asociación mineralógica mencionada en forma de parches rellenando

espacios y venillas discontinuas (Figura 13). Las venillas en algunos sectores tienen aperturas o “jogs” acompañados por zonas de cizalla por la alta densidad de estas. La sericitización afecta con mayor intensidad a la plagioclasas que los feldespatos potásicos. Los cristales de sericita tienen tamaños medios a gruesos. Las plagioclasas son reemplazadas en menor medida por epidota-clinozoisita y carbonatos, debido a su componente cálcico. La cloritización de las biotitas y hornblendas se desarrolla de forma parcial o total a través de los planos de exfoliación y bordes de los cristales. Como subproducto de esta alteración a lo largo de los planos de clivaje y en forma de agregados anhedrales que habitualmente son alargados, se encuentra titanita, hematita y la serie continua epidota-clinozoisita, esta última se asocia con la disponibilidad de hierro en el mineral precursor y se diferencia a partir del pleocroísmo y colores de interferencia. La clorita tiene colores de interferencia anómalos azul berlín y se encuentra interestratificada con sericita en minerales alterados y venillas. Biotitas intensamente cloritizadas comúnmente desarrollan rutilo recrystalizado en forma de agregados aciculares, correspondiente a la textura sagenítica.

**Figura 13**

*Microfotografías de alteración argílica intermedia*

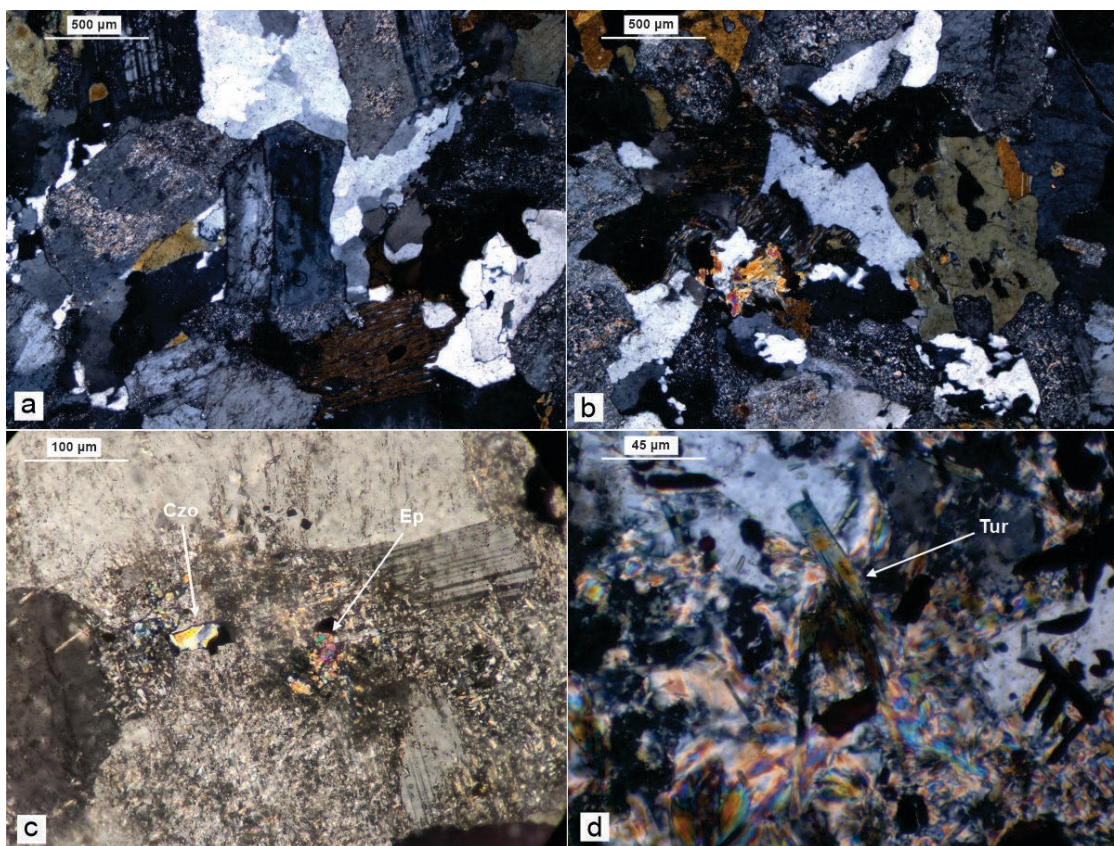


*Nota:* (a, b) sericita de tamaño medio a grueso reemplazando plagioclasas. (c) interestratificaciones de clorita y sericita con hematita asociada. (d, e) pseudomorfismo de feldespatos y minerales máficos. (f) venillas de sericita-

clorita-cuarzo-carbonatos. (g, h) asociación mineral argílica intermedia rellenando espacios, acompañada de pirita y especularita con patrones de flujo. Abreviaturas: Spc = Especularita, Qz = Cuarzo, Chl = Clorita, Ser = Sericita, Cb = Carbonato, Czo = Clinozoisita, Hem = Hematita, Py = Pirita, Ttn = Titanita.

#### - **Alteración cuarzo-sericita**

Así como la alteración argílica intermedia, se encuentra en forma de halos alrededor de las estructuras de especularita reemplazando feldespatos de forma selectivamente pervasiva. Aflora en zonas distales a la alteración potásica con colores blancuzcos. En comparación con la argílica intermedia los cristales de sericita tienen tamaños más finos, debido a que en esta alteración las temperaturas son más bajas y la cristalinidad de la sericita está directamente relacionada con la temperatura (Corbett y Leach, 1997). Esta acompañada de cuarzo con textura en mosaico formando agregados. En zonas puntuales se encuentran cristales de pirita, pero el tamaño reducido de las secciones no permitió observarla en microscopio. De forma subordinada se asocia con agregados de turmalina columnar prismática alargada de tamaño muy fino y colores de interferencia del segundo orden que pueden estar enmascarados por el fuerte pleocroísmo inverso (Figura 14).

**Figura 14***Microfotografías de alteración cuarzo-sericita*

*Nota:* (a, b, c) feldespatos alterando a sericita de tamaño fino, producto de alteración cuarzo-sericita. (d) cristales de turmalina asociados a sericita. Abreviaturas: Czo = Clinozoisita, Ep = Epidota, Tur = Turmalina.

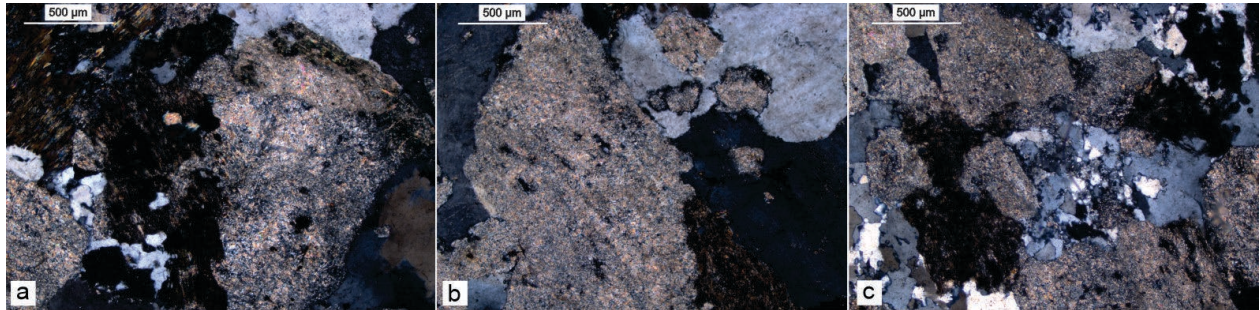
#### - Alteración illita-esmectita-cuarzo

Agregados muy finos de illita-esmectita-cuarzo ( $\pm$ clorita), alteran intensamente la roca caja, hasta el punto de formar pseudomorfos con aspecto “sucio” que preservan la forma del mineral precursor. En comparación con la sericita la illita tiene tamaños más finos y colores de interferencia similares. La esmectita tiene colores de interferencia bajos y su concentración es subordinada en relación con la illita, principalmente hacia los bordes de los cristales (Figura 15). La asociación illita-esmectica es producida por procesos de hidrólisis sobre minerales con fases silicatadas, en sistemas hidrotermales someros con pH relativamente ácido y temperaturas que

varían entre 150 y 220 °C; las concentraciones de esmectita tienen relación indirecta con la temperatura de formación (Fulignati, 2020; Corbett y Leach, 1997).

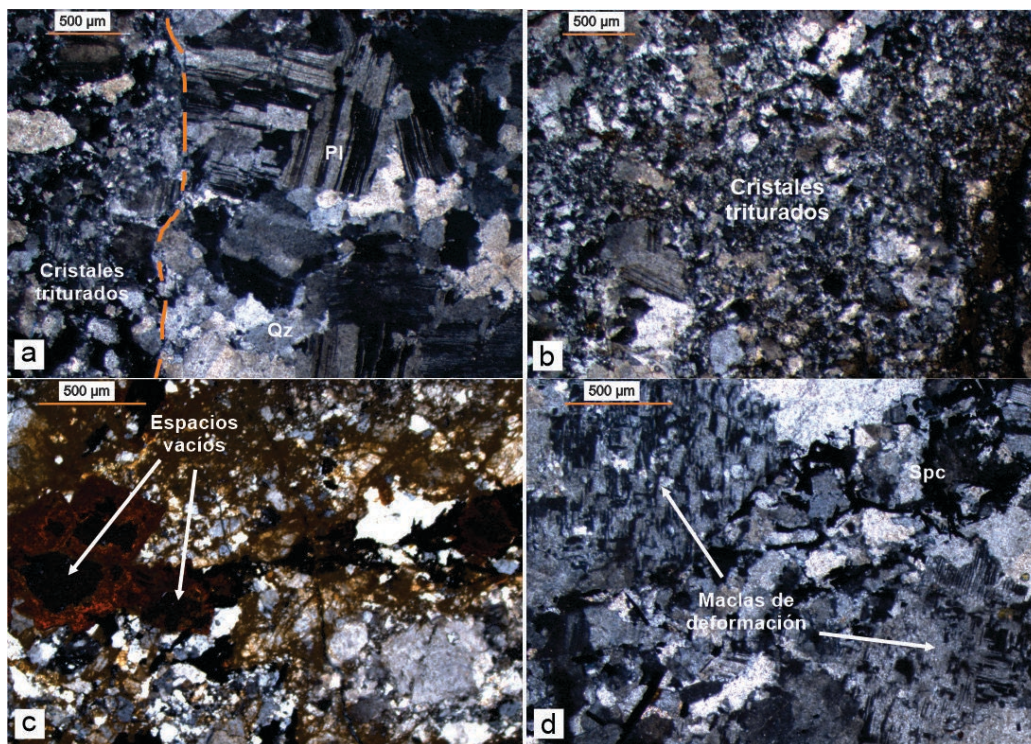
**Figura 15**

*Microfotografías de alteración illita-esmectita-cuarzo*



#### - Alteración supérgena

Principalmente como resultado de la porosidad secundaria producida por la acción de las fallas y familias de diaclasas, percolan aguas meteóricas que desarrollan alteraciones supérgenas de oxidación y argilización, que se superponen a las alteraciones hipógenas más tempranas. Las zonas oxidadas tienen coloraciones rojizas, amarillentas y naranjas, correspondientes a goethita, hematita, specularita de tamaño fino y limonita. El grado de oxidación es parcial y total con desarrollo de halos de impregnación, textura esquelética y espacios vacíos. La lixiviación causada por la oxidación da lugar al relleno de microfracturas y planos de exfoliación, así como impregnación de la superficie de minerales con microporosidad, como es el caso de los feldspatos (Figura 16). En zonas de estructuras forma óxidos de Cu y Mn con hábito dendrítico característico. Por otro lado, la deformación dinámica producida por fallas da lugar a trituración de los cristales causando disminución de tamaño, cuarzo con textura de recristalización tipo “bulging” y plagioclasas con maclas de deformación conformadas por dislocaciones y plegamientos.

**Figura 16***Microfotografías de alteración supérgena*

*Nota:* (a, b) zona de falla con trituración de cristales. (c) oxidación de minerales metálicos, generando espacios vacíos y relleno de microfracturas. (d) plagioclasas con maclas de deformación.

### 6.3 Difracción de Rayos X

Se analizaron dos muestras pertenecientes a venillas de magnetita y veta de especularita, con el objetivo de identificar cualitativamente las principales especies minerales y correlacionarlas con lo observado previamente en petrografía. En el Anexo B se muestran los difractogramas y las tablas con las respectivas especies minerales identificadas.

Las especies minerales identificadas fueron hematita, magnetita con Ti, cuarzo, clorita, sericita, pirita y magnetita. La concentración de cada mineral se infiere cualitativamente mediante los picos de difracción. Según la textura observada en petrografía, la hematita corresponde a la variedad especularita y considerando la magnitud de los picos del difractograma es la especie mineral con mayor concentración. Los picos de magnetita indican una variedad

enriquecida en Ti y otra empobrecida, de origen magmático e hidrotermal, respectivamente. La muestra de venillas de magnetita arroja picos elevados de especularita, debido a la superposición de eventos hidrotermales. Se observan picos correspondientes a turmalina, que por sus características petrográficas es de la variedad chorlo. La muestra de veta, tal como se observó en microscopía de luz reflejada, arroja picos predominantes de especularita. En comparación con la muestra de venilleo, la cantidad de cuarzo incrementa y se observan picos de albita con cantidades subordinadas de calcita, asociadas a la alteración argílica intermedia. La textura brechoide del cuerpo vetiforme hace que incorpore fragmentos de roca encajante, por lo que se observen picos de plagioclasa variedad andesina e incremento en las concentraciones de cuarzo. Es posible que las respuestas altas de algunos minerales enmascaren otros de menor concentración, como es el caso de la calcopirita.

#### **6.4 Microscopía electrónica de barrido**

Se corroboró e identificó la existencia de especies minerales observadas previamente en petrografía. Además, se verificó la presencia de impurezas. La identificación de los minerales se realizó considerando el hábito, distribución y las similitudes con los espectros de rayos X de energía dispersiva (EDS) compilados en Severin (2004) y Welton (2003). En el Anexo C se adjuntan las descripciones para cada mineral, incluyendo las microfotografías de electrones retrodispersados (BSE), los espectros EDS y las tablas con las composiciones elementales semicuantitativas.

Los minerales identificados fueron cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, pirita, calcopirita, calcosina, hematita, especularita, magnetita, clorita, sericita, titanita y epidota. La plagioclasa arrojó dos picos relativamente altos de Al y Na, que evidencian variedad albita en contraste con las plagioclasas magmáticas con componente cálcico observadas en fragmentos de

roca caja. Esta albita puede estar relacionada con procesos de alteración argílica intermedia (Corbett y Leach, 1997). El feldespato potásico pese a producirse por alteración hidrotermal, no arrojó anomalías de bario. La sericita presenta altas concentraciones Fe y Mg, y cantidades subordinadas de K. La clorita arrojó picos altos de Fe, Si, Al y Mg, correspondientes a variedad chamosita, enriquecida en Fe. Además, evidenció impurezas de Mn y K, contenidas en espacios existentes entre las interestratificaciones que conforman su estructura cristalina. La depositación de dichas impurezas es generada por procesos de reemplazamiento mineral o intercambio catiónico ( $Mn^{2+}$  y  $K^+$ ) (Bourdelle, 2021). La concentración de Ca en la titanita varía con respecto a sus concentraciones modales ideales. La calcosina está asociada a calcopirita, hacia los bordes de cristales y a través de microfracturas, producto de procesos de oxidación y lixiviación. Se diferenció entre la magnetita y especularita con base en los picos de oxígeno y hierro, que son ligeramente menores y mayores en la magnetita. La hematita masiva asociada a cloritización evidencia impurezas de Al y Si, debido al intercambio catiónico y disponibilidad de elementos químicos durante los procesos metasomáticos.

## **6.5 Estudio de inclusiones fluidas**

Previo a la interpretación de la información obtenida a partir del estudio de inclusiones fluidas realizado en las muestras de mina Guitarra, se lleva a cabo una contextualización de las generalidades de las inclusiones fluidas, clasificaciones, petrografía, microtermometría, entre otras definiciones (ver Anexo D).

### **6.5.1 Petrografía**

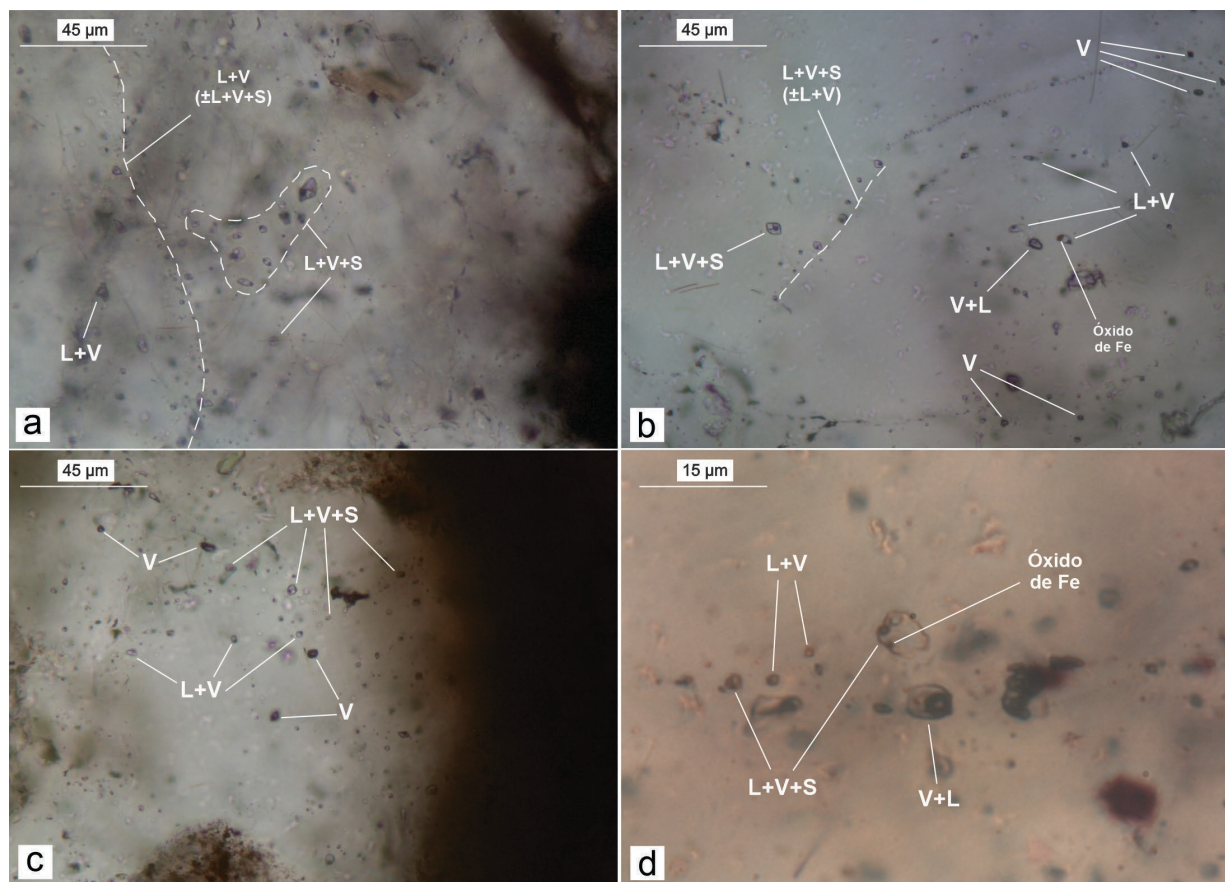
Las dos muestras estudiadas corresponden a venillas de magnetita y veta de especularita. En cuanto a los minerales que contienen las inclusiones fluidas, principalmente es el cuarzo y, en menor medida, calcita y apatito.

- **Inclusiones fluidas en venillas de magnetita**

Los cuarzos contienen inclusiones fluidas primarias aisladas y/o en grupos (“clusters”) multifásicas L(líquido)-V(Vapor)-S(Sólido), bifásicas L+V y, en menor medida, con vapor como fase parcial o totalmente predominante (bifásicas V+L y monofásicas V) (Figura 17). Las multifásicas L+V+S tienen tamaños promedio de 10 micras, formas ovoides e irregulares y relación volumétrica promedio de 70/10/20. Pueden contener hasta dos cristales hijo, siendo la halita (NaCl) la que siempre está presente con forma cubica y color verde claro; en algunas inclusiones se observan cristales más pequeños incoloros con bordes redondeados, que probablemente son de silvita (KCl). Ocasionalmente se observan cristales que por su color rojizo se infieren son óxidos de hierro, los cuales pudieron haber cristalizado simultáneamente con el mineral huésped o haber formado parte del fluido hidrotermal en el que ya existían como fase sólida. Las IF bifásicas L+V tienen tamaños promedio de 5 micras, formas ovoides y alargadas, y relación volumétrica promedio de 80/20. Las inclusiones bifásicas V+L y monofásicas V, se encuentran esporádicamente con tamaños menores a 6 micras y formas ovoides. Las inclusiones con fases L+V+S y L+V también tienen origen pseudosecundario, como grupos alineados intracristalinos que rellenan discontinuidades formadas durante la cristalización del mineral y que terminan de forma abrupta principalmente con zonas de crecimiento.

**Figura 17**

*Inclusiones fluidas en venillas de magnetita*



*Nota:* (a, b, c, d) inclusiones primarias aisladas y/o en “clusters” en orden descendente de abundancia: multifásicas L+V+S, bifásicas L+V, monofásicas V y bifásicas V+L; se observa cristal muy pequeño de óxido de Fe en inclusión multifásica. (b) pseudosecundarias formando lineamiento aislado de multifásicas L+V+S ( $\pm$ bifásicas L+V). (a) secundarias bifásicas L+V ( $\pm$ multifásicas L+V+S), correspondientes a evento posterior sobreimpuesto rico en especularita. Abreviaturas: L = Líquido, V = Vapor, S = Sólido.

Por otro lado, se observan dos grupos de inclusiones fluidas secundarias intergranulares alineadas o en senderos siguiendo trazos de microfracturas. El primero está conformado por IF bifásicas L+V y multifásicas L+V+S en menor concentración, con tamaños menores a 2.5 micras y formas ovoides y alargadas; las relaciones volumétricas promedio son 90/10 y 80/10/10. El

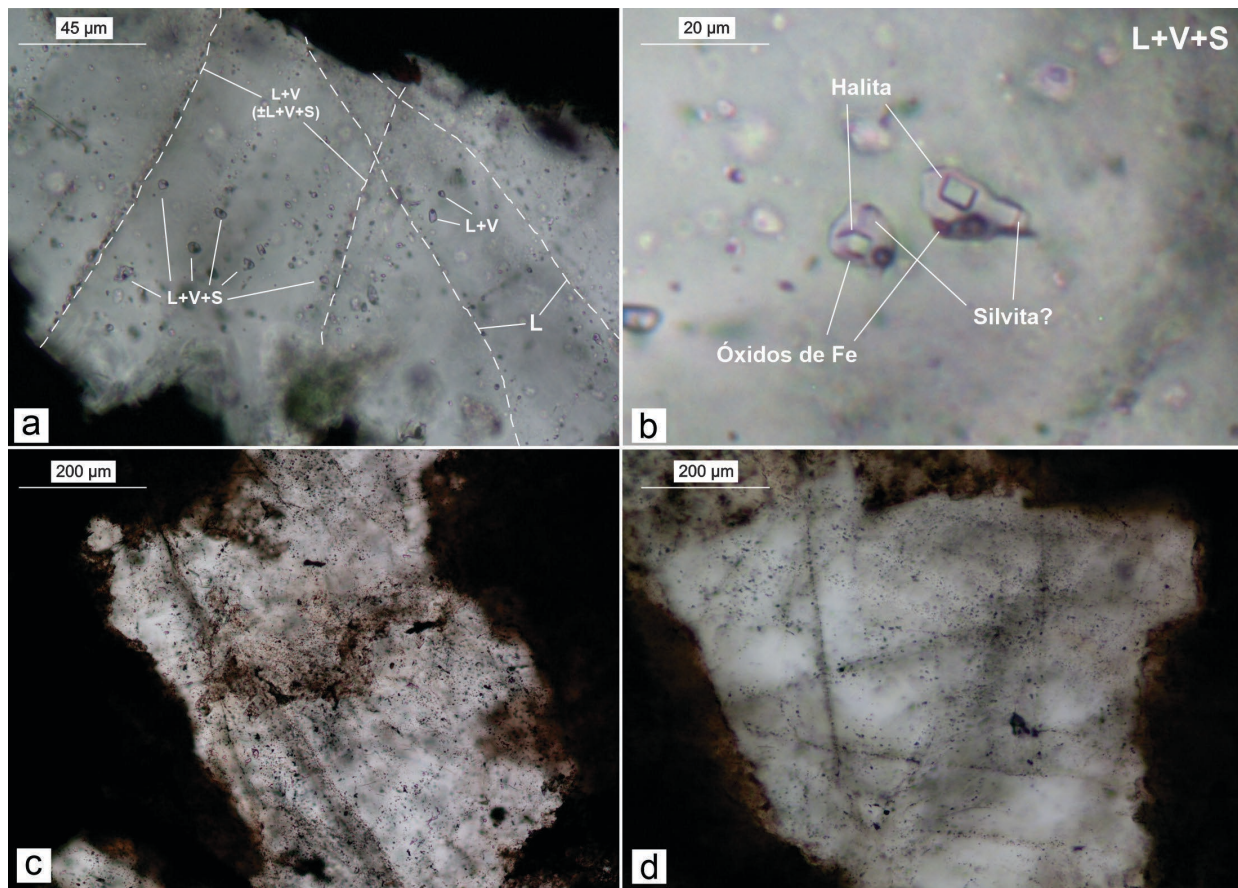
segundo grupo está conformado por IF monofásicas L de tamaños menores a 1 micra y formas alargadas y ovoides, que hacen parte de un evento hidrotermal más reciente de baja temperatura (Figura 18).

- **Inclusiones fluidas en veta de especularita**

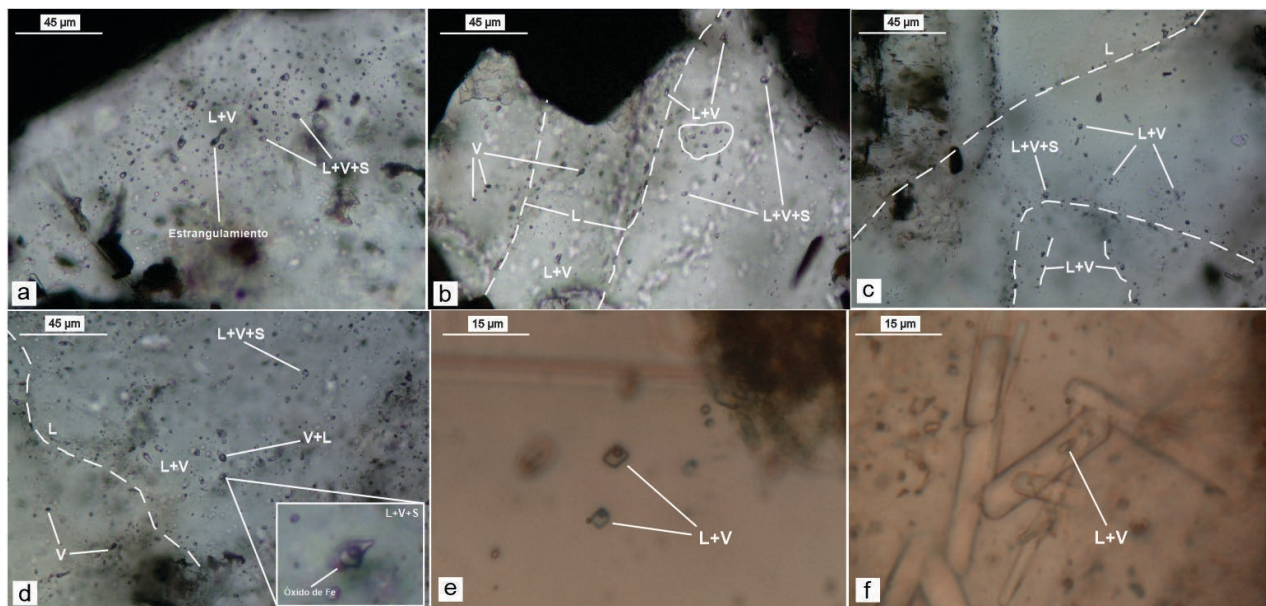
Los cuarzos contienen inclusiones fluidas primarias aisladas y/o en grupo bifásicas L+V con multifásicas L+V+S en menor proporción y, eventualmente, bifásicas V+L ( $\pm$ monofásicas V) con formas ovoides y tamaños menores a 4 micras (Figura 19). Las IF bifásicas L+V tienen tamaños promedio de 6 micras, formas ovoides y alargadas, y relación volumétrica promedio 90/10. Las IF multifásicas L+V+S tienen tamaños promedio de 4 micras, formas irregulares y ovoides, y relación volumétrica promedio de 80/10/10. En las inclusiones multifásicas se observa un cristal hijo de halita cubico a rectangular y, en casos puntuales, un cristal de óxido de hierro con forma irregular y color rojizo. Además, se encontraron inclusiones fluidas bifásicas L+V en cristales de calcita y apatito. Los tamaños de estas son menores a 3 micras y sus formas van en concordancia con la del cristal huésped, pues son cubicas y alargadas, respectivamente. Las inclusiones con fases L+V ( $\pm$ L+V+S) también tienen origen pseudosecundario, formando lineamientos intracristalinos que finalizan en zonas o frentes de crecimiento cristalino.

**Figura 18**

*Inclusiones fluidas en venillas de magnetita*



*Nota:* (a) inclusiones primarias aisladas con tamaños mayores, multifásicas L+V+S y en menor proporción bifásicas L+V; relación de corte mostrando temporalidad relativa entre secundarias bifásicas L+V ( $\pm$  multifásicas L+V+S) y monofásicas L, siendo estas últimas las más recientes. (b) multisólidas compuestas por halita, óxidos de Fe y silvita? (c, d) alta densidad de “trails” de inclusiones fluidas secundarias intergranulares. Abreviaturas: L = Líquido, V = Vapor, S = Sólido.

**Figura 19**
*Inclusiones fluidas en veta de especularita*


*Nota:* (a) cluster con alta concentración de inclusiones fluidas primarias en zona de crecimiento cristalino, las cuales son bifásicas L+V (una de estas tiene estrangulamiento); se observan dos multifásicas L+V+S. (b, d) primarias bifásicas L+V en “cluster” y aisladas, y monofásicas V, multifásicas L+V+S (contiene cristal de óxido de Fe) y bifásica V+L aisladas. (c) primarias y pseudosecundarias bifásicas L+V (se observa una multifásica L+V+S) relacionadas con frente de cristalización; hacia la parte superior hay un sendero de secundarias monofásicas L intergranulares. Microfotografías de IF bifásicas L+V en cristal de calcita (e) y apatito (f). Abreviaturas: L = Líquido, V = Vapor, S = Sólido.

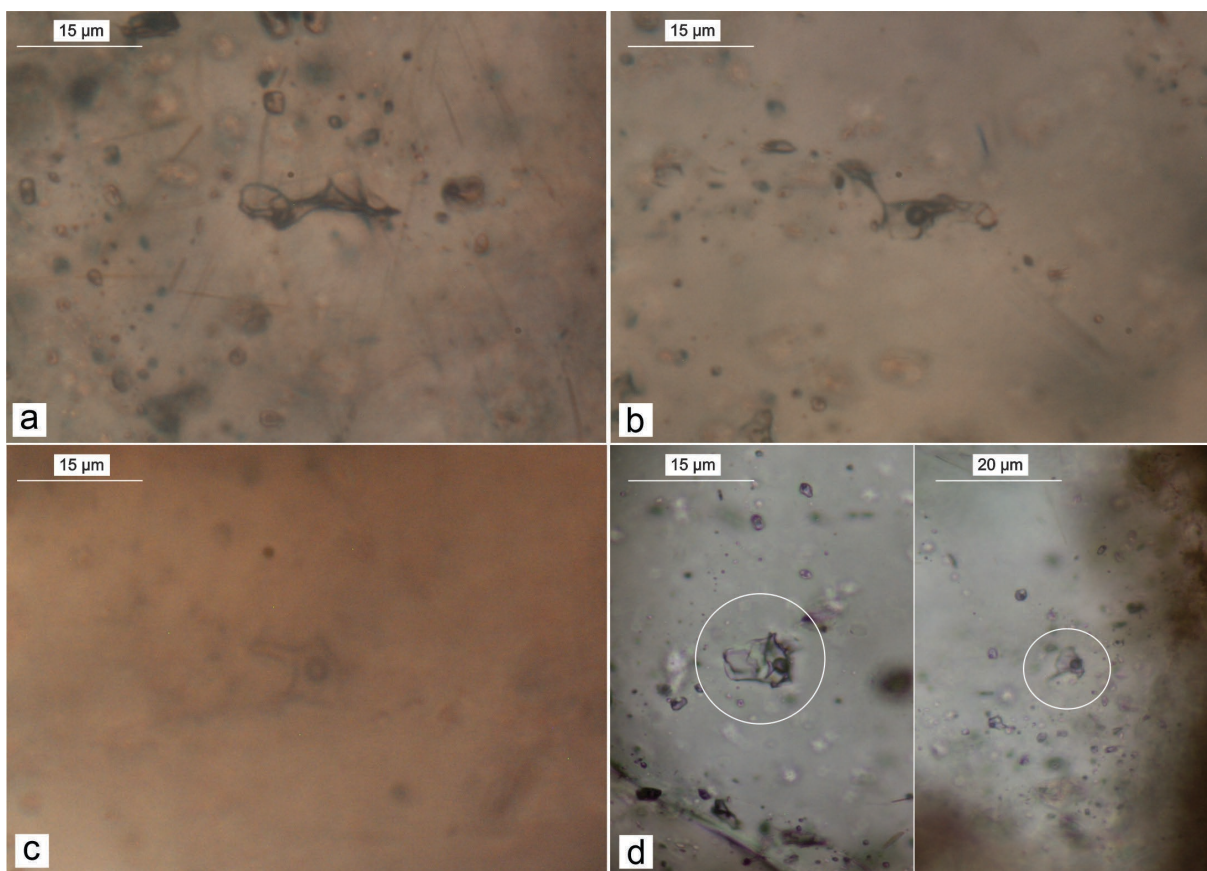
Solo se observó un grupo de inclusiones fluidas secundarias intergranulares alineadas o en senderos siguiendo trazos de microfracturas. Son monofásicas L con tamaños menores a 1 micra y formas alargadas y ovoides, las cuales hacen parte de un evento hidrotermal más reciente de baja temperatura.

En la Figura 20 se observan evidencias de modificaciones post-atrapamiento, principalmente atribuidas a sobreimposición de eventos hidrotermales y variación de propiedades fisicoquímicas por procesos deformativos estructurales. La identificación de este tipo de

inclusiones es importante, ya que pueden aportar datos erróneos, especialmente en el análisis microtermométrico. Los dos mecanismos de modificación reconocidos fueron estrangulamiento (“necking down”) y dilatación (“stretching”), los cuales afectan en mayor medida las inclusiones bifásicas L+V, probablemente por su temperatura más baja en relación con las multifásicas. Estas modificaciones tienden a desarrollarse en las inclusiones fluidas de mayor tamaño y evidencian procesos de recristalización e incremento de temperatura en el mineral huésped. De forma particular, se observó el caso de dos inclusiones con posible desarrollo de coalescencia, ya que presentan un gran tamaño en comparación con las inclusiones que las rodean; esto se debe a que en algunas ocasiones las IF tienden a coalescer o unirse, con el fin de minimizar la energía existente entre las fases que las componen (Ramos, 2015).

**Figura 20**

*Inclusiones fluidas con modificaciones post-atrapamiento*



*Nota:* Microfotografías de inclusiones fluidas afectadas por variaciones en las propiedades fisicoquímicas del sistema hidrotermal, con cambios de volumen y modificaciones post-atrapamiento: (a, b) estrangulamiento o “necking-down”. (c) dilatación o “stretching”. (d) IF con mayor tamaño que las aledañas, debido a proceso de coalescencia?

La amplia variedad de inclusiones fluidas y relaciones volumétricas entre estas, denotan condiciones de atrapamiento heterogéneo para los fluidos, que probablemente estaban bajo procesos de ebullición o efervescencia, lo cual se evidencia en la presencia de inclusiones bifásicas L-V y V-L, y el contenido de varios sólidos en inclusiones multifásicas por procesos de saturación (Camprubí, 2010).

### **6.5.2 Microtermometría**

Luego de realizar la petrografía de inclusiones fluidas, fueron seleccionadas las zonas con mayor acumulación de inclusiones y con base en estas se fragmentaron las secciones delgadas en chips con diámetro no mayor a 1 cm (Ver Anexo D). No se pudo realizar el proceso de enfriamiento, ya que el dispositivo de control presentaba fallas técnicas y no había disponibilidad de nitrógeno líquido. Debido a esto, no se pudo realizar un estudio microtermométrico como tal, únicamente calentamiento de forma lenta y progresiva en un rango entre 0.1 °C y 5 °C por minuto. Se midieron las temperaturas de homogenización de la fase vapor ( $T_{h_v}$ ) y fusión de la halita ( $T_{f_s}$ ).

La salinidad relativa del fluido se estima para las inclusiones multifásicas, mediante la temperatura de fusión de la halita ( $T_{f_s}$ ), puesto que no se cuenta con la temperatura eutéctica. Para el cálculo de la salinidad se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{peso eq. NaCl} = 26.218 + 0.0072T_{f_s} + 0.000106T_{f_s}^2$$

Se cálculo una aproximación de densidad de forma gráfica, usando los datos de salinidad y temperatura de fusión de la halita (Figura 21) (Brown 1984, como se citó en Kumral et al., 2022).

Al no contar con la temperatura eutéctica no se pudo llevar a cabo la estimación de presión de atrapamiento, sin embargo, se considera que la geobarometría de inclusiones fluidas es poco precisa y arroja valores erróneos. Muchas de las inclusiones son atrapadas a presiones mayores que la calculada, por lo que se sugieren otro tipo de geobarómetros (Izquierdo et al., 2008).

En el Anexo D se adjunta la tabla con los resultados obtenidos en las mediciones de microtermometría. En las multifásicas primero homogeniza la burbuja de vapor y posteriormente se solubiliza el cristal de sal, lo cual es indicador de un fluido salino saturado al momento del atrapamiento. La cantidad de datos obtenidos a partir de las inclusiones mencionadas anteriormente es limitada, ya que sufren decrepitación durante el proceso de calentamiento antes de homogenizar y los datos obtenidos a partir de estos pueden variar considerablemente entre si (Gómez, 2007).

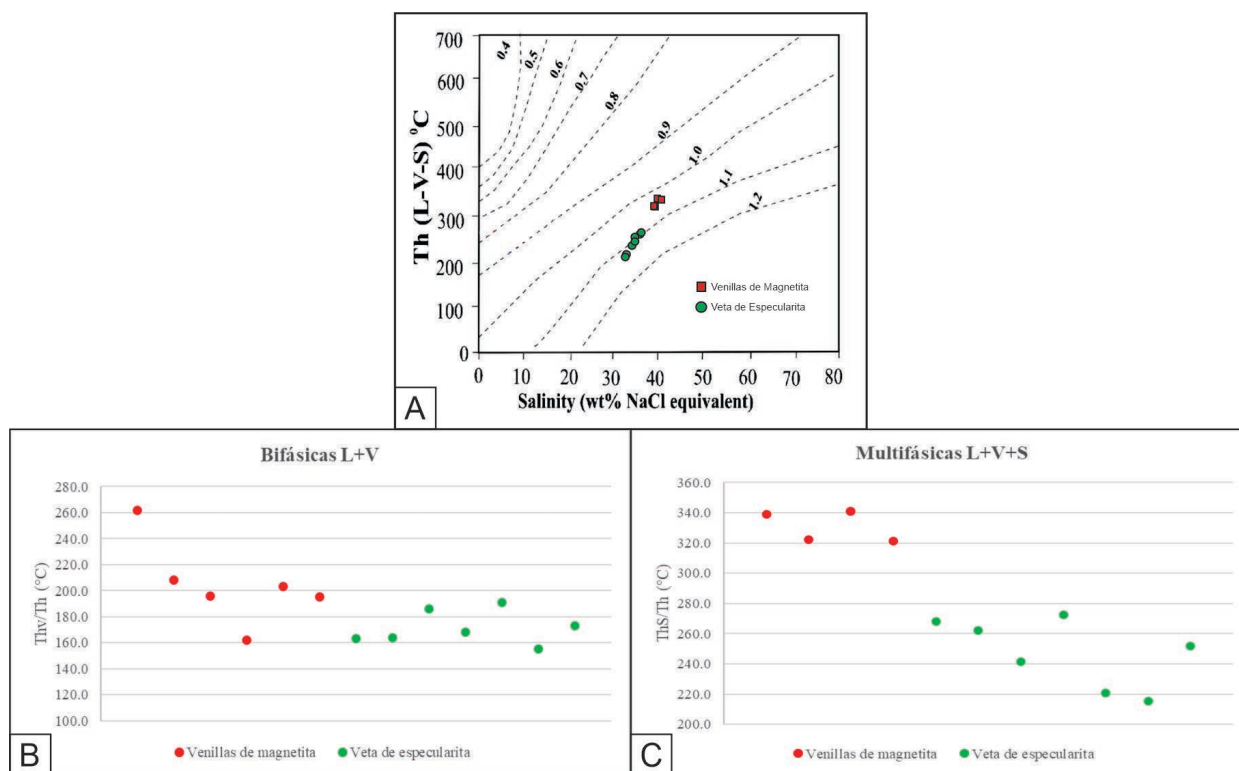
Las inclusiones fluidas multifásicas L+V+S primarias albergadas en las venillas de magnetita arrojaron los siguientes datos promedio: temperatura de homogenización de la fase vapor = 160.7 °C, temperatura de fusión de la halita o temperatura de homogenización final = 330.8 °C. Las bifásicas L+V primarias tienen una temperatura de homogenización promedio de 204.4 °C. Además, se analizaron dos bifásicas L+V secundarias con temperaturas de homogenización de 191.8 °C y 196 °C. Puntualmente dos inclusiones fluidas primarias L+V+S y V+L arrojaron temperaturas de homogenización 550 °C y 447.5 °C, respectivamente.

En el caso de las inclusiones contenidas en la veta de especularita, las bifásicas L+V primarias tienen temperatura de homogenización promedio de 171.6 °C. Las multifásicas L+V+S primarias arrojaron los siguientes datos promedio: temperatura de homogenización de la fase vapor = 165.7 °C, temperatura de fusión de la halita o temperatura de homogenización final = 247.4 °C.

La presencia de cristales hijo de halita en las inclusiones fluidas multifásicas, sugiere condiciones de saturación con salinidades superiores a 25% peso eq. NaCl y densidades cercanas a 1.0 g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 21**

*Relaciones entre temperaturas de homogenización*



*Nota:* (a) Inclusiones fluidas multifásicas contenidas en venillas magnetita y veta de especularita. Modificado de Kumral et al., 2022. (b y c) temperaturas mínimas de atrapamiento. T<sub>h</sub>s: temperatura de fusión de la halita. T<sub>h</sub>: temperatura de homogenización final.

## 7. Discusión

En Mina Guitarra afloran rocas ígneas plutónicas granodioríticas y subvolcanicas micro-monzograníticas. Las rocas plutónicas pertenecen a la unidad Granito de Norosí (Jurásico Temprano-Medio), esta unidad está clasificada como granito tipo I, calcoalcalina y metalumínica a peralumínica, por lo que se puede asociar a márgenes continentales activos (González et al., 2015). El dique monzogranítico corta la roca plutónica, sugiriendo una edad relativa de Jurásico Tardío-Cretácico.

Posterior a la formación de las rocas ígneas graníticas, por procesos epigenéticos magmático-hidrotermales, se forman estructuras y alteraciones hidrotermales. Las estructuras se forman a lo largo de zonas de cizalla por fracturamiento y relleno, orientadas este – oeste con inclinación subvertical. En el sector más noroeste de la mina a largo de una franja de 20 m, afloran venillas de magnetita-cuarzo ( $\pm$ pirita, calcopirita). Sin embargo, vetas y venillas de specularita-cuarzo-pirita ( $\pm$ calcopirita) son las más abundantes en la mina, contienen cuarzo hexagonal idiomórfico, indicando disponibilidad de espacios abiertos durante su formación.

La interacción fluido-roca de los fluidos magmático-hidrotermales generó varios eventos de alteraciones hidrotermales de diferentes temperaturas. La alteración potásica se asocia a las venillas de magnetita en forma de halos centimétricos, donde feldespato potásico metasomático reemplaza selectivamente feldespato potásico magmático y plagioclasa, mediante intercambio catiónico de  $K^+$  por  $Na^+$  y  $Ca^{+2}$  (Rong y Wang, 2016; Correa-Lima y Klein, 2020); este intercambio catiónico libera Fe, el cual se oxida y forma inclusiones microscópicas de hematita que le dan coloración rojiza y turbidez en sección delgada al feldespato potásico (Pirajno, 2009). La alteración argílica intermedia aparece alrededor de estructuras de specularita y presenta gradación a cuarzo-sericita en zonas más distales de la alteración potásica. Las dos tienen

relación paragenética con cuarzo de textura bulging, que sugiere temperatura de formación menor a 350°C (Dong et al., 1995). En la alteración argílica intermedia la hidrólisis o metasomatismo de  $H^+$  ( $\pm OH^-$ ,  $K^+$  y  $S^2$ ) forma sericitas y cloritas interestratificadas, cuarzo carbonato y subproductos de epidota – clinozoisita, titanita y hematita (Pirajno, 2009). La presencia de carbonatos indica un paleofluido hidrotermal rico en  $CO_2$ . Las concentraciones de pirita y calcopirita son mayores para las venillas de especlarita en relación con las que contienen magnetita. Sin relación aparente con estructuras, se encuentra alteración illita-esmectita-cuarzo alterando moderada a intensamente feldespatos. Finalmente, la percolación de aguas meteóricas produce alteración supérgena que inestabiliza y reemplaza parcial a totalmente los minerales metálicos y silicatos, formando oxidación y argilización.

La mineralogía y relaciones espaciales de las diferentes alteraciones hidrotermales dan cuenta de sobreimposición progresiva de estas a medida que el sistema magmático-hidrotermal fue pasando a niveles más someros. Este proceso se dio durante la disminución de temperaturas en un ambiente ligeramente neutro a ácido, donde también influyó la fugacidad del oxígeno, por ejemplo, en condiciones oxidantes los óxidos férricos son altamente insolubles y, por lo tanto, se propicia la precipitación de hematita (Ramanaidou y Wells, 2014).

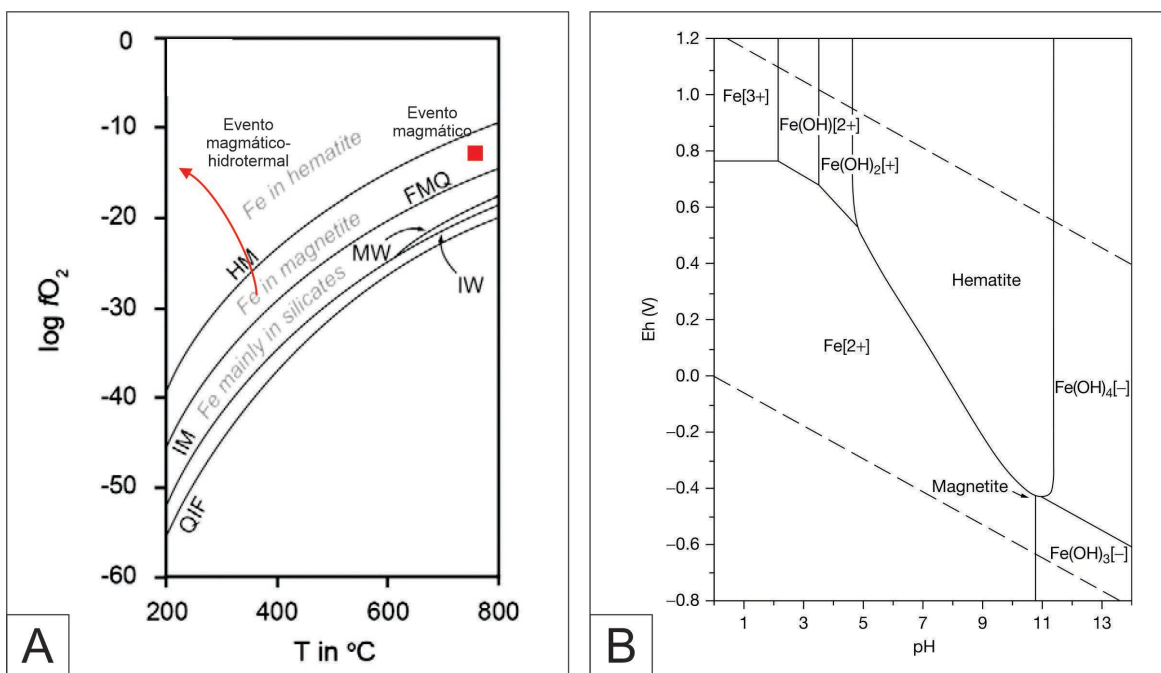
En el sector de Mina Walter, al suroeste de la zona de estudio, también se han reportado venillas de especlarita orientadas este – oeste con alteración sericítica asociada, pero las venillas de magnetita y la alteración potásica no han sido documentadas. La veta principal tiene orientación NE-SW, está emplazada en zona de falla y tiene paragénesis mineral conformada por cuarzo, pirita, arsenopirita, esfalerita, galena, calcopirita y tetraedrita (SGC, 2019; comunicación verbal Dpto. de Geología, MINECAR Gold S.A.S.). Hacia el norte de la serranía no se han reportado los venilleos descritos en el presente estudio.

La textura brechoide que exhiben las estructuras hidrotermales en conjunto con el hábito idiomórfico de algunos minerales, indica cristalización en niveles corticales relativamente someros por encima del límite dúctil – frágil, con fracturamiento hidráulico y disponibilidad de espacios abiertos (Correa-Lima y Klein, 2020).

VARIABLES como el pH, Eh, fugacidad de los elementos químicos, temperatura y presión controlan la concentración, solubilidad y precipitación de los metales. La figura 22 muestra dos diagramas que relacionan estas variables con respecto a especies químicas de hierro. Allí se muestran las condiciones del evento magmático de la roca caja teniendo en cuenta su contenido de magnetita como mineral accesorio (~800°C) y las condiciones de formación para las estructuras hidrotermales.

**Figura 22**

*Diagramas de estabilidad química entre magnetita y hematita*



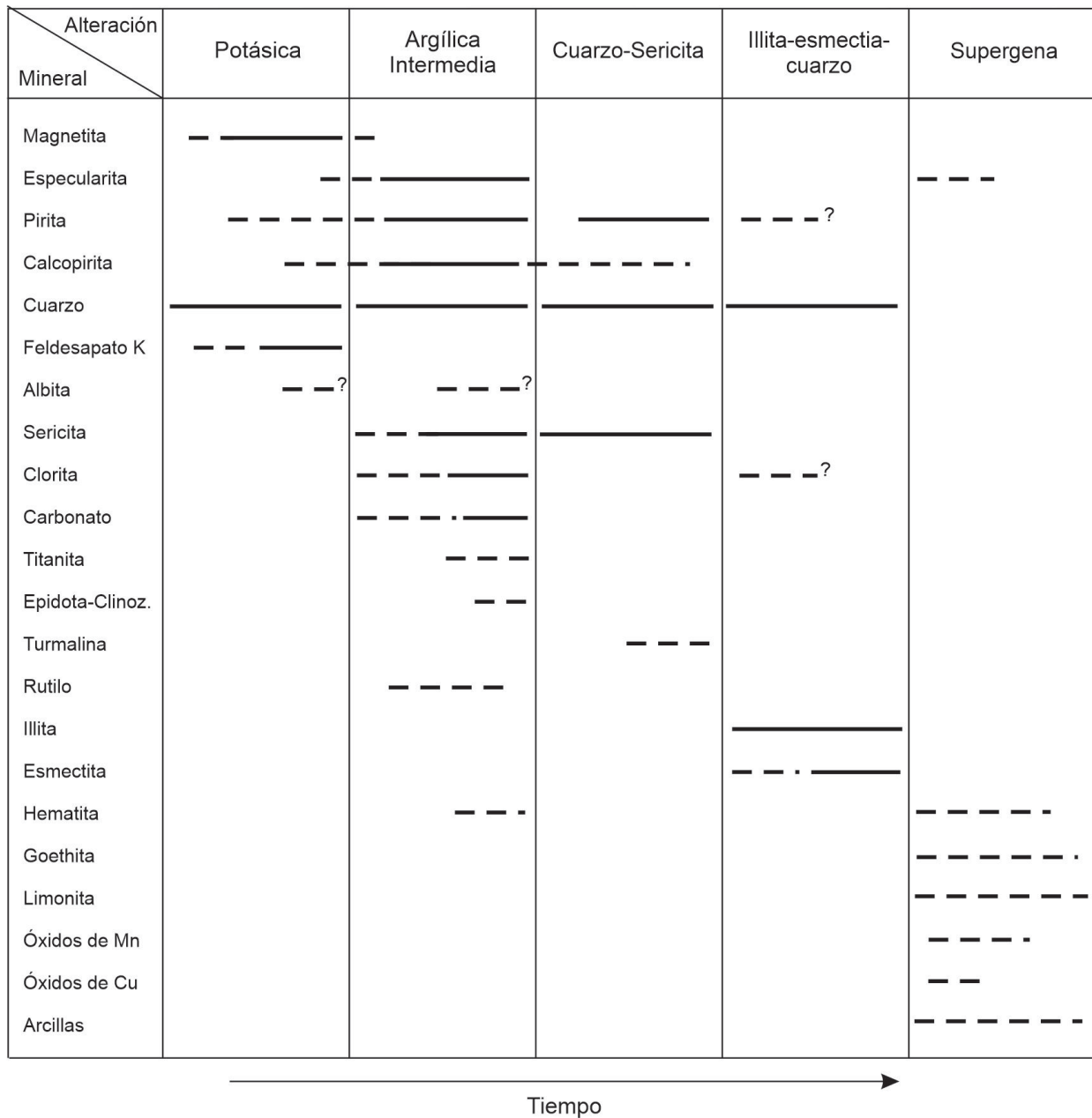
*Nota:* A) Diagrama del sistema Fe-Si-O relacionando temperatura y fugacidad del oxígeno (FMQ: fayalita-magnetita-cuarzo, HM: hematita-magnetita). Tomado de Ramanaidou y Wells, 2014. B) Diagrama de Pourbaix relacionando pH y potencial de oxidación (Eh) para las fases del sistema Fe-O-H. Tomado de Nadoll et al., 2014.

Considerando la información expuesta anteriormente, en la Figura 23 se propone la secuencia paragenética para los eventos formadores de las estructuras y alteraciones hidrotermales.

La petrografía de inclusiones fluidas demuestra una amplia variedad de familias conformadas por inclusiones monofásicas, bifásicas, multifásicas y multisólidas con relaciones volumétricas variables y orígenes primario, pseudosecundario y secundario. La microtermometría es incompleta, pues solo se realizó calentamiento para obtener temperaturas mínimas de atrapamiento. Las temperaturas para las inclusiones multifásicas varían entre 230°C y 340°C, aunque se obtuvo un valor superior a 500°C. Las inclusiones bifásicas L+V indican temperaturas menores entre 150°C y 200°C, correlacionables con ambientes epitermales. Las inclusiones multifásicas hipersalinas con cristales hijo de halita son típicas de sistemas porfiríticos y por su estado de saturación sugieren salinidades superiores a 25% peso eq. NaCl. La diversidad en los tipos de inclusiones es diagnóstica para condiciones de atrapamiento heterogéneo mediante procesos de ebullición y mezcla de fluidos, como se muestra en las Figuras 24. Debido a que no se cuenta con temperaturas eutécticas, el sistema químico se desconoce. El Servicio Geológico Colombiano (2019), en minas ubicadas al suroeste de la zona de estudio, reporta inclusiones fluidas bifásicas L+V con temperaturas de homogenización entre 180.3 °C y 189 °C, y salinidades entre 3.4% y 19.31% peso eq. NaCl, pero no documentan inclusiones multifásicas. De forma preliminar se pueden sugerir alteraciones hidrotermales asociadas a los tipos de inclusiones fluidas, puesto que se evidencian varias generaciones de cuarzo a las que se les debe definir su temporalidad mediante catodoluminiscencia.

**Figura 23**

*Secuencia paragenética propuesta para mina Guitarra*

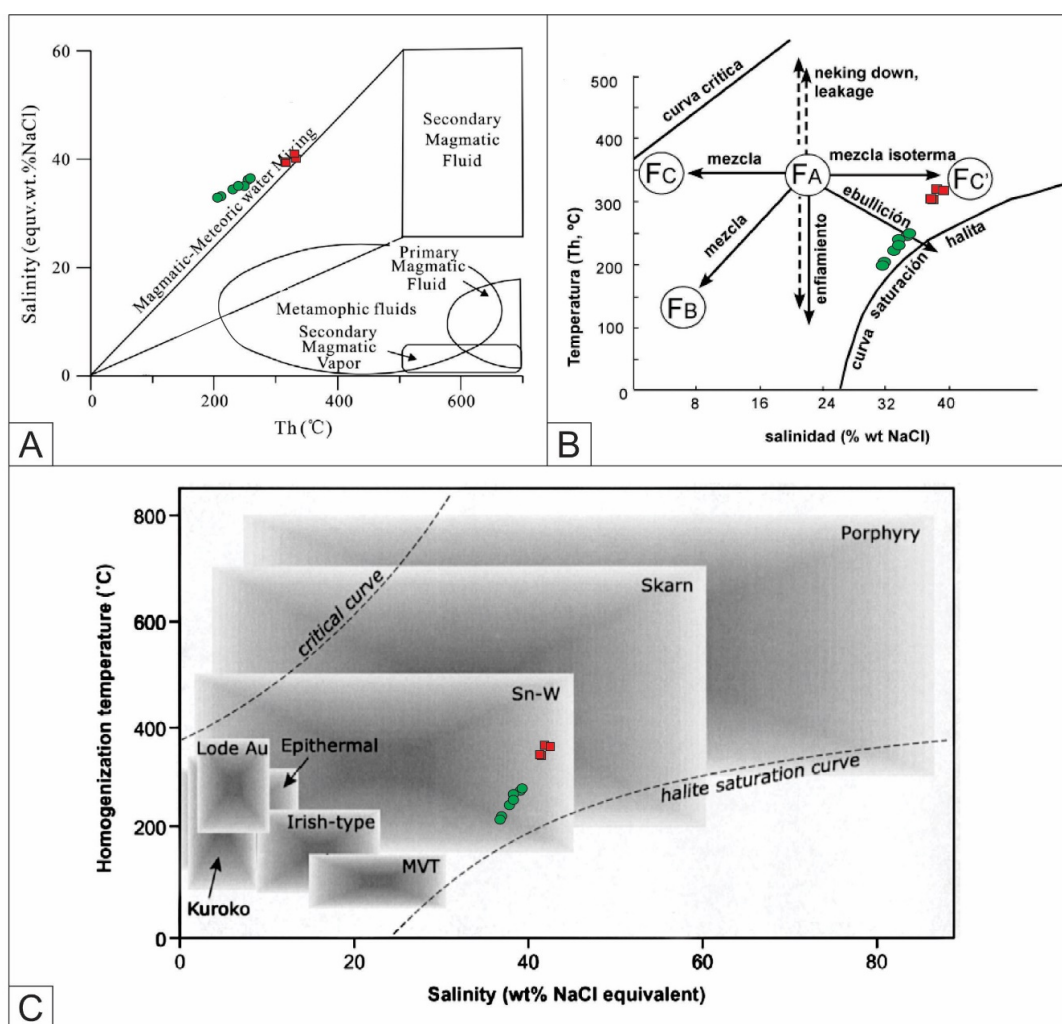


Según el diagrama propuesto por Wilkinson (2001), las inclusiones multifásicas muestran afinidad con ambiente tipo pórfido (Figuras 24). Sin embargo, el mismo autor hace énfasis en que los límites definidos para cada tipo de depósito pueden variar y la información obtenida a partir de estos, solo debe ser usada como guía y no representa un criterio definitivo.

Los pocos estudios metalogénicos realizados en la Serranía de San Lucas, describen mineralizaciones auríferas en vetas principalmente formadas a lo largo de estructuras tensionales (modelo de Riedel) bajo un régimen transpresivo y en su mayoría emplazadas en cuerpos graníticos. El origen de estos cuerpos mineralizados es atribuido a depósitos epitermales de baja sulfuración y temperatura, asociados a intrusivos (IRGD) (SGC, 2019; Figueroa, 2019).

**Figura 24**

*Interpretación de variables microtermométricas*



*Nota:* Los puntos verdes y rojos, representan temperaturas mínimas de atrapamiento de inclusiones contenidas en estructuras especularita-cuarzo y magnetita-cuarzo, respectivamente. A) los fluidos formadores de las inclusiones fluidas analizadas muestran tendencia a ser originados por mezcla de aguas magmáticas y meteóricas. Tomado de

Yang et al., 2013. B) tendencia a procesos de ebullición y mezcla. Tomado de Velasco, 2004. C) génesis asociada a depósito tipo pórfido. Tomado de Wilkinson, 2001.

Teniendo en cuenta los modelos propuestos en la bibliografía, los resultados obtenidos de los análisis petrográficos mineralógicos y de inclusiones fluidas asocian las manifestaciones hidrotermales de Mina Guitarra a un sistema porfirítico con procesos característicos de “telescoping” o sobreimposición progresiva de alteraciones hidrotermales, debido a la evolución termal del mismo. Temperaturas de homogenización similares entre la alteración potásica y fílica se deben dicha sobreimposición de eventos hidrotermales (Bodnar et al., 2014). La alteración potásica asociada a venillas en profundidades epitermales está relacionada con temperaturas menores a 400 °C (Corbett y Leach, 1997; Hernández, 2011). A pesar de que no fueron documentados en este estudio, el hallazgo de alteración potásica indica cercanía relativa con los cuerpos causativos de esta.

## 8. Conclusiones

- Las variedades litológicas ígneas en el sector de Mina Guitarra varían entre rocas plutónicas y subvolcánicas de composición granodiorítica y monzogranítica, respectivamente. Las rocas plutónicas corresponden a la roca caja de las mineralizaciones y las rocas subvolcánicas están representadas por un dique con dirección NE-SW.
- En una etapa posterior al magmatismo mencionado, se desarrollan procesos epigenéticos que generaron productos de interacción fluido-roca, relacionables con sistemas de tipo magmático-hidrotermal.
- Las estructuras hidrotermales formadas durante los procesos hidrotermales epigenéticos, sugieren el desarrollo de ambientes porfiríticos, con una

sobreimposición de ambientes epitermales, y un evento tardío de alteraciones supérgenas asociadas a percolación descendente de aguas meteóricas.

- Los productos de las interacciones fluido-roca de ambientes porfiríticos, se caracterizan por venillas de cuarzo-magnetita ( $\pm$ pirita, calcopirita) con halos de alteración potásica y vetas-venillas de cuarzo-especularita-pirita ( $\pm$ calcopirita) con alteración argílica intermedia asociada (sericita-clorita-cuarzo-carbonatos), la cual presenta gradación a cuarzo-sericita en zonas distales a la alteración potásica. La tipología de inclusiones fluidas relacionada con estos ambientes tiene relaciones volumétricas variables y son de tipo multifásicas con cristales hijo de halita ( $\pm$ silvita?), bifásicas vapor-líquido y monofásicas vapor.
- Los productos de las interacciones fluido-roca de ambientes epitermales, se caracterizan por alteración cuarzo-illita-esmectita, correlacionables con inclusiones fluidas tipo bifásicas líquido-vapor.
- Los productos de las alteraciones supérgenas, se caracterizan por la formación de hematita, specularita fina, goethita, limonita, óxidos de Cu y arcillas. Debido a sus condiciones de formación, se asocian a las inclusiones fluidas tipo monofásicas líquidas.
- Las evidencias asociadas a procesos magmático-hidrotermales encontradas en el presente proyecto de grado, representan los primeros hallazgos de depósitos minerales tipo pórfido en la Serranía de San Lucas.

## 9. Recomendaciones

- Realizar campañas de cartografía superficial y subterránea en minas circunvecinas a la zona de estudio para verificar existencia y continuidad de las estructuras y alteraciones hidrotermales.
- Intensificar el muestreo sistemático para complementar análisis petrográficos, relaciones paragenéticas e identificar posibles zonaciones mineralógicas. De esta forma también se podrá precisar con mayor detalle el ambiente epitermal.
- Ejecutar análisis multielementales con el propósito de reconocer enriquecimiento de metales y aportar a la génesis del depósito mineral.
- Realizar dataciones Ar/Ar en feldespatos potásicos hidrotermales para definir la temporalidad de la alteración hidrotermal.
- Llevar a cabo estudios de inclusiones fluidas donde se calcule temperatura eutéctica, fusión de la hidrohalita y fusión del hielo, incluyendo análisis isotópicos, con el fin de caracterizar detalladamente los fluidos atrapados.
- Proyectar prospecciones geofísicas, muestreo de sedimentos activos y perforaciones diamantinas que permitan identificar posibles pórfidos, zonación de metales y el cuerpo causante de las manifestaciones hidrotermales descritas.

**Referencias Bibliográficas**

- Baioumy, H., Khedr, M. and Ahmed, A. (2013). Mineralogy, geochemistry and origin of Mn in the high-Mn iron ores, Bahariya Oasis, Egypt. *Ore geology reviews* 53(2013), 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.009>
- Bodnar, R., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada D., y Steele-MacInnis., M. (2014). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. En H. Holland y K. Turekian (Eds.), *Treatise of geochemistry* (pp. 119-141). Elsevier Science.
- Bourdelle, F. (2021). Low-Temperature Chlorite Geothermometry and Related Recent Analytical Advances: A Review. *Minerals* 11(2), 130. <https://doi.org/10.3390/min11020130>
- Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62(1), 25-42. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2010v62n1a2>
- Cediel, F., Shaw, R. and Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In C. Bartolini, R. Buffler and J. Blickwede. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics: AAPG Memoir 79* (p.815-848).
- Clavijo, J. (1995). Mapa geológico de Colombia: Plancha 75 – Aguachica. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS.
- Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., y Pérez, A. (2008). Evolución Geológica de la Serranía de San Lucas, Norte del Valle Medio del Magdalena y Noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.
- Consorcio GSG (GEOMINAS – SERVIMINAS – GEMI) (2015). Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del

territorio nacional, identificados por el servicio geológico colombiano: Plancha 84 – Los Canelos. Memoria explicativa. Servicio Geológico Colombiano.

- Correa-Lima, R. y Klein, E. (2020). Hydrothermal alteration, mineralization and fluid inclusions in the Pista and Fofão prospects: implications for the genetic model of the Coringa polymetallic deposit, SE Tapajós Mineral Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil* 3(1), 33-59. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2020.v3.n1.3>
- Corbett, G. y Leach, T. (1997). Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization. Short Course Manual.
- De la Espriella, R. (1960). Investigaciones mineras en la región del Bajo Magdalena: hierro en Barranco de Loba, Bolívar, yeso en el Banco, Magdalena y oro en San Martín de Loba, Bolívar (informe No. 1365). Investigaciones de geología económica, Servicio Geológico Nacional.
- Dong, G., Morrison, G. y Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland: classification, origin and implication. *Economic Geology* 90(1995), 1841-1856. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1841>
- Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano-Ortiz, F., Duque-Caro, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropáin, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., Albers, J., ... y Hodges, C. (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *Publicaciones especiales INGEOMINAS*, 14(1), 1-235.
- Feininger, T., Barrero, D., y Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub – zona II-B). *Boletín de Geología*, 20(2), 1-173.

- Figuroa, M. (2019). *Oro del Sur de Bolívar: Consideraciones Metalogenéticas y Optimización del Beneficio Mineral* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Fulignati, P. (2020). Clay Minerals in Hydrothermal Systems. *Minerals*, 10(10), 919. <http://dx.doi.org/10.3390/min10100919>
- Galvis, J. y De la Espriella, R. (1990). Manifestaciones de metales preciosos en el área del proyecto Morales – El Banco en la región nororiental de la Serranía de San Lucas, departamento de Bolívar. Informe Empresa Colombiana de Minas (ECOMINAS).
- García-Delgado, H. and Velandia, F. (2020). Tectonic geomorphology of the Serranía de San Lucas (Central Cordillera): Regional implications for active tectonics and drainage rearrangement in the Northern Andes. *Geomorphology*, 349(2020), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106914>
- Gómez, C. (2007). *Estudio de los procesos de alteración hidrotermal en rocas del Hauteriviano – Barremiano (Cretácico Inferior) del túnel “Chirripay”. Sector esmeraldífero Yacopí, Cundinamarca* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- González, H., Maya, M., García J., Gómez, J., Palacio A., Ruiz, C., Camacho, J., Montero, J., Grimaldo, J. y Alzate, G. (2015). Mapa geológico de la plancha 84 Los Canelos. Escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Bogotá.
- Hernández, A. (2011). Alteración Hidrotermal: Potásica y Propilítica [Diapositivas de PowerPoint]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2009). Hoja topográfica No. 84IVC del departamento de Bolívar. Escala 1:25.000. Bogotá.

- Izquierdo, G., Aragón, A. y Viggiano, C. (2008). Microtermometría de inclusiones fluidas en ambientes hidrotermales. Caso de estudio del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS México. Boletín IIE: 95-101.
- Kassem, T., y Arango, J. (1977). Mapa fotogeológico de la Serranía de San Lucas. Escala 1:500.000. INGEOMINAS.
- Kumral, M., Kabiru, M., Aydogan, M., Kocaturk, H. y Unluer, A. (2022). The Soma polymetallic hydrothermal Pb–Zn–Cu ( $\pm$  Mo  $\pm$  Ag  $\pm$  Au) mineralizations in the south of Biga Peninsula, NW Turkey: constraints from mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion data. *Arabian Journal of Geosciences* 15(1172). 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10412-y>
- Mantilla, L., Clavijo, J., Pinto, J., Quintero, I., Pérez, A., Páez, L., Correa, K., García, C., Serrano, J., Casas, R., Niz, D., Castellanos, O., Bernal, L., Osorio, J., Castro, E., Ibáñez, D. y López, E. (2006). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la Serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 95 (Bocas del Rosario): Aporte al conocimiento de su evolución geológica. Memoria explicativa de la plancha 64 – Barranco de Loba. INGEOMINAS.
- MINERALCO S.A. (1997). Cartografía geológica, prospección geoquímica y mapa metalogénico: área del aporte 1237 MINERALCO, departamento de Bolívar. INGEOMINAS.
- Morad, S., El-Ghali, M., Caja, M., Sirat, M., Al-Ramadan K., and Mansurbeg, H. (2010) Hydrothermal alteration of plagioclase in granitic rock from Proterozoic basement of SE Sweden. *Geological Journal* 45(2010), 105-116. <https://doi.org/10.1002/gj.1178>
- Muñoz, R. (1993). *Informe técnico de avance de mineralizaciones filonianas auríferas en la franja entre San Martín de Loba, Río Viejo y Barranco de Loba*. MINERALCO S.A.

- Murillo, A. (1991). *Historia del poblamiento en el Sur de Bolívar*. Documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES).
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J., French, D. y Walshe, J. (2014). The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews* 61(2014), 1-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Primera Edición. Springer.
- Ramanaidou, E. y Wells, M. (2014). Sedimentary Hosted Iron Ores. En Holland, H. y Turekian, K. (2014). *Treatise on Geochemistry* (pp. 313-355). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01115-3>
- Ramos, A. (2015). Metalogenia: introducción al estudio de inclusiones fluidas en minerales [Diapositivas de PowerPoint]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Restrepo, J. and Toussaint, J. (1988). Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes*, 7(3), 189-193.
- Rey, J. (2008). *La explotación minero-aurífera ilegal en el Sur de Bolívar colombianos; análisis en el distrito minero de Santa Rosa (2002-2008)* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Rong, J. and Wang, F. (2016). *Metasomatic Textures in Granites: Evidence from Petrographic Observation*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0666-1>
- Royero, J., y Clavijo, J. (2000). Mapa geológico generalizado del departamento de Bolívar. Escala 1:400.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS.
- Serrano, J. (2006). *Estudio de inclusiones fluidas en materiales de rellenos de venas en la Serranía de San Lucas (Planchas 55, 64, 85 y 96): inventario preliminar de sus eventos*

*paleohidrotermales* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2019). *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio. Santa Rosa del Sur (Bolívar)*. Primera edición. Imprenta Nacional de Colombia.

Severin, K. (2004). *Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals*. Kluwer Academic Publishers.

UPME. (2020). *Sistema de información minero colombiano: Cifras sectoriales – Oro*. <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>

Velasco, F. (2004). Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. *XXIII Curso Latinoamericano de Metalogénia*. Mendoza, Argentina.

Welton, J. (2003). *SEM petrology atlas. Chevron Oil Field Research Company*. The American Association of Petroleum Geologists (AAPG).

Whitney, D. and Evans, B. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

Wilkinson, J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(2001), 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

Yang, Y., Ye, L., Cheng, Z. y Bao, T. (2013). Origin of fluids in the Hetaoping Pb–Zn deposit, Baoshan–Narong–Dongzhi block metallogenic belt, Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73(2013), 362-371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.036>