

Estudio mineralógico-petrográfico y microtermométrico en estructuras hidrotermales presentes en roca metamórficas del Complejo Cajamarca del Pozo Nereidas-1 (Caldas, Colombia)

Luis Fernando Cantillo Mantilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Doctor en Ciencias Geológicas

Codirector

Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez

Magíster en Enseñanza de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A mi madre Ruth, por su amor incondicional, su apoyo constante y su fortaleza, que me han inspirado a lo largo de este camino. A mi hermano Miguel, por ser mi compañero y mi guía en cada etapa de mi vida. A mi novia María Claudia, por su paciencia, cariño y por estar a mi lado en los momentos más difíciles y en los más felices.

A mis amigos, por compartir esta experiencia y por ser un pilar de apoyo y motivación en cada paso de mi formación. A mis profesores, por sus enseñanzas, dedicación y por transmitirme el amor por el conocimiento, que me ha permitido llegar hasta aquí.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

A la empresa CHEC y al geólogo Julián López, por facilitarme las muestras necesarias para el desarrollo de esta investigación. Su apoyo ha sido fundamental para alcanzar los objetivos propuestos.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme su respaldo y recursos, en especial por el acceso a su infraestructura para la elaboración de las secciones delgadas y secciones doblemente pulidas. Su colaboración ha sido clave para el avance técnico de este trabajo.

Al laboratorio de Difracción de Rayos X, por el valioso análisis de mis muestras, que permitió obtener información crucial para la comprensión de los resultados.

A mi director y codirector de tesis, por su invaluable orientación a lo largo de este proceso. Gracias por sus correcciones, enseñanzas y paciencia.

A mi familia, pareja y amigos, por estar siempre a mi lado, por su aliento constante y por creer en mí en todo momento. Gracias por su comprensión y apoyo incondicional, que me motivaron a seguir adelante. Y por último al señor Rafael Dudamel por enseñarme que lo imposible es posible.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos .....	14
2. Metodología.....	14
2.1 Revisión de Núcleos .....	15
2.2 Fase de Laboratorio .....	16
2.2.1 Análisis de Microscopía Óptica .....	16
2.2.2 Análisis Microtermométricos en IF.....	17
2.2.3 Análisis de Difracción de Rayos X (DRX).....	19
3. Marco Teórico.....	20
3.1 Inclusiones fluidas .....	20
3.1.1 Tipos de inclusiones .....	21
3.2 Venas Hidrotermales .....	23
3.3 Microtermometría.....	26
3.4 Skarn.....	27
4. Antecedentes y Contexto Geológico.....	31
4.1 Aspectos Generales del Área de Estudio .....	31
4.2 Contexto Geológico Regional y Local .....	32
4.3 Geología del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR) .....	38
4.4 Sistema Geotermal Actual .....	39

5. Resultados.....	42
5.1 Caracterización Litológica de los Núcleos del Pozo Nereidas-1 .....	42
5.1.1 Segmento 1 (3026-4017 ft).....	44
5.1.2 Segmento 2 (4017-4509.7 ft) .....	47
5.2 Caracterización Petrográfica de las litologías presentes en el Pozo Nereidas-1 .....	51
5.2.1 Muestra LFC #3.....	51
5.2.2 Muestra LFC #4.....	53
5.2.3 Muestra LFC #5.....	55
5.3 Difracción de Rayos X (DRX).....	59
5.4 Inclusiones Fluidas .....	60
5.5 Microtermometría de Inclusiones Fluidas .....	65
6. Interpretación de Resultados.....	67
6.1 Venas Hidrotermales .....	68
6.2 Alteración propilítica.....	69
6.3 Skarn.....	70
6.4 Eventos Paleohidrotermales.....	72
7. Discusión .....	74
8. Conclusiones.....	77
9. Recomendaciones.....	78
Referencias Bibliográficas.....	79

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Condiciones de registro de la prueba de DRX</i> .....	20
Tabla 2. <i>Tabla resumen de los tipos de inclusiones fluidas observadas</i> .....	60
Tabla 3. <i>Datos microtermométricos. Abreviaturas tomadas de Bakker (2011). Te: temperatura eutéctica Tm (Ice): temperatura fusión final Th: Temperatura de homogenización</i> . ....	66
Tabla 4. <i>Tabla resumen de los contextos paragenéticos asociados a los diferentes eventos hidrotermales reconocidos</i> .....	74

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Fase metodológica Revisión de Núcleos. A. Disposición original de los núcleos seleccionados. B. Profundidad de extracción de los núcleos seleccionados. ....</i>	15
Figura 2. <i>Lupa binocular NIKON NI-150 MODELO C-PS para la descripción macroscópica de muestras. Laboratorio de lupas, Escuela de Geología, (UIS).....</i>	16
Figura 3. <i>Microscopio óptico de luz transmitida NIKON E200 POL. ....</i>	17
Figura 4. <i>Platina de enfriamiento y calentamiento THMS 600 marca LINKAM, acoplada a un Microscopio de Luz transmitida marca NIKON ELIPSE 50i. Laboratorio de Geología, UIS-sede Guatiguará, Piedecuesta. ....</i>	18
Figura 5. <i>Microscopio óptico ZEISS / AXIOLAB RE.....</i>	19
Figura 6. <i>Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias. Tomado de Viñuela &amp; Sánchez (1991). ....</i>	22
Figura 7. <i>Esquema que ilustra la relación existente entre el tipo de vena, la localización de los planos de crecimiento y el número de eventos de sellado de grietas. Tomado de Bons et al. (2012). ....</i>	25
Figura 8. <i>Diagramas ternarios de las composiciones de granate y piroxeno de los principales tipos de skarn. Miembros finales: Ad = andradita, Di = diópsido, Gr = grosularia, Hd = hedenbergita, Jo = johannsenita, Piralspita = piropo + almandino + espesartina. Tomado de Meinert et al. (2005). ....</i>	29
Figura 9. <i>Etapas evolutivas de un skarn en función del tiempo y la temperatura. Tomado de Pirajno (2008). ....</i>	30

Figura 10. <i>Mapa de localización geográfica del pozo Nereidas-1. A. Localización de la Provincia Volcano Tectónica San Diego – Cerro Machín (PVTSC) en la Cordillera Central de Colombia (rectángulo rojo). Tomado de Toro et al., (2010). B. Localización del pozo Nereidas-1. Tomado de Google Earth (2024). C. Mapa de Terrenos de Colombia. Tomado de Restrepo y Toussaint (2020). D. Mapa de Terrenos de Colombia. Tomado de Cediel et al. (2003).</i> .....	31
Figura 11. <i>Columna estratigráfica del Pozo Nereidas-1, con la ubicación de las unidades delimitadas para el Complejo Cajamarca por Monsalve et al (1998). Modificado de Monsalve et al. (1998).</i> .....	35
Figura 12. <i>Mapa geológico del área de interés. Modificado de INGEOMINAS (1998), plancha 225 Nevado del Ruiz.</i> .....	36
Figura 13. <i>Fotografía tomada de Google Earth que muestra la proximidad de los eventos paleohidrotermales reportados en la zona con respecto al Pozo Nereidas-1. A. Diferentes tipos de vetas y dique intruyendo esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca en Líbano, Tolima. Tomado de Angeé (2022).</i> .....	37
Figura 14. <i>Perfil de la estructura volcánica del Ruiz, ilustrando la posible distribución de fluidos. Tomado de Giggenbach et al. (1990).</i> .....	41
Figura 15. <i>Columna estratigráfica del Pozo Nereidas-1, con la ubicación de los segmentos analizados. Modificado de Monsalve et al. (1998).</i> .....	44
Figura 16. <i>Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LCF #1 (3026-4017 ft).</i> .....	46
Figura 17. <i>Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #2 (3026-4017 ft).</i> .....	47

Figura 18. Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #3 (4017-4509.7 ft).....	48
Figura 19. Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #4 (4017-4509.7 ft).....	49
Figura 20. Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #5 (4017-4509.7 ft).....	50
Figura 21. Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #3 (4017-4509.7 ft). ....	53
Figura 22. Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #4 (4017-4509.7 ft). ....	55
Figura 23. Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #5 (4017-4509.7 ft). ....	58
Figura 24. Patrón de difracción de rayos x de la muestra LFC #5, los picos señalados corresponden a los picos más altos de la andradita. A. Cristal de granate en nicoles paralelos. B. Cristal de granate en nicoles cruzados. ....	59
Figura 25. Inclusión fluida afectada por el fenómeno "necking-down".....	61
Figura 26. Aspecto general de las IF tipo AIF# 1 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 1.....	62
Figura 27. Aspecto general de las IF tipo AIF# 2 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 1.....	63
Figura 28. Aspecto general de las IF tipo AIF# 3 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 2.....	64

Figura 29. <i>Aspecto general de las IF tipo AIF# 4 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 2.</i> .....	65
Figura 30. <i>Morfología general de los cristales de cuarzo en las venas asociadas a las muestras LFC #1 y #2.</i> .....	68
Figura 31. <i>Tipología de las alteraciones hidrotermales reconocidas en la muestra LFC #4.</i> .....	70
Figura 32. <i>Tipología de la mineralogía tipo skarn reconocidas en la muestra LFC #5.</i> .....	72

## Resumen

**Título:** Estudio mineralógico-petrográfico y microtermométrico en estructuras hidrotermales presentes en la Complejo Cajamarca, Pozo Nereidas-1 (Caldas, Colombia).\*

**Autor:** Luis Fernando Cantillo Mantilla\*\*

**Palabras Clave:** Volcán Nevado del Ruiz, Nereidas-1, Complejo Cajamarca, eventos hidrotermales, Skarn.

**Descripción:** El pozo geotérmico Nereidas-1, ubicado en el departamento de Caldas, en cercanías del Volcán Nevado del Ruiz, es objeto de estudio debido a su relevancia dentro del contexto de exploración geotérmica en Colombia. En este trabajo se realizó un relageo detallado de una sección del pozo (concretamente en el rango de profundidad de 3026,0 a 4509,7 ft), en donde predominan rocas metamórficas de edad Mesozoico, agrupadas dentro de unidad denominada Complejo Cajamarca.

El estudio realizado en el pozo Nereidas-1, con especial énfasis en la evolución hidrotermal registrada en sus núcleos de rocas, permitió reconocer, al menos, tres eventos paleo-hidrotermales que afectaron a las litologías de la formación Cajamarca, con posterioridad a su pico de metamorfismo (de unos 230 Ma). Estos tres eventos paleo-hidrotermales son los siguientes: (1) Un evento hidrotermal de tipo 'silicificación', reconocido en núcleos de rocas recuperados de profundidades entre 3026,0 y 4017,0 ft, representados fundamentalmente mediante la presencia de estructuras de relleno hidrotermal tipo venas; (2) Un segundo evento hidrotermal de tipo propilítico, reconocido en núcleos de roca colectados de profundidades entre 4017,0 y 4509,7 ft y; (3) un tercer evento de tipo magmático-hidrotermal, generador de una mineralogía tipo skarn (concretamente un exo-skarn), identificado en los núcleos recuperados de la parte más profunda de la perforación (a unos 4509,7 ft). Los estudios microtermométricos en inclusiones fluidas en las venas de cuarzo asociadas al evento hidrotermal (1), permitieron determinar que éste se relacionó con la percolación de fluidos de tipo acuoso-salinos (H<sub>2</sub>O-NaCl), con temperaturas entre 225 y 320°C.

Debido a que el estudio se realizó a partir de núcleos colectados en campañas pretéritas, no se pudo determinar la presencia o ausencia de algún evento hidrotermal activo en curso en el pozo Nereidas-1. No obstante, su presencia se infiere, debido a la existencia de algunos óxidos-hidróxidos, presentes en los núcleos de rocas a manera de pátinas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Doctor en Ciencias Geológicas. Codirector: Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez. Magíster en Enseñanza de Ciencias Exactas y Naturales

### Abstract

**Title:** Mineralogical-petrographic and microthermometric study of hydrothermal structures in metamorphic rocks of the Cajamarca Complex of the Nereidas-1 well (Caldas, Colombia).\*

**Author(s):** Luis Fernando Cantillo Mantilla.\*\*

**Key Words:** Nevado del Ruiz Volcano, Nereidas-1, Cajamarca Complex, hydrothermal events, Skarn.

**Description:** The Nereidas-1 geothermal well, located in the department of Caldas near the Nevado del Ruiz volcano, is studied for its significance in Colombia's geothermal exploration context. This work involves a detailed relogging of a section of the well (specifically between 3026,0 and 4509,7 ft), where Mesozoic-age metamorphic rocks dominate, grouped within the Cajamarca Complex unit. The study, focusing on the hydrothermal evolution recorded in the well's rock cores, identified at least three paleo-hydrothermal events that affected the lithologies of the Cajamarca Formation following its metamorphic peak (approximately 230 Ma). These events are: (1) a silicification-type hydrothermal event, identified in rock cores from depths between 3026,0 and 4017,0 ft, primarily represented by vein-like hydrothermal infill structures; (2) a propylitic-type hydrothermal event, observed in cores collected between 4017,0 and 4509,7 ft; and (3) a magmatic-hydrothermal event generating skarn-type mineralogy (specifically an exo-skarn), identified in the deepest cores recovered (around 4509,7 ft). Microthermometric analyses of fluid inclusions in the quartz veins associated with the first hydrothermal event determined that the event was linked to the percolation of aqueous-saline fluids (H<sub>2</sub>O-NaCl), with temperatures ranging from 225 to 320°C. Given that the study utilized cores collected during previous campaigns, it was not possible to confirm the presence of any active hydrothermal event currently occurring in the Nereidas-1 well. However, evidence suggests its potential presence, as indicated by the occurrence of oxide-hydroxide traces on the rock cores.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Geology Program. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. PhD in Geological Sciences. Co-director: Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez. M.Sc. in Natural Sciences Teaching.

## Introducción

Las rocas del Complejo Cajamarca, que conforman parte del basamento metamórfico de la Cordillera Central de Colombia, están compuestas principalmente por esquistos cuarzo-sericíticos y actinolíticos, filitas, cuarcitas y mármoles (Maya y González, 1995). El pico de metamorfismo de estas litologías ha sido datado mediante U-Pb en ~230 Ma (Triásico Tardío), desarrollado en un contexto geológico de supra-subducción andino (Restrepo *et al.*, 2011). Estas rocas muestran evidencias de inyecciones magmáticas y percolación de fluidos hidrotermales epigenéticos, los cuales han desarrollado localmente, en sectores puntuales de la cordillera Central y del Valle del Cauca, mineralizaciones de metales preciosos y base (Castaño-Dávila *et al.*, 2019; Cediell y Shaw, 2019).

Entorno al edificio volcánico del Nevado del Ruiz, se reportan la existencia de procesos hidrotermales activos (Ortiz-González, 2023). Esto último, estimuló la necesidad de estudiar el potencial geotermal de esa área, para lo cual se perforó el Pozo Nereidas-1, el cual alcanzó una profundidad de 4817 pies (1468,2 metros).

Los núcleos de las rocas recuperadas del Pozo Nereidas-1, fueron estudiados en el marco del presente trabajo de tesis de pregrado ‘modalidad investigación’, para identificar eventos hidrotermales anteriores al evento hidrotermal activo presente. Con el propósito de documentar la evolución hidrotermal de ese sistema rocoso en el tiempo (concretamente con posterioridad al pico de metamorfismo hasta el presente). Se realizaron estudios mineralógico-petrográficos y microtermométricos en inclusiones fluidas, con un especial enfoque en aquellos tramos de rocas con evidencias macroscópicas de haber sido afectadas por antiguos procesos hidrotermales.

Los estudios anteriormente mencionados permitieron reconocer tres eventos paleo-hidrotermales. Estos eventos paleo-hidrotermales dieron lugar a: (a) alteraciones de tipo silicificación; (b) alteraciones de tipo propilítica y; (c) alteraciones calco-silicatadas que dieron origen a una mineralogía tipo skarn. Éste último evento se considera indicador de procesos magmático-hidrotermales recientes (Neógeno?), cuya mineralogía suele estar asociada a potenciales mineralizaciones de Fe-Cu±Au.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar la evolución del sistema geotermal asociado al pozo Nereidas-1 (Nevado del Ruiz), a partir del análisis mineralógico-petrográfico de los productos de la interacción fluido-roca.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar análisis petrográficos en inclusiones fluidas para clasificar los diferentes tipos de inclusiones fluidas para así comprender los distintos eventos geotermales que afectaron la zona.

Ejecutar estudios microtermométricos para poder caracterizar los paleofluidos hidrotermales según sus propiedades físicas (temperatura y/o presión) y químicas (composición).

Efectuar análisis petrográficos de las muestras extraídas del pozo Nereidas-1 con el propósito de describir las diferentes variedades litológicas presentes en las muestras.

Caracterizar e identificar minerales haciendo uso de herramientas como Difracción de Rayos X (DRX) o mineralogía óptica (petrografía).

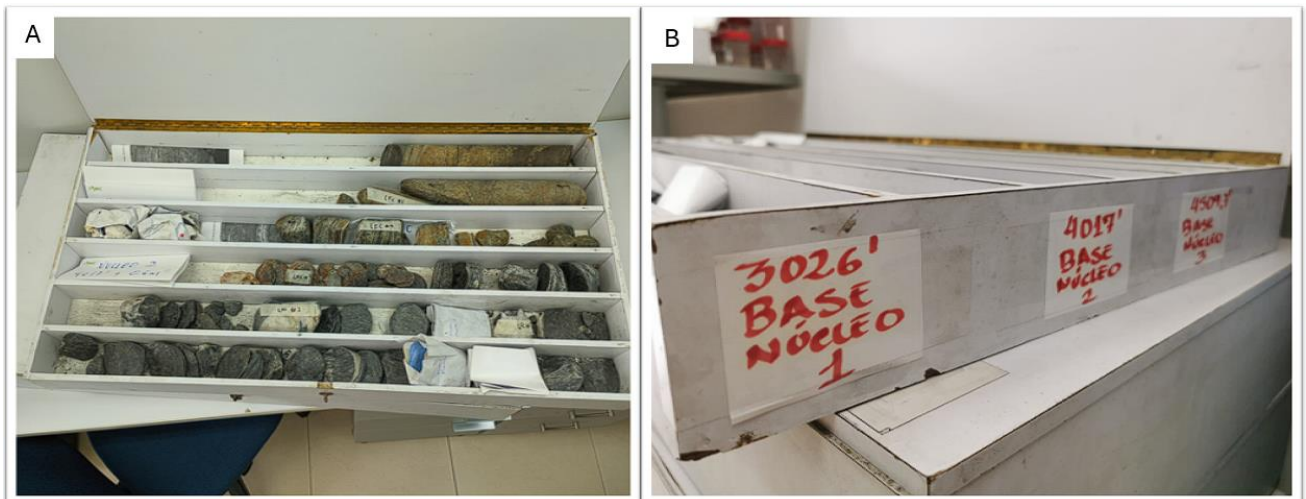
## **2. Metodología**

## 2.1 Revisión de Núcleos

Durante esta fase del estudio, se realizó una visita a las oficinas de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) en la ciudad de Manizales. La CHEC es una empresa dedicada a la generación y distribución de energía eléctrica en la región, con un interés particular en el desarrollo de proyectos geotérmicos. El propósito de la visita fue acceder a los núcleos de perforación proporcionados por la CHEC, los cuales son clave para el análisis geológico en el marco de esta investigación. Las muestras se seleccionaron con base en la variabilidad litológica observada, las profundidades alcanzadas por las perforaciones y la presencia de evidencia de eventos paleohidrotermales. Aunque no se dispone de la profundidad exacta de las muestras seleccionadas, como se muestra en la figura 1, sí se cuenta con rangos de profundidad estimados, así como con su posición original.

### Figura 1.

*Fase metodológica Revisión de Núcleos. A. Disposición original de los núcleos seleccionados. B. Profundidad de extracción de los núcleos seleccionados.*



## 2.2 Fase de Laboratorio

### 2.2.1 *Análisis de Microscopía Óptica*

Se realizaron análisis de microscopía óptica para identificar y caracterizar las fases minerales presentes en las litologías estudiadas, así como para determinar sus contextos paragenéticos y características texturales. La descripción macroscópica de las muestras se llevó a cabo utilizando una lupa binocular NIKON N1-150, modelo C-PS (figura 2), en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Geología.

#### **Figura 2.**

*Lupa binocular NIKON N1-150 MODELO C-PS para la descripción macroscópica de muestras. Laboratorio de lupas, Escuela de Geología, (UIS).*



Para el estudio de secciones delgadas, se empleó un microscopio óptico de luz transmitida NIKON E200 POL (figura 3), disponible en el laboratorio de microscopía óptica (laboratorio 315).

**Figura 3.**

*Microscopio óptico de luz transmitida NIKON E200 POL.*

**2.2.2 Análisis Microtermométricos en IF**

Las mediciones microtermométricas se llevaron a cabo en el laboratorio del GIGBA (Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada) empleando una platina de enfriamiento y calentamiento THMS 600, marca LINKAM (figura 4), acoplada a un microscopio óptico ZEISS AXIOLAB RE (figura 5). Este equipo tiene un rango de operación de  $-198^{\circ}\text{C}$  a  $+600^{\circ}\text{C}$ , permitiendo registrar cambios de fase en inclusiones fluidas bajo condiciones controladas. Antes de las mediciones, el equipo fue calibrado utilizando patrones de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ .

En total, se analizaron 23 inclusiones fluidas. Las mediciones microtermométricas consistieron en enfriar cada muestra con nitrógeno líquido hasta alcanzar una temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente, las muestras fueron calentadas de manera controlada hasta  $0^{\circ}\text{C}$  para determinar la temperatura eutéctica y la temperatura de fusión final del hielo en las inclusiones fluidas. Después de esta etapa de enfriamiento, las muestras fueron sometidas a un calentamiento

progresivo hasta alcanzar la temperatura de homogenización, donde las dos fases presentes en las inclusiones (líquida y gaseosa) se unifican en una sola fase.

Todo el proceso de análisis microtermométrico se llevó a cabo en un periodo de dos semanas, garantizando el tiempo adecuado para la calibración del equipo, el enfriamiento, el calentamiento controlado y la correcta recolección de datos.

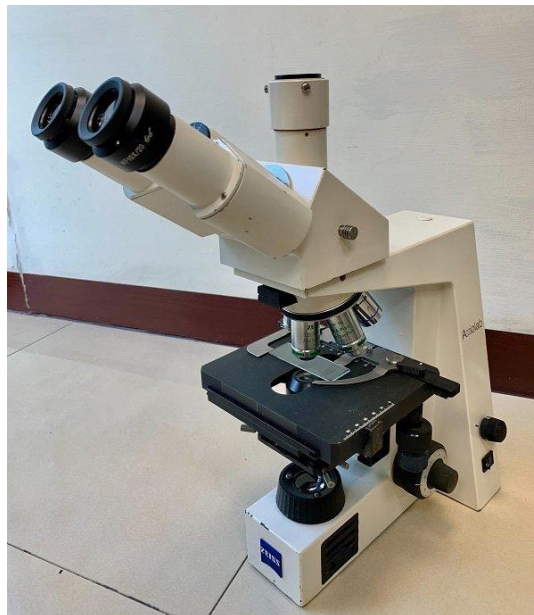
**Figura 4.**

*Platina de enfriamiento y calentamiento THMS 600 marca LINKAM, acoplada a un Microscopio de Luz transmitida marca NIKON ELIPSE 50i. Laboratorio de Geología, UIS-sede Guatiguará, Piedecuesta.*



**Figura 5.**

*Microscopio óptico ZEISS / AXIOLAB RE*

**2.2.3 Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)**

Los análisis de DRX se llevaron a cabo en el laboratorio de Difracción de Rayos X de la UIS (sede Guatiguará), parte del Grupo de Investigación en Química Estructural (GIQUE). El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las condiciones presentadas en la tabla 1. Se utilizó una porción de 4 g de muestra mineral, la cual fue secada, molturada y tamizada (malla 400, 38  $\mu\text{m}$ ). El análisis realizado fue de tipo cualitativo, con el fin de determinar los minerales presentes en la muestra.

**Tabla 1.***Condiciones de registro de la prueba de DRX.*

METODOLOGÍA DE TRABAJO		
Condiciones de Registro	El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:	
	Voltaje (kV)	40
	Corriente (mA)	40
	Rendija de Divergencia (mm)	0,6
	Rendijas Solter Primario (°)	2,5
	Rendijas Solter Secundario (°)	2,5
	Tamaño de Paso (° 2Theta)	0,02035
	Tiempo por paso (s)	1,2
	Rango de registro (° 2 Theta)	4,0 a 70,0
	Radiación	CuKα1
	Filtro	Niquel
	Uso de Anti-dispersor de Aire	Si
	Detector	Lineal LynxEye
	Tipo de barrido	A pasos
Observaciones	Ninguna	

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Inclusiones fluidas

El origen de un mineral se atribuye a una serie de procesos geológicos interconectados a lo largo del tiempo. Dentro de estos fenómenos geológicos, que pueden ser hidrotermales, magmáticos o metamórficos, desempeñan un papel crucial los fluidos, ya que durante el crecimiento de un cristal a partir de un fluido hidrotermal, pueden ocurrir la captura de soluciones en las imperfecciones de la estructura cristalina, y a medida que el cristal sigue desarrollándose, se forman espacios que se cierran y quedan encapsulados. Estas estructuras se conocen como inclusiones fluidas y se caracterizan por ocupar cavidades microscópicas, la mayoría de las cuales son menores de 100  $\mu\text{m}$ . Estas inclusiones fluidas pueden contener una o varias fases al mismo tiempo, ya que pueden presentarse en forma líquida, sólida y/o gaseosa (Viñuela & Sánchez, 1991).

A raíz de lo mencionado anteriormente, las inclusiones fluidas pueden y deben emplearse, tras un análisis petrográfico, para reconstruir las condiciones fisicoquímicas en las cuales se desarrolló el crecimiento de los cristales. Además, permiten realizar una caracterización química de los fluidos

a partir de los cuales se formaron los minerales que las albergan, o en algunos casos de los procesos posteriores a la formación del cristal (Camprubí, 2010).

### ***3.1.1 Tipos de inclusiones***

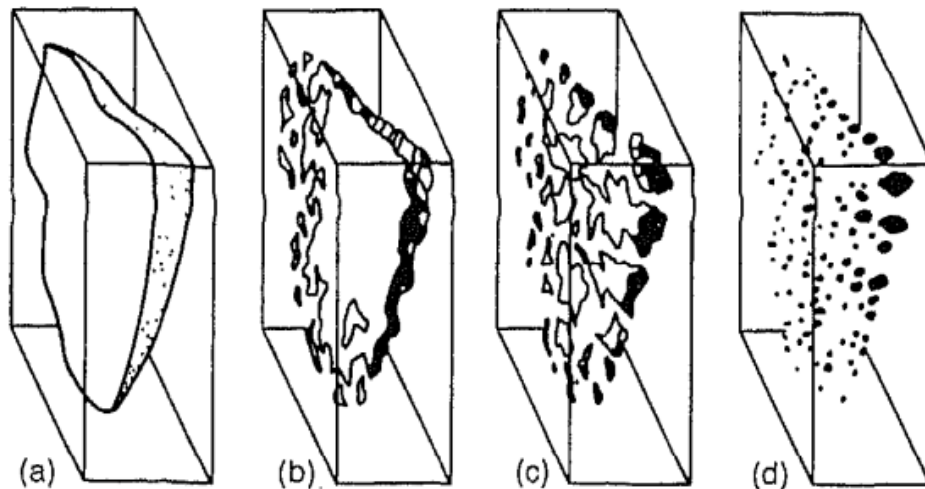
Las inclusiones fluidas se clasifican en:

**Inclusiones primarias:** Cuando los cristales crecen o experimentan una recristalización en un medio fluido de composición uniforme, surgen deformidades en su estructura de crecimiento que tienen la capacidad de retener pequeñas porciones de dicho fluido. Cuando estas deformidades se cierran o sellan, dan origen a la formación de inclusiones fluidas primarias. Estas inclusiones se encuentran ubicadas en las áreas donde las caras, aristas y vértices del cristal están avanzando. Estas inclusiones fluidas primarias son particularmente significativas, ya que proporcionan información representativa de las condiciones termodinámicas que prevalecían en el momento en que se atraparon (Viñuela & Sánchez, 1991).

**Inclusiones Secundarias:** Este grupo abarca todas las inclusiones que se forman después de la cristalización inicial del mineral (Viñuela & Sánchez, 1991). Por ejemplo, cuando un cristal se fractura en presencia de un fluido que aún tiene capacidad de disolución, este fluido penetra en la fractura e inicia un proceso de disolución y recristalización del mineral. En este proceso, la superficie del mineral se reduce y se forman inclusiones secundarias que quedan atrapadas en el interior del cristal (ver figura 6).

**Figura 6.**

*Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias. Tomado de Viñuela & Sánchez (1991).*



Wilking y Barkas (1978) han clasificado las inclusiones secundarias en dos categorías: aquellas que se originan debido a la deformación frágil, como la cicatrización de fracturas, y aquellas que resultan de un proceso de deformación dúctil. Para las inclusiones formadas durante la deformación dúctil, Wilking propuso el término "inclusiones de exsolución". Estas inclusiones se generan a través de la migración de fluidos durante los procesos de deformación dúctil. Estos nuevos fluidos pueden provenir tanto del exterior del cristal como de una liberación del fluido original.

**Inclusiones Pseudosecundarias:** Cuando un cristal se quiebra durante su crecimiento, los fluidos ingresan en la fractura y quedan encapsulados en el interior del cristal. Estas inclusiones, que se forman como resultado de este proceso, se denominan inclusiones pseudosecundarias. Estas inclusiones representan estados intermedios entre las inclusiones primarias y secundarias (Viñuela & Sánchez, 1991).

Las inclusiones primarias y pseudosecundarias reflejan la presencia de fluidos durante el proceso de crecimiento del cristal, en contraste con las inclusiones secundarias que indican soluciones que se incorporaron después y que posiblemente no están relacionadas con los fluidos responsables del crecimiento inicial del cristal. La diferenciación entre inclusiones primarias y secundarias puede ser compleja, ya que sus características no siempre son completamente distintivas. Generalmente las inclusiones primarias tienden a estar aisladas o siguen los planos cristalográficos, mientras que las inclusiones secundarias se encuentran a lo largo de fracturas que han experimentado recristalización (Viñuela y Sánchez, 1991).

Las inclusiones primarias en cristales idiomorfos se presentan de manera aislada y adoptan formas características. Estas inclusiones primarias están dispuestas de acuerdo con las superficies de crecimiento del mineral encajante (Viñuela y Sánchez, 1991).

Por otro lado, las inclusiones pseudosecundarias exhiben una orientación diferente en comparación con las inclusiones primarias, pero en términos cronológicos, se formaron todas ellas dentro de las zonas de crecimiento del cristal. En cambio, las inclusiones secundarias atraviesan el cristal con orientaciones irregulares y no siguen un patrón coherente (Viñuela y Sánchez, 1991).

### **3.2 Venas Hidrotermales**

Las venas se definen como agregados minerales que precipitaron de un fluido en sitios de dilatación. Las venas son estructuras extremadamente importantes por una variedad de razones, son casi omnipresentes en las rocas y a menudo son fácilmente reconocibles en el campo por el contraste de color distintivo de los minerales de la vena y su roca anfitriona. Representan fases de actividad geológica que ocurrieron después de la formación de la roca anfitriona y, por lo tanto, son útiles para desentrañar la historia geológica de esa roca anfitriona. La forma, orientación y estructuras internas de las venas revelan información sobre los campos de paleoesfuerzo, la

cinemática de deformación (por ejemplo, cizalla pura versus cizalla simple) y la presión de fluidos (Bons *et al.*, 2012).

Las venas se caracterizan según una serie de propiedades, tales como la textura de los cristales (*blocky*, fibrosos, etc.) y la dirección de crecimiento (por ejemplo, desde la pared de la vena hacia su interior o en dirección opuesta). Siguiendo este orden de ideas, se pueden diferenciar tres tipos de venas:

- Venas Sintaxiales

Las venas sintaxiales son aquellas en las que los minerales que las rellenan crecen desde la roca de la pared de la veta. Típicamente, el crecimiento se produce desde ambos lados de la vena hacia el centro, aunque en algunos casos los cristales crecen únicamente desde un lado hacia el otro. Las venas sintaxiales pueden formarse a partir de un único evento de fracturación, que crea el espacio necesario para el crecimiento de los minerales (este espacio también puede ser generado por otros procesos, como la disolución). La nucleación continua de nuevos cristales suprime la forma alargada, y granos más equidistantes rellenan la veta, produciendo una textura tipo *blocky* (Bons *et al.*, 2012).

- Venas Antitaxiales

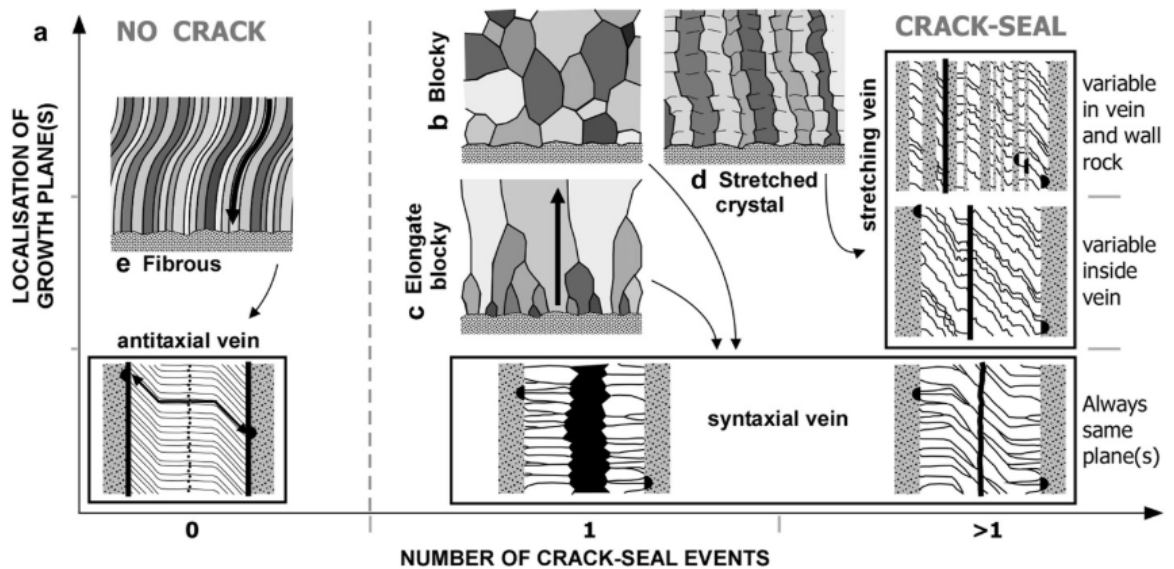
La característica distintiva de las venas antitaxiales es la presencia de una línea o zona mediana, que sirve como sustrato desde el cual los cristales de la vena crecen hacia fuera en ambas direcciones a medida que la vena se ensancha. Mientras que las venas sintaxiales y de estiramiento solo tienen un plano de crecimiento a la vez, las venas antitaxiales tienen dos, situados en la superficie exterior de la vena. Las venas antitaxiales suelen presentar cristales fibrosos con relaciones longitud/anchura a veces extremas, aunque los minerales que forman la vena (normalmente calcita) no suelen presentar este hábito (Bons *et al.*, 2012).

- Venas de Estiramiento

Las venas de estiramiento se forman por el sellado de grietas, donde el plano de la grieta no siempre coincide con el plano del material (figura 7). La diferencia con las venas sintaxiales es sutil: en las venas sintaxiales, la superficie de la grieta es el frente de crecimiento donde convergen los cristales en crecimiento de ambos lados, mientras que en las venas de estiramiento, la superficie de la grieta puede atravesar material previamente precipitado (venas de estiramiento localizadas) e incluso la roca de la pared (venas de estiramiento deslocalizadas). Como resultado, no hay una tendencia sistemática en la localización del nuevo material precipitado, y no hay competencia en el crecimiento (Bons *et al.*, 2012).

**Figura 7.**

*Esquema que ilustra la relación existente entre el tipo de vena, la localización de los planos de crecimiento y el número de eventos de sellado de grietas. Tomado de Bons et al. (2012).*



### 3.3 Microtermometría

El estudio de inclusiones fluidas presenta diversas aplicaciones, siendo una de las más destacadas y relevantes su utilización como paleogeotermómetros y paleogeobarómetros. Estas aplicaciones requieren la medición precisa de la temperatura en la que se producen los cambios de fase dentro de las inclusiones en respuesta a las variaciones térmicas y/o barométricas. Estos cambios de fase pueden abarcar transiciones entre estados sólidos, líquidos y gaseosos, dependiendo de la composición del fluido atrapado en las inclusiones (Ramos, 2007).

Esta técnica desempeña un papel fundamental dentro de varias disciplinas de la geología como lo puede ser la investigación académica relacionada a fluidos mineralizantes en diversos tipos de yacimientos minerales o en la exploración geotérmica. Esta técnica permite determinar varias variables de gran importancia dentro de las que destacan: la temperatura de homogeneización, la temperatura eutéctica, la composición de las fases de la inclusión y la salinidad del fluido (Camprubí, 2010).

Para llevar a cabo este análisis, se utiliza una configuración que combina un microscopio con una platina térmica, permitiendo así la realización de microtermometría. En la platina térmica se puede enfriar y calentar una muestra abarcando un rango de temperatura desde  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (punto de fusión del Nitrógeno líquido usado como refrigerante) hasta  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . y registrar la temperatura con una resolución de  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ramos, 2007).

La interpretación de estos análisis se basa en conceptos termodinámicos fundamentales que consideran a las inclusiones fluidas como sistemas diatérmicos, isocóricos e isopléticos. Estos términos se refieren a que las inclusiones están en equilibrio térmico con el cristal que las alberga, que su volumen permanece constante sin importar los cambios en presión y temperatura del mineral que las contiene y por último indica que la composición química de la

inclusión permanece constante al cambiar las condiciones externas, esto implica que el cristal actúa como una barrera impermeable a la difusión de especies químicas, asegurando que la composición química interna de la inclusión permanezca inalterada (Ramos, 2007).

### 3.4 Skarn

Los skarns son predominantemente rocas compuestas por minerales calcosilicatados, cuya formación resulta del reemplazo de litologías carbonatadas. Este proceso puede ocurrir tanto durante el metamorfismo regional o como consecuencia de procesos metasomáticos asociados con intrusiones ígneas. Aunque la mayoría se encuentran junto a plutones, también pueden aparecer a lo largo de fallas y zonas de cizalla importantes, en sistemas geotérmicos poco profundos, en el fondo marino y en profundidades de la corteza terrestre en terrenos metamórficos profundamente enterrados.

Desde una perspectiva mineralógica, los skarns se clasifican según su asociación con metales, dando lugar a diversas clases, entre las que se incluyen los skarns de Fe, skarns de Au, skarns de W, skarns de Cu, skarns de Zn-Pb, skarns de Mo y skarns de Sn (Pirajno, 2008).

Según Meinert *et al.* (2005) Las siete clases principales de skarn puede diferenciar de la siguiente manera:

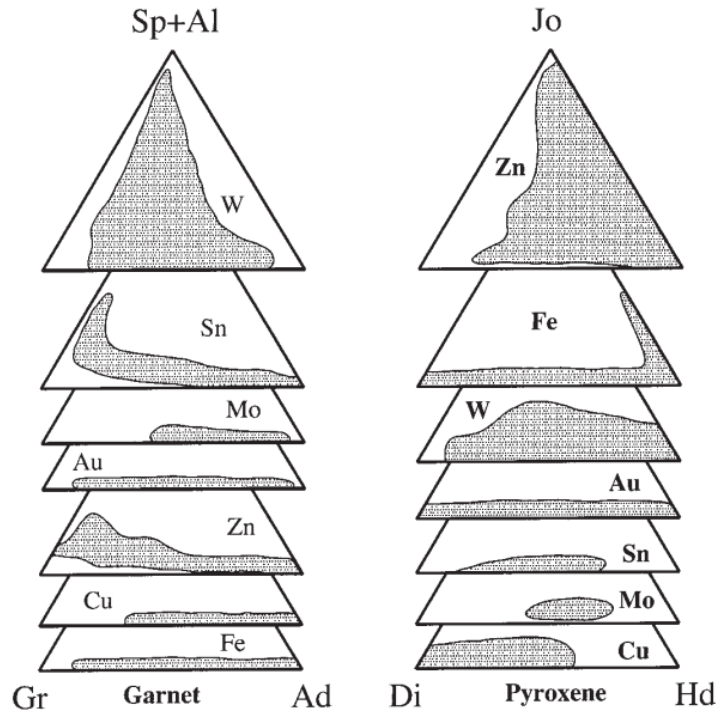
1. Skarns de hierro: Se explotan principalmente por magnetita y pueden contener Cu, Co, Ni y Au. El endoskarn puede ser más extenso que el exoskarn.
2. Skarns auríferos: Se encuentran en diversos entornos geológicos, son pequeños y se explotan solo por oro, con una asociación geoquímica Au-Bi-Te-As  $\pm$  Co característica.

3. Skarns de cobre: Asociados a plutones porfíricos calcoalcalinos de tipo I, tienen formación poco profunda y una mineralogía dominada por granate andradítico (figura 8).
4. Skarns de zinc: Se encuentran distalmente a rocas ígneas, explotados principalmente por Zn, y se caracterizan por una mineralogía rica en Mn y Fe.
5. Skarns de wolframio: Asociados a batolitos gruesos e inalterados con granate subcálcico como mineral característico.
6. Skarns de molibdeno: Relacionados con granitos leucocráticos, contienen varios minerales accesorios y una mineralogía dominada por piroxeno hedenbergítico.
7. Skarns de estaño: Casi exclusivamente asociados a granitos de alto contenido en sílice y caracterizados por un conjunto de oligoelementos distintivos y una etapa de alteración greisen.

**Figura 8.**

*Diagramas ternarios de las composiciones de granate y piroxeno de los principales tipos de skarn.*

*Miembros finales: Ad = andradita, Di = diópsido, Gr = grosularia, Hd = hedenbergita, Jo = johannsenita, Piralspita = piropo + almandino + espesartina. Tomado de Meinert et al. (2005).*



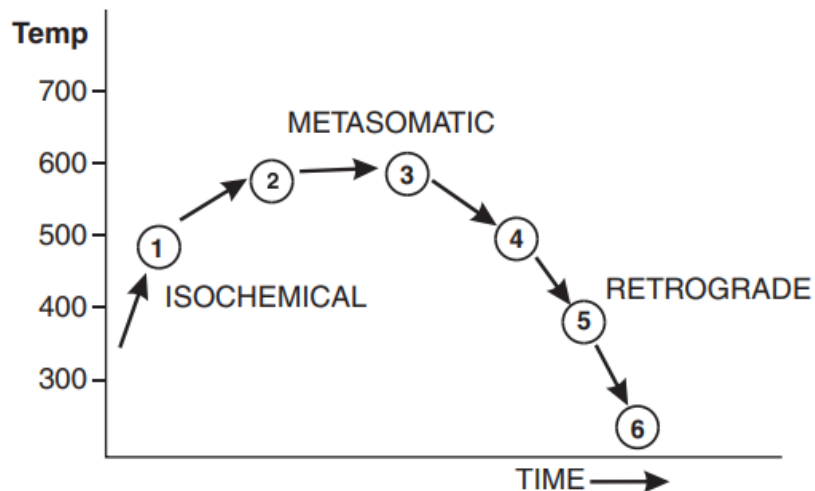
Los skarns se distribuyen en una variedad de entornos tectónicos donde ocurren tanto magmatismo como la formación de litologías carbonatadas. Meinert *et al.* (2005) identificaron cuatro escenarios tectónicos principales que influyen en la formación de skarns: la subducción oceánica empinada, donde se generan skarns de Fe, Cu y Au asociados con plutones de diorita y granodiorita; la subducción transicional de bajo ángulo, en la cual pueden formarse skarns de Mo y W-Mo relacionados con plutones de monzonita y granito; la subducción continental, responsable de la mayoría de los skarns que abarcan Zn-Pb, Cu, Au, W y Mo, generalmente asociados con plutones de granodiorita y granito; y el rift continental, donde se da la intrusión de plutones graníticos y la formación de skarns de Sn-W.

La génesis de los skarns está estrechamente ligada a una serie de procesos que están correlacionados con las fases magmáticas tardías e hidrotermales de un plutón intrusivo en rocas calcáreas. Durante el emplazamiento y enfriamiento del plutón, se desencadena un proceso de metamorfismo de contacto y metasomatismo en las rocas circundantes. Este fenómeno conlleva a etapas de metamorfismo isotérmico progrado y metasomatismo. A medida que el plutón se enfría hacia las etapas finales, se produce una fase retrógrada en la que los resultados de la alteración prograda son desmantelados y reemplazados por minerales hidratados.

En resumen, la formación de skarns puede ser entendida en tres etapas principales (figura 9): (1) metamorfismo térmico progrado isotérmico, (2) metasomatismo, y (3) alteración hidrotermal retrógrada (Pirajno, 2008).

### Figura 9.

*Etapas evolutivas de un skarn en función del tiempo y la temperatura. Tomado de Pirajno (2008).*



Los términos más comúnmente empleados al discutir sobre skarns son "endoskarns" y "exoskarns", los cuales se utilizan para describir la skarnificación de rocas ígneas o aluminosas, y rocas carbonatadas, respectivamente. Así mismo exoskarn y endoskarn también pueden referirse

a la ubicación del skarn en relación con el plutón causante (externo frente a interno), aunque esta distinción no tiene sentido cuando hay varios plutones o no hay rocas ígneas presentes. Además, se hace referencia al término "Skarnoid", el cual se utiliza para describir rocas que son ricas en granate y cuyo origen aún no está totalmente definido. Según Meinert *et al.* (2005), estas rocas pueden formarse a través del metamorfismo de litologías impuras.

#### 4. Antecedentes y Contexto Geológico

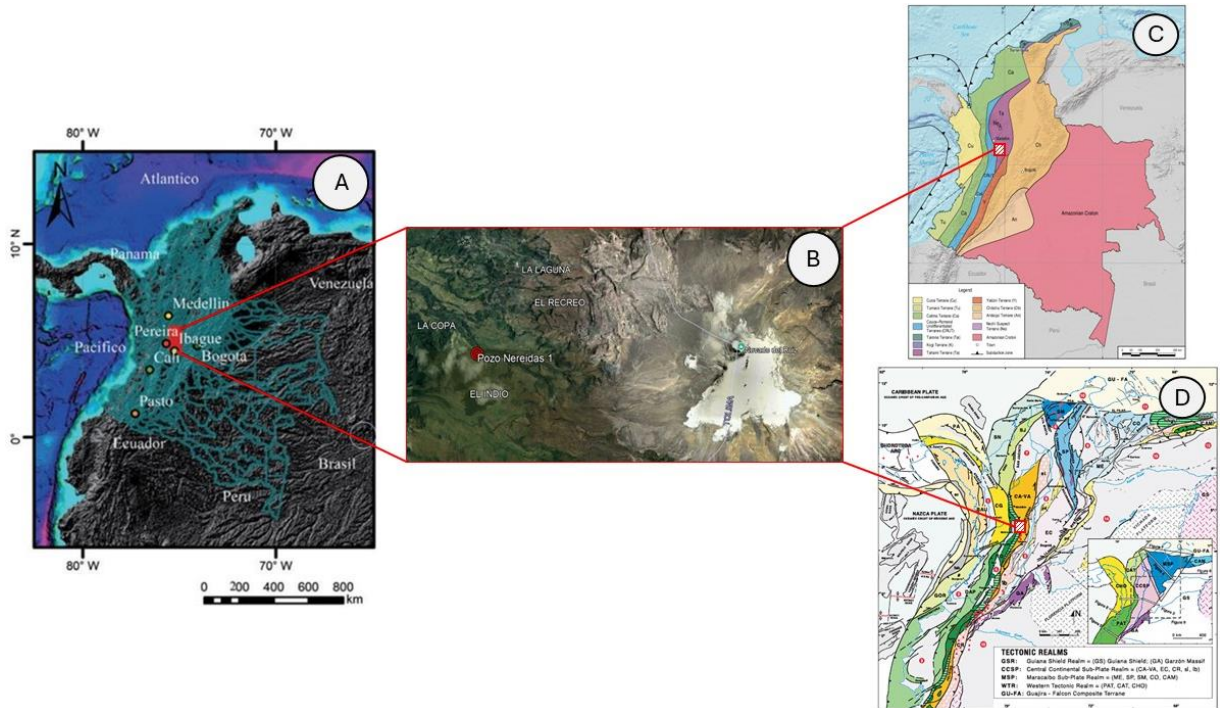
##### 4.1 Aspectos Generales del Área de Estudio

De manera regional, el área de estudio se localiza en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, en las cercanías del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR), dentro del Terreno Tahamí según el modelo de terrenos presentado por Restrepo-Toussaint (2020), o dentro del Terreno Cajamarca-Valdivia según el modelo de terrenos presentado por Cediel *et al.*, (2003) (figura 10). Las rocas del basamento que afloran en esta zona corresponden a la unidad geológica conocida como el Complejo Cajamarca, compuesta por esquistos, filitas, cuarcitas y mármoles. Estas litologías se relacionan con un evento orogénico de tipo Andino, desarrollado en la margen occidental de Pangea (Restrepo *et al.*, 2011).

##### **Figura 10.**

*Mapa de localización geográfica del pozo Nereidas-1. A. Localización de la Provincia Volcano Tectónica San Diego – Cerro Machín (PVTSC) en la Cordillera Central de Colombia (rectángulo rojo). Tomado de Toro et al., (2010). B. Localización del pozo Nereidas-1. Tomado de Google*

*Earth (2024). C. Mapa de Terrenos de Colombia. Tomado de Restrepo y Toussaint (2020). D. Mapa de Terrenos de Colombia. Tomado de Cediel et al. (2003).*



En cuanto al clima, el área de estudio está situada en un ambiente montañoso, característico de alta montaña, donde las precipitaciones son frecuentes y variables a lo largo del año. Villamaría, el municipio principal de la zona, presenta un clima húmedo, con temperaturas promedio que oscilan entre los 12°C y 18°C, dependiendo de la altitud. Las precipitaciones son abundantes, con un promedio anual superior a los 2000 mm (Ocampo *et al.*, 2019), lo que favorece la infiltración de agua en las formaciones geológicas y contribuye a la recarga del sistema hidrotermal.

#### 4.2 Contexto Geológico Regional y Local

Según González (2001), el Complejo Cajamarca se define como el conjunto de rocas metamórficas que conforman el núcleo de la Cordillera Central. Esta formación rocosa exhibe una notable diversidad en su composición, resultado de diversos episodios metamórficos regionales, a los cuales se superponen efectos térmicos o dinámicos locales de intensidad variable. A partir de

las características mineralógicas, González (2001) ha identificado tres grupos composicionales distintivos:

- (I) Grupo Básico: Esquistos verdes y anfibolitas.
- (II) Grupo Cuarzoso: Cuarzitas
- (III) Grupo Pelítico: Constituido por filitas, esquistos sericíticos y micáceos y metasedimentitas.

Las paragénesis metamórficas indican un bajo grado de metamorfismo predominante en facies esquistos verde, aunque ocasionalmente se encuentran rocas en facies de anfibolita en áreas locales. Los esquistos verdes son menos abundantes y se encuentran intercalados con los esquistos sericíticos. Por otro lado, la secuencia metasedimentaria exhibe un grado de metamorfismo inferior y aparentemente corresponde a la porción superior de la secuencia metamórfica. Este cambio en la intensidad del metamorfismo se atribuye a la posición estructural más elevada dentro de la secuencia sedimentaria original durante el proceso metamórfico (González, 2001).

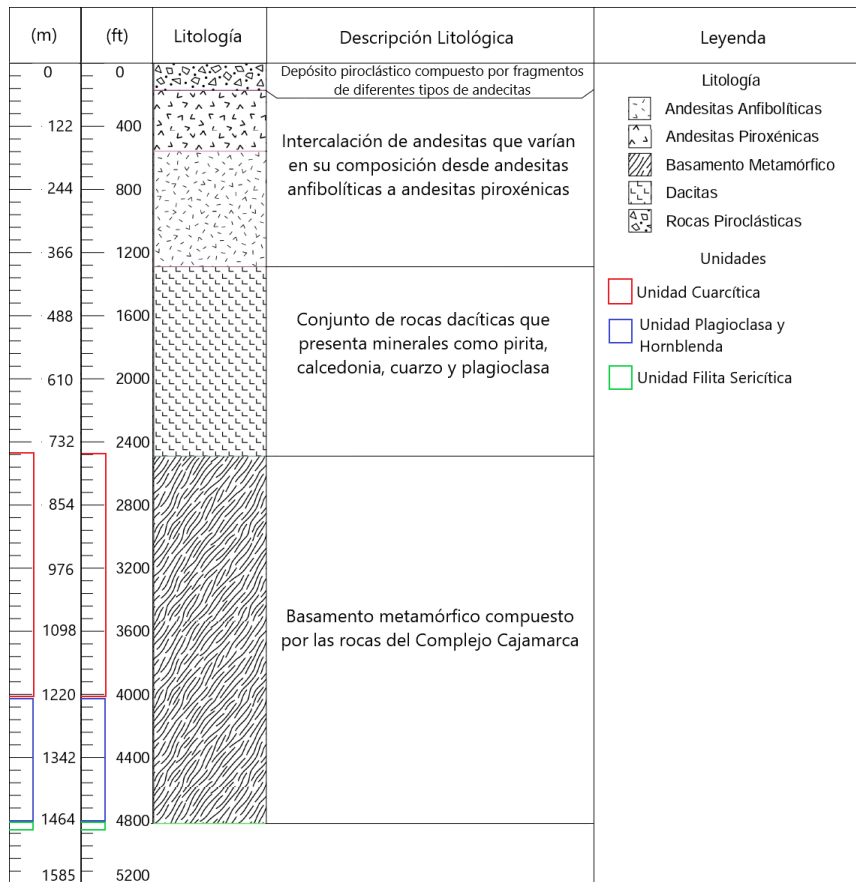
Según Monsalve *et al.* (1998) las litologías presentes del Complejo Cajamarca, cortadas durante la perforación del pozo Nereidas-1, corresponden a filitas, esquistos y neises. Estas rocas hacen parte del Grupo Pelítico descrito por González (2001) en el que se encuentran filitas y esquistos de variable composición.

Monsalve *et al.* (1998) delimita tres unidades que se correlacionan con el Complejo Cajamarca. La primera corresponde a la llamada “Unidad Filita Sericítica” esta se encuentra al final del pozo a una profundidad aproximada de entre 4814 y 4818 ft, está constituida por sericita, cuarzo, clorita, plagioclasa y calcita parcialmente alterada. Así mismo estas filitas muestran dos direcciones plegamiento y algunas estructuras secundarias como venas con mineralización de cuarzo, calcita, plagioclasa y pirita. Puede correlacionarse con el Grupo Pelítico definido por

González (2001). La segunda corresponde a la llamada Unidad de Plagioclasa y Hornblenda, encontrada entre 3940 y 4814 pies, la unidad se compone de gneises biotíticos y gneises calcosilicatados. Las rocas calcosilicatadas presentan diópsido, plagioclasa, hornblenda, epidota, granate en cantidades variables y esfena como mineral accesorio. El gneis biotítico se compone de abundante actinolita, biotita y plagioclasa. La turmalina y la esfena son minerales accesorios, con microvenas de adularia y albita. Puede correlacionarse con el Grupo Pelítico definido por González (2001). La tercera corresponde a la llamada “Unidad Cuarzítica” esta se encuentra entre 2490 y 3940 ft, está constituida por cuarcitas plegadas de color gris profundo a negro y esquistos grafíticos cuarzo-muscovíticos, con vetas de cuarzo y calcita, con capas intercaladas de esquistos grafíticos muscovíticos y tremolita-actinolita. Esta unidad puede correlacionarse con el Grupo Pelítico definido por González (2001) (figura 11).

**Figura 11.**

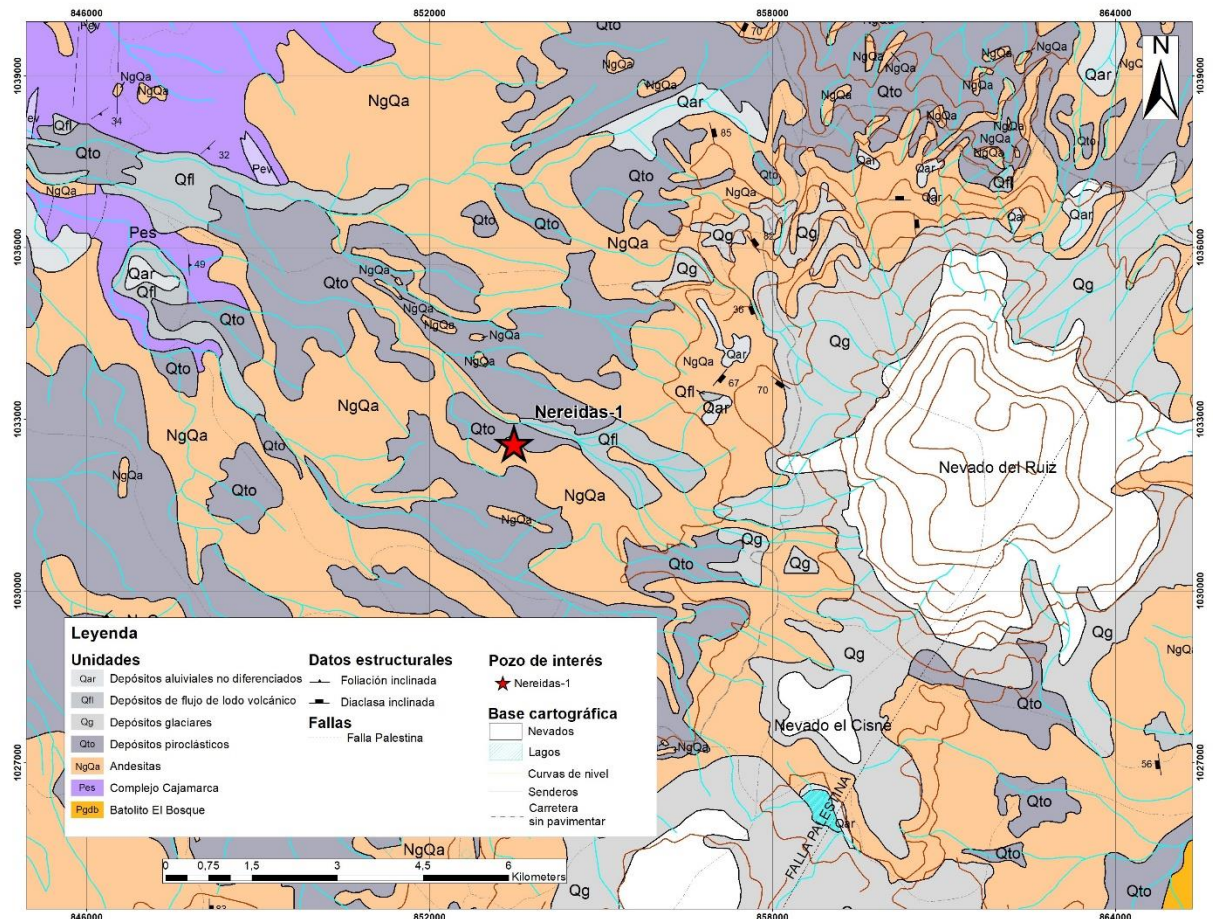
*Columna estratigráfica del Pozo Nereidas-1, con la ubicación de las unidades delimitadas para el Complejo Cajamarca por Monsalve et al (1998). Modificado de Monsalve et al. (1998).*



En cercanías del pozo Nereidas-1 se han reportado varias intrusiones ígneas, siendo las más relevantes el stocks de Manizales, el Batolito de El Bosque y el stock del Hatillo. Sin embargo, en la zona de trabajo aflora únicamente el cuerpo ígneo conocido como Batolito de El Bosque (figura 12).

**Figura 12.**

Mapa geológico del área de interés. Modificado de INGEOMINAS (1998), plancha 225 Nevado del Ruíz.



Según Bustamante *et al.* (2017), El Batolito de El Bosque y el Stock del Hatillo se definen como rocas calcoalcalinas con una clara afinidad hacia arco volcánicos. Las diferencias entre estos comienzan a aparecer al medir el Índice de Saturación de Alúmina (ASI), ya que las muestras del Hatillo recaen dentro del campo de las rocas metaluminosas aunque con una sutil tendencia al campo peraluminoso, mientras que las muestras estudiadas del Batolito del Bosque son claramente

peraluminosas. Así mismo dentro de este mismo estudio se llama la atención sobre la fuerte tendencia "tipo adakita" que presentan estas rocas.

Asociados a estos eventos ígneos, se pueden observar múltiples eventos paleohidrotermales, los cuales se evidencian por la presencia de venas con diversas composiciones. Estas venas tienen el potencial de contener mineralización económicamente significativa. Algunos ejemplos pueden ser:

En el campamento de Maltería (figura 13), cerca de Manizales, se observa una mineralización similar, a la anteriormente mencionada, en venas alojadas dentro del stock de Manizales. Estas vetas ricas en sulfuros atraviesan tanto el stock como las rocas metamórficas del basamento del terreno Cajamarca-Valdivia (Cediel y Shaw, 2019).

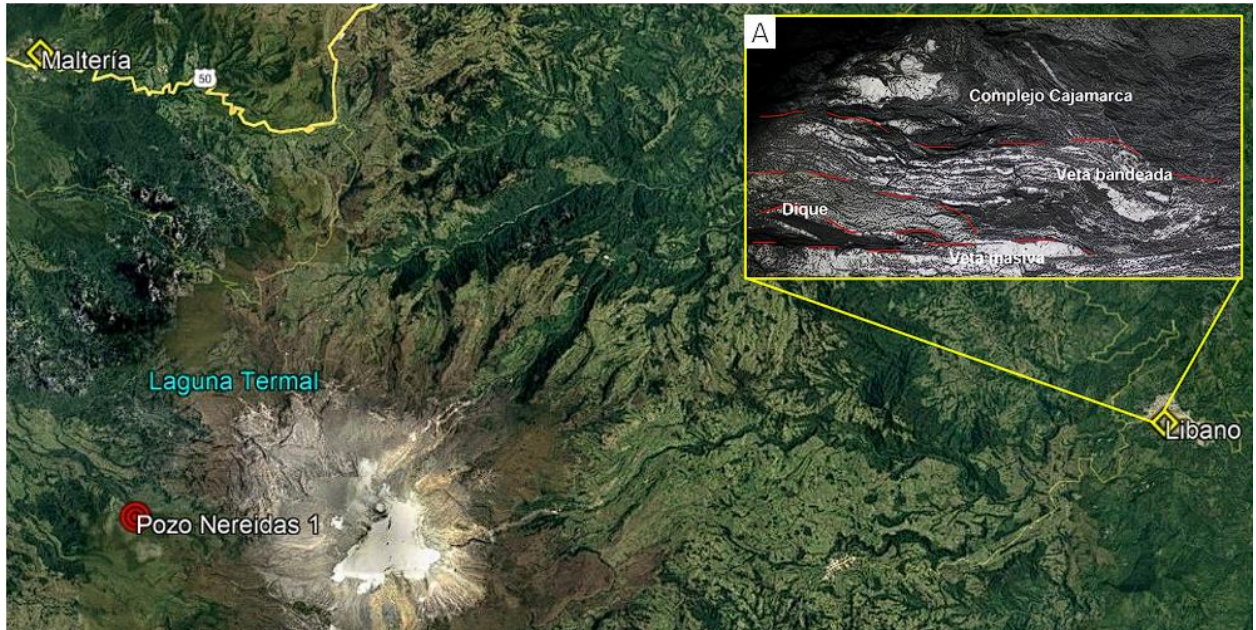
Así mismo se logran observar dentro del Stock de El Hatillo, cerca al pueblo conocido como Líbano (figura 13) en el departamento del Tolima (localizado a 37.6 Km al NE del Pozo Nereidas-1), vetas de cuarzo y sulfuros como galena, esfalerita, pirita, calcopirita y pirrotita, con diferentes texturas en donde según Moreno (2022) destacan:

- Textura cuarzo masivo: definida por cuarzo de textura masiva con sulfuros disseminados en cantidades moderadas. Los minerales que caracterizan este evento son la scheelita y la pirrotita. Adicionalmente, se encuentra pirita, calcopirita, galena, esfalerita, oro y carbonatos.
- Textura bandeada: consta de intercalaciones de cuarzo y grandes concentraciones de sulfuros. Su mineralogía está dada por pirita, calcopirita, galena, esfalerita, oro y carbonatos.

### **Figura 13.**

*Fotografía tomada de Google Earth que muestra la proximidad de los eventos paleohidrotermales reportados en la zona con respecto al Pozo Nereidas-1. A. Diferentes tipos de vetas y dique*

*intruyendo esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca en Líbano, Tolima. Tomado de Angeé (2022).*



### 4.3 Geología del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR)

El Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR) está compuesto principalmente por 14 estructuras volcánicas, cuya historia eruptiva se extiende desde hace 1,8 Ma hasta el presente. Estas estructuras se dividen en tres grandes edificios volcánicos superpuestos, tres volcanes de menor dimensión con actividad predominantemente efusiva y ocho domos. Estos focos eruptivos han generado depósitos de flujos de lava, domos y depósitos volcanoclásticos, tanto primarios como secundarios. (Martínez *et al.*, 2014).

Martínez *et al.* (2014) separar la evolución geológica del CNVR en cuatro periodos eruptivos:

1. Período Eruptivo PRE-Ruiz (PRE-Ruiz): Este periodo abarca todas las rocas y depósitos acumulados desde el límite con el basamento (volcánico y cristalino) hasta los flujos de lavas y domos con edades K/Ar entre aproximadamente 1,8 y 0,97 Ma. Estos depósitos presentan

una variación composicional que va desde andesitas a dacitas, con contenidos variables de piroxeno y anfíbol. El PRE-Ruiz se considera como una etapa constructiva con un claro dominio de actividad efusiva.

2. Primer Período Eruptivo Ruiz (PER): Este periodo se inició con una fase constructiva dominada por actividad efusiva, seguida de una fase destructiva que culminó con la evacuación parcial del reservorio magmático y la formación de una caldera. Se caracteriza por secuencias de flujos de lava compuestas por andesitas con clinopiroxeno, cuyas edades aún no han sido determinadas, pero que podrían situarse aproximadamente entre 0,97 Ma y 0,2 Ma.

3. Período Eruptivo Intermedio Ruiz (INTER): Durante esta etapa tuvo lugar la actividad resurgente en el borde e interior de la caldera, con formación de domos y volcanes intracaldéricos, de borde y/o extracaldéricos (edificios volcánicos menores). Sin embargo, este intervalo de tiempo no ha sido aún delimitado debido a la ausencia de dataciones precisas de las rocas generadas durante este periodo.

4. Segundo Período Eruptivo Ruiz (SER): Este periodo incluye los depósitos y rocas que posiblemente se formaron poco después del Pleniglacial de la Última Glaciación, hace aproximadamente 45.000 años, y se extiende hasta la actualidad (corresponde al estratovolcán actual).

#### **4.4 Sistema Geotermal Actual**

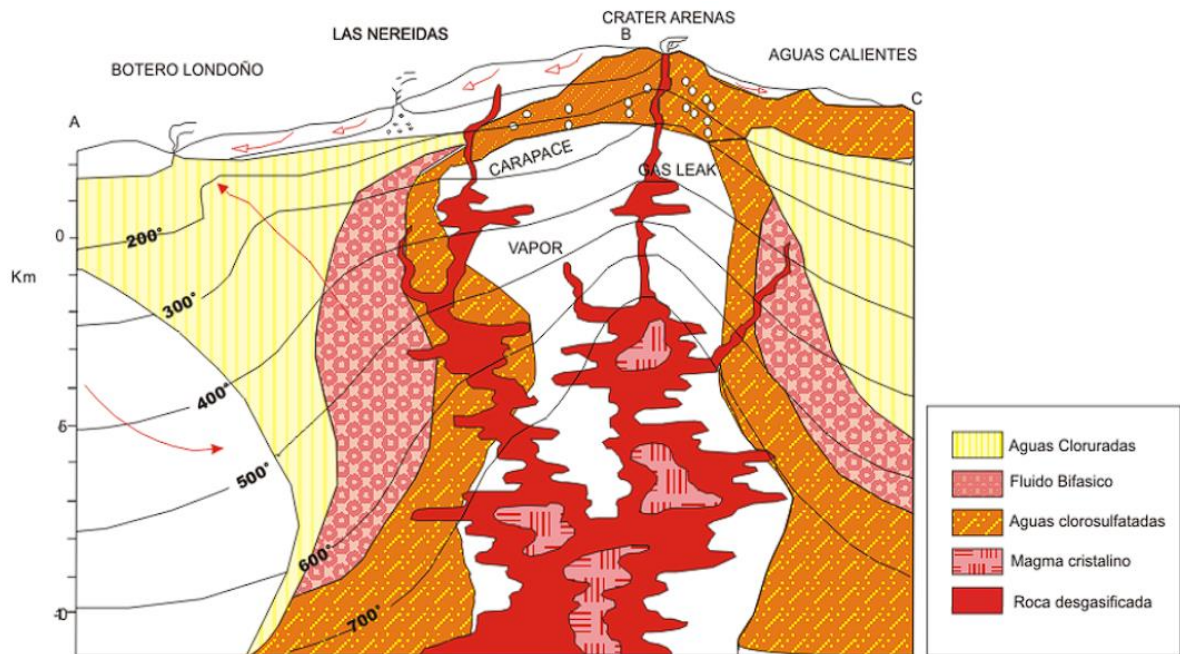
El área de estudio se encuentra dentro de la zona del proyecto geotérmico conocido como Valle de Nereidas. Varios estudios se han realizado para determinar los componentes básicos y necesarios para la existencia de este sistema geotérmico, los cuales son la fuente de calor, el sistema hidrotermal y las vías de transporte de los fluidos geotérmicos.

Para el primer componente, los estudios petrográficos de Stix *et al.* (2003) indicaron la presencia de una fuente de calor superficial. Además de esto, Schaefer (1995) señaló la existencia de una cámara magmática a baja profundidad. Este autor propuso un modelo en el que el sistema volcánico inicialmente evoluciona como uno homogéneo, con una sola cámara magmática, para luego transitar a uno heterogéneo con múltiples cámaras.

El segundo elemento fue modelado por Giggenbach *et al.* (1990) basándose en datos observados en las zonas de descargas (manantiales termales y fumarolas), los cuales se pueden visualizar en la figura 14. Algunos de los datos observados en las descargas son por ejemplo, las emisiones de gases en el cráter del Ruiz y en las Azufreras de las Nereidas, que contienen dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), lo cual es un indicativo de fuente magmática. Además, por debajo de los 3000 metros sobre el nivel del mar, se observan aguas alcalinas-cloruradas que son descargadas en dos grupos de aguas termales en la parte oeste del volcán (Sturchio *et al.*, 1988). Los geotermómetros químicos e isotópicos indican que las fuentes termales en ebullición provienen de un acuífero con una temperatura de equilibrio subsuperficial de al menos 175 °C, en cambio las fuentes de aguas calientes se alimentan de acuíferos con temperaturas de hasta 150°C (Sturchio *et al.*, 1988).

**Figura 14.**

*Perfil de la estructura volcánica del Ruiz, ilustrando la posible distribución de fluidos. Tomado de Giggenbach et al. (1990).*



Finalmente, las vías de transporte de los fluidos geotérmicos dentro de este sistema geotermal están determinadas por las fallas presentes en la zona. Esta conclusión fue alcanzada por Oviedo *et al.* (2023), tras estimar la porosidad primaria del Complejo Cajamarca y contrastar estos resultados con la presencia de fuentes termales en el área de estudio. Este análisis reveló una contradicción evidente, ya que la baja porosidad primaria del Complejo Cajamarca haría improbable la existencia de fuentes termales en el área de estudio. Por consiguiente, la única explicación plausible para este fenómeno es la presencia de fallas que facilitan la circulación profunda de fluidos que alimentan estas manifestaciones hidrotermales superficiales.

A nivel regional, se identifican importantes fracturas con una orientación preferencial NO - SE, las cuales tienen una influencia directa en las emisiones térmicas y en la trayectoria de los arroyos,

como ha sido reportado por la CHEC desde 1983. Estas características muestran un movimiento preferencialmente transcurrente, aunque se ha observado en el terreno que también presentan desplazamiento vertical (Macias y Granja, 2020). Por su parte, Pareja y García (2013) sugirieron un control estructural de la falla de Nereidas sobre las fuentes termales, y reportaron la presencia de fracturas a lo largo de las quebradas de Nereidas y El Billar, las cuales están estructuralmente controladas por dichas fallas.

## 5. Resultados

### 5.1 Caracterización Litológica de los Núcleos del Pozo Nereidas-1

Como se mencionó anteriormente, Monsalve *et al.* (1998) delimitó tres unidades litológicas diferentes del Complejo Cajamarca dentro del pozo Nereidas-1. De estas tres unidades, solo dos son relevantes para el presente estudio:

- Unidad Cuarcítica

Se encuentra entre 2490 y 3940 pies, esta unidad está constituida por cuarcitas plegadas de color gris profundo a negro y esquistos grafitosos cuarzo-muscovíticos, con vetas de cuarzo y calcita, con capas intercaladas de esquistos grafitosos muscovíticos y tremolita-actinolita. Puede correlacionarse con la parte media del Complejo Cajamarca. Mineralógicamente está compuesto de cuarzo, muscovita y grafito, además de minerales accesorios como plagioclasa, biotita, turmalina, esfena y circón. Las cuarcitas están mineralizadas con pirita, calcopirita y esfalerita. Dentro de la unidad hay intercalaciones de esquistos tremolíticos-actinolíticos, compuestos de clorita, tremolita-actinolita, plagioclasa y epidota. La alteración hidrotermal es baja.

- Unidad de Plagioclasa y Hornblenda.

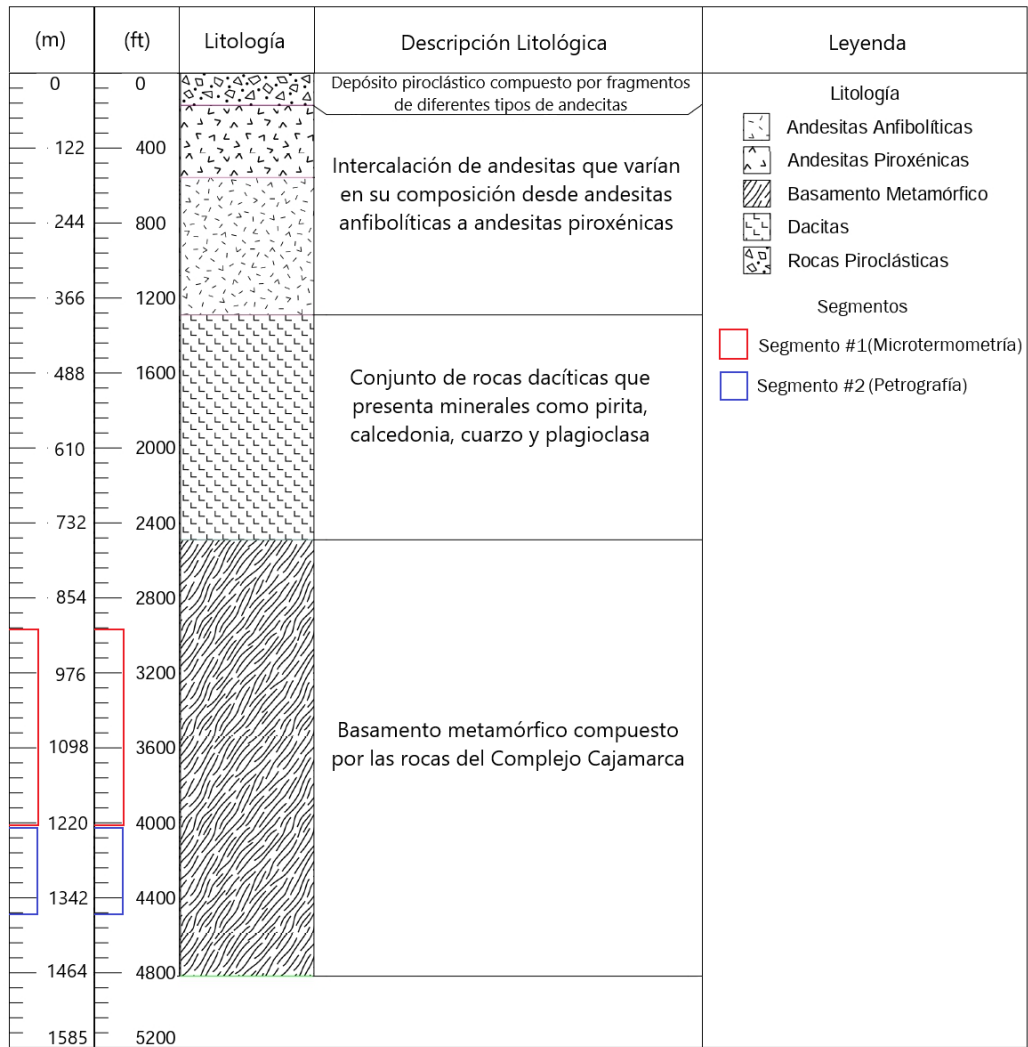
Encontrada entre 3940 y 4814 pies, la unidad se compone de gneises biotíticos y gneises calcosilicatados. Las rocas calcosilicatadas presentan diópsido, plagioclasa, hornblenda, epidota, granate en cantidades variables y esfena como mineral accesorio. El gneis biotítico se compone de abundante actinolita, biotita y plagioclasa. La turmalina y la esfena son minerales accesorios, con microvenas de adularia y albita. En general, la alteración hidrotermal es moderada. Esta unidad corresponde litológicamente a lo que Monsalve *et al.* (1998) nombró Gneises Calcosilicatados.

Además de definir unidades Monsalve *et al.* (1998) construyó la siguiente columna estratigráfica para el pozo Nereidas-1:

**Figura 15.**

*Columna estratigráfica del Pozo Nereidas-1, con la ubicación de los segmentos analizados.*

*Modificado de Monsalve et al. (1998).*



En este trabajo fueron seleccionadas 5 muestras las cuales se agruparon en 2 segmentos según la profundidad a la que fueron extraídas

**5.1.1 Segmento 1 (3026-4017 ft)**

La muestra de mano LFC #1 se compone de dos elementos principales, el primero hace alusión a un esquistos grafitoso que cumple el papel de roca caja, y el segundo se refiere a una vena

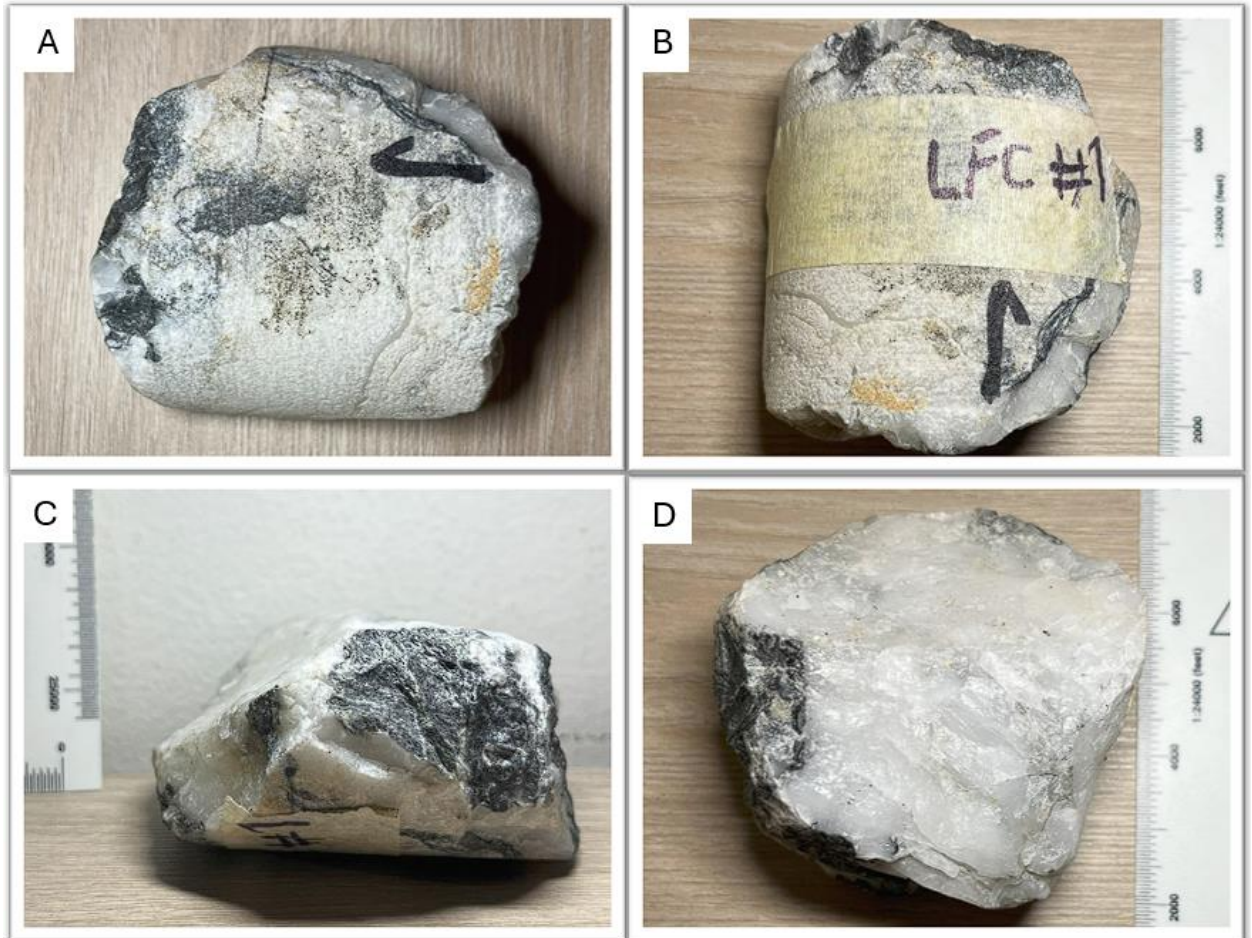
de cuarzo que lo intruye. El esquisto grafitoso se logra observar como un agregado de color negro a gris oscuro en el que destaca por sobre todo su brillo sedoso, característico de la abundante presencia de grafito (figura 16A).

El cuarzo se puede visualizar como la parte predominante de la muestra y corresponde a la parte blanca a blanco lechoso que se observa en casi la totalidad de la muestra, con un brillo vítreo y algunas imperfecciones con colores principalmente verdes (figura 16B).

Se observan sulfuros, específicamente pirita mostrando su color amarillo, su brillo metálico y su característico hábito cúbico.

**Figura 16.**

*Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LCF #1 (3026-4017 ft).*

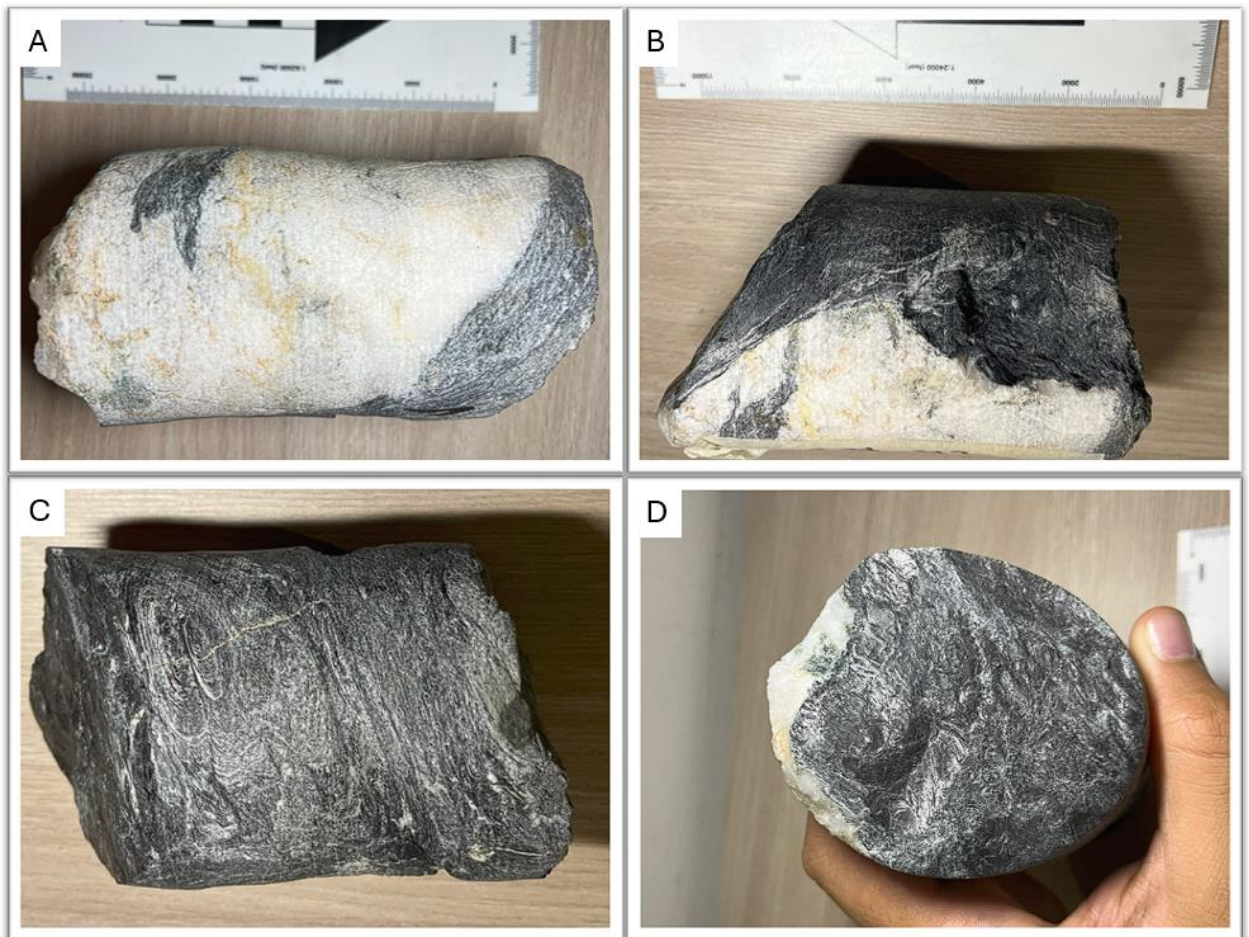


La muestra de mano LFC#2 se compone de dos elementos principales, el primero hace alusión a un esquistó grafitoso que cumple el papel de roca caja, y el segundo se refiere a una vena de cuarzo que lo intruye (figura 17A y 17B). El esquistó grafitoso se logra observar como un agregado de color negro a gris oscuro en el que destaca por sobre todo su brillo sedoso, característico de la abundante presencia de grafito (figura 17C). Así mismo se observan vetillas de cuarzo distribuidas a lo largo de toda la roca.

La vena de cuarzo se puede visualizar como un agregado blanco a blanco lechoso, con un brillo vitreo y algunas imperfecciones con colores principalmente verdes.

**Figura 17.**

*Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #2 (3026-4017 ft).*



**5.1.2 Segmento 2 (4017-4509.7 ft)**

La muestra de mano LFC#3 contiene una cantidad considerable de grafito, reconocible por su color oscuro y su brillo sedoso como se observa en la figura 18A. Este grafito se encuentra

intercalado con cuarzo dentro de la foliación intrínseca de la roca como se observa en la figura 18B. Está roca se clasificó como esquisto.

También son observables varios sulfuros que se encuentran en contacto neto con el cuarzo, siendo estos principalmente pirita. Así mismo se debe recalcar la presencia de patinas de óxidos, caracterizadas por su color rojizo (figura 18C). Lo mencionado anteriormente es una evidencia inequívoca del paso de fluidos a través de las cavidades existentes dentro de las formaciones rocosas presentes en el pozo Nereidas – 1.

**Figura 18.**

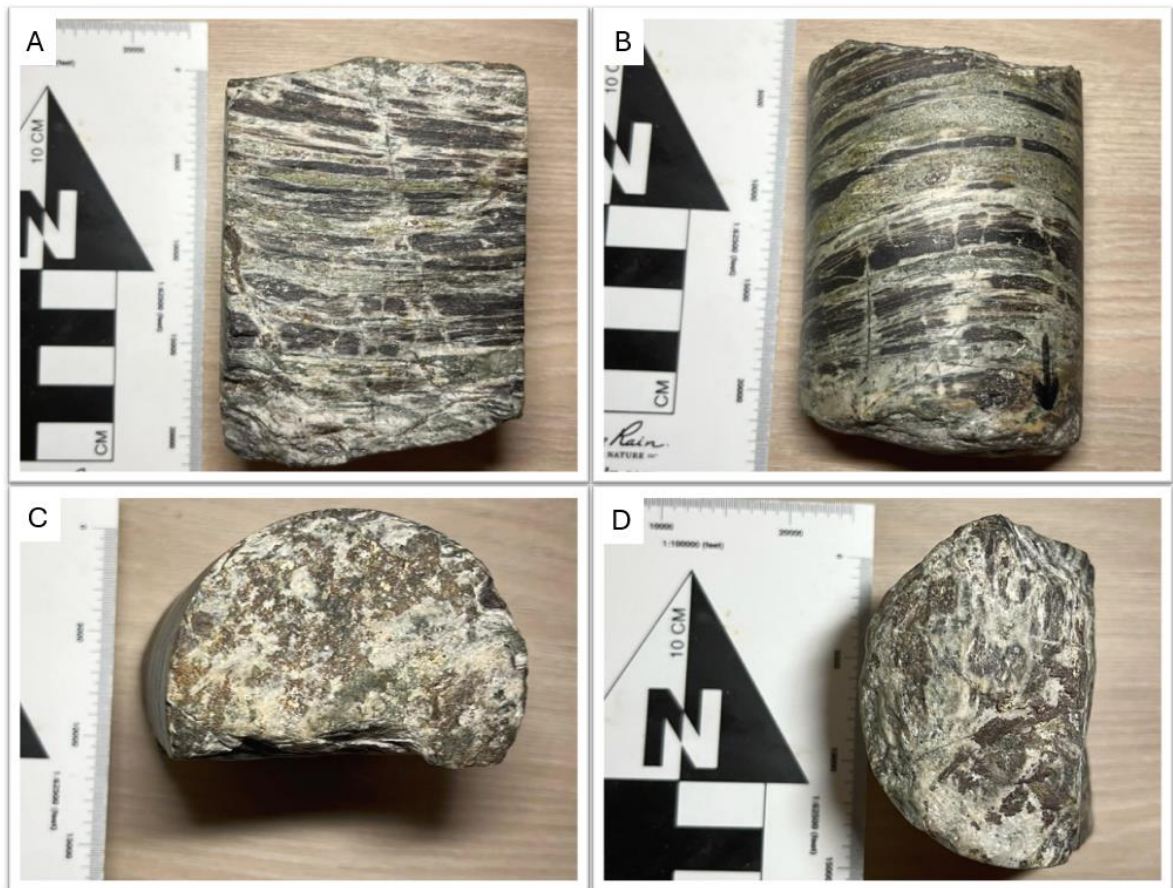
*Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #3 (4017-4509.7 ft).*



La muestra de mano LFC#4 presenta una clara foliación (figura 19B), en donde se intercalan grafito el cual se identifica por su color negro y brillo sedoso, y epidota que varía en tonalidad entre un verde claro más pistacho a un verde oscuro. También cabe recalcar la presencia de la presencia de varias vetillas, en varias direcciones y con composiciones distintas entre las que destacan varias vetillas de sulfuros, compuestas de pirita (figura 19A). Además de los minerales ya nombrados, se destaca la presencia de cuarzo y calcopirita.

**Figura 19.**

*Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #4 (4017-4509.7 ft).*

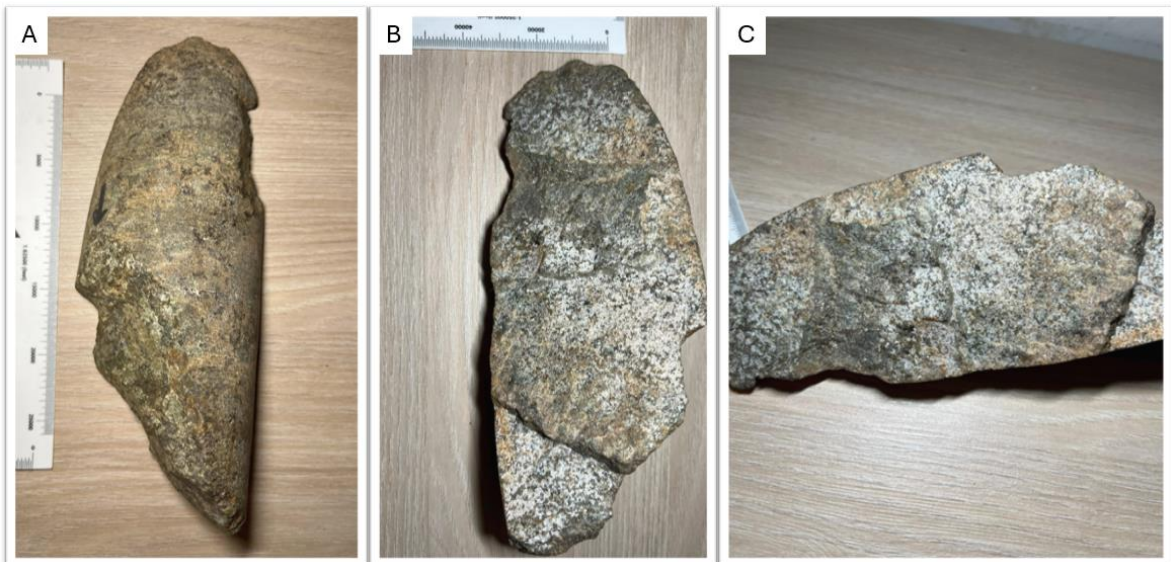


La muestra de mano LFC #5 difiere notablemente de las otras muestras. En primer lugar, se observa la ausencia de grafito, así como la falta de foliación, lineación u otras estructuras típicas de rocas metamórficas.

A pesar de presentar un aspecto significativamente diferente, en esta muestra aún se observan tonalidades verdes similares a las de la muestra LFC #4, lo que sugiere la posible presencia de epidota. Asimismo, se identifican tonalidades amarillas, que se asocian con la pirita y la calcopirita; tonalidades blanquecinas, relacionadas con el cuarzo; y tonalidades marrones, que corresponden a la presencia de granate (Figura 20A). Adicionalmente, se observa la bornita, identificable por sus iridiscencias de tono púrpura, que comúnmente se encuentra en agregados junto a la pirita. Por otro lado, la magnetita, aunque no es visible a simple vista, fue detectada gracias a su comportamiento magnético.

**Figura 20.**

*Aspecto macroscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestras LCF #5 (4017-4509.7 ft).*



## 5.2 Caracterización Petrográfica de las litologías presentes en el Pozo Nereidas-1

### 5.2.1 Muestra LFC #3

La observación detallada de la muestra permitió identificarla como esquisto cuarzo-moscovítico. Dentro de su composición se reconoce mayoritariamente cuarzo y moscovita, seguidos en menor proporción por grafito, clorita y calcita. Adicionalmente, se observan minerales opacos distribuidos uniformemente a lo largo de la sección (figura 21). El mineral predominante en la muestra es el cuarzo, seguido por una cantidad significativa de moscovita, lo que permite caracterizar la textura de la roca como lepidogranoblástica. El tamaño de los granos varía entre fino, medio y grueso, lo que define la textura como heteroblástica. Además, se destaca la presencia de foliación debido a la orientación preferencial clara de los minerales.

La moscovita se observa en agregados hojosos incoloros bajo nicoles paralelos, con colores de interferencia de tercer orden (azul, amarillo y violeta). Estos agregados están compuestos por individuos subidioblásticos y heteroblásticos de hábito laminar, con terminaciones irregulares. La moscovita se encuentra en contacto neto con cuarzo y grafito, formando bandas polimineraleas, y en algunos casos, en contacto con clorita. También es cortada por una vena de calcita. La distribución de la moscovita en la roca es abundante y homogénea. Asimismo, se observan estructuras de cizalla, con bandas C que cortan la foliación preexistente y bandas S, evidencias de foliaciones más antiguas (figura 21A).

El cuarzo se presenta como cristales incoloros, sin pleocroísmo, con bajo relieve y colores de interferencia blancos de primer orden en nicoles cruzados. Los cristales de cuarzo presentan una forma xenoblástica y su tamaño varía de fino a grueso. Algunos cristales muestran deformación, formando sigmoides que evidencian recrystalización por rotación de subgranos (figura 21B). Otros cristales presentan extinción ondulante (figura 21C) y recrystalización tipo

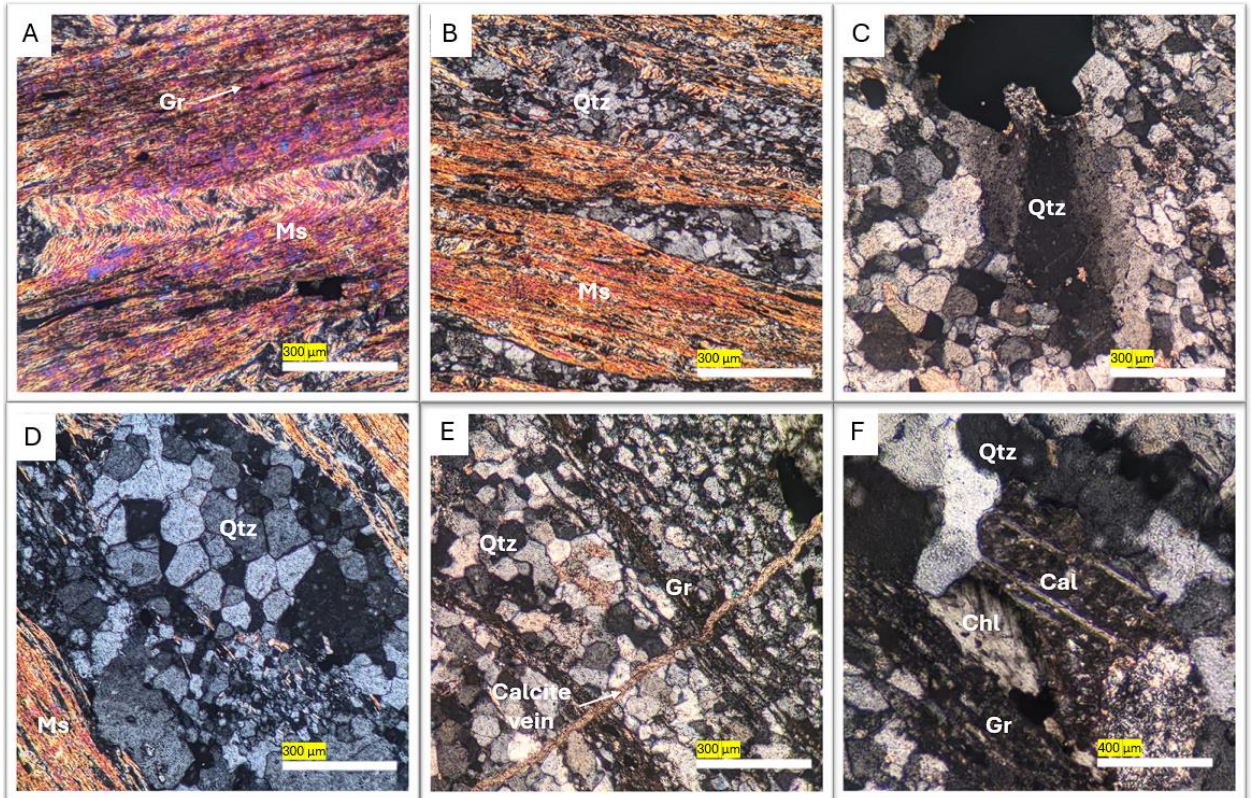
bulging, caracterizada por bahías de recristalización y rotación de subgranos (figura 21D). Con base en estas observaciones, se estima que la muestra estuvo expuesta a temperaturas cercanas a los 500 °C.

La calcita se presenta como cristales xenoblásticos incoloros, con relieve medio y sin pleocroísmo. En nicoles cruzados, muestra colores de interferencia cafés con tonos amarillos, y en algunos casos presenta irisaciones de órdenes superiores. Algunos cristales contienen maclas laminares de deformación, parcialmente recristalizadas, y presentan sericita en los bordes (figura 21F). Se destaca la presencia de una vena de gran longitud de calcita en la muestra (Figura 21E).

La clorita se observa como agregados xenoblásticos incoloros con bajo relieve y sin pleocroísmo. En nicoles cruzados, presenta colores de interferencia grisáceos. La clorita está en contacto neto con todos los minerales presentes en la muestra y su distribución es heterogénea a lo largo de la sección.

**Figura 21.**

*Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #3 (4017-4509.7 ft).*

**5.2.2 Muestra LFC #4**

La observación detallada de la muestra permitió identificarla como esquistos moscovítico con grafito. Dentro de su composición se reconoce grafito, cuarzo, moscovita, biotita, en menor proporción clorita, epidota y calcita, junto con algunos minerales opacos distribuidos uniformemente en la sección (figura 22).

El mineral predominante en la muestra es el grafito, seguido por cantidades significativas de moscovita, biotita y cuarzo. Debido a esta composición, se determinó que la textura de la roca es granolepidoblástica. El tamaño de los granos varía de fino a grueso, lo que permite clasificar la

textura como heteroblástica. Se destaca la presencia de foliación espaciada, observable en la orientación preferencial de los minerales, particularmente en la moscovita, que presenta dominios de clivajes (figura 22B).

El cuarzo aparece como cristales incoloros, sin pleocroísmo, con relieve bajo. En nicols cruzados, presenta colores de interferencia blancos de primer orden y su forma es mayormente xenoblástica. El tamaño de los granos varía de fino a grueso, y los cristales más grandes contienen inclusiones fluidas. Los cristales de cuarzo pueden presentarse en varias formas: como sigmoides (figura 22D), rodeados por cristales de moscovita orientados con la foliación principal, en venas que atraviesan bandas polimineraleas de epidota, moscovita y grafito (figura 22C), e incluso se observan venas de cuarzo que se cruzan entre sí.

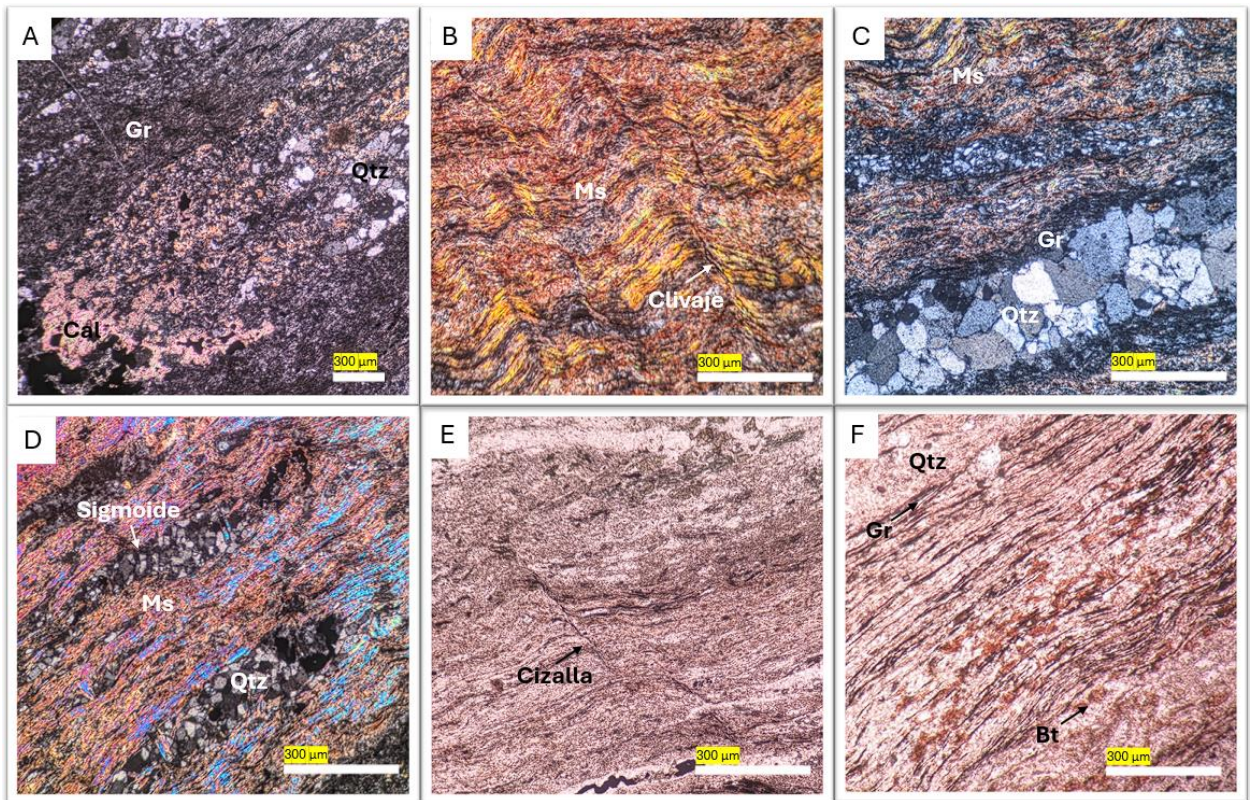
La moscovita se presenta como agregados incoloros hojosos bajo nicols paralelos, con colores de interferencia de tercer orden (azul, amarillo y violeta). Está compuesta por cristales heteroblásticos y subidioblásticos de hábito laminar, formando bandas polimineraleas con cuarzo, grafito, moscovita y epidota. También está en contacto con cristales de clorita y es cortada por venas de cuarzo. Su distribución en la roca es abundante y homogénea. Además, se observa una crenulación, con dos direcciones de foliación que sugieren una deformación dúctil. Se identifican estructuras de cizallamiento, como bandas tipo C que cortan la orientación mineral preferencial y bandas tipo S que corresponden a foliaciones antiguas (figura 22E).

La calcita se observa como cristales xenoblásticos incoloros, con relieve medio y sin pleocroísmo. En nicols cruzados, muestra colores de interferencia cafés con tonos amarillos y, en algunos casos, irisaciones de órdenes superiores. Se detecta sericita en los bordes de algunos cristales (figura 22A).

La clorita, al igual que la calcita, es un mineral menor en la muestra. Se presenta como agregados xenoblásticos con bajo relieve. Exhibe pleocroísmo, cambiando de color entre verde y amarillo, y en nicols cruzados muestra colores de interferencia amarillos con tonos morados. Se distribuye de manera heterogénea a lo largo de la sección, y está en contacto neto con todos los minerales presentes en la muestra.

**Figura 22.**

*Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #4 (4017-4509.7 ft).*



**5.2.3 Muestra LFC #5**

La observación detallada de la muestra permitió identificarla como una mineralogía tipo skarn. Dentro de su composición se reconoce granate, en menor proporción cuarzo, plagioclasa,

clorita, epidota, calcita y algunos minerales arcillosos, generados por la alteración de cristales de plagioclasa. También se observan minerales opacos distribuidos de manera uniforme en la sección (figura 23). No presenta evidencias de foliación ni de orientación preferencial. La textura de la roca es granoblástica, con un tamaño de grano que varía entre fino y medio, predominando los granos de tamaño medio, lo que la clasifica como una roca de textura heteroblástica.

Los cristales de granate, los cuales componen 70-80% de la muestra, se observan en nicoles paralelos como agregados de color café, con tonalidades que varían entre claros y oscuros, sin pleocroísmo. En nicoles cruzados, el granate es opaco debido a su naturaleza isotrópica y no presenta colores de interferencia. Los cristales varían entre euhedrales y subhedrales, con hábito hexagonal a rectangular, donde algunos muestran planos de crecimiento bien desarrollados. Se observan inclusiones de cuarzo en varios de estos cristales (figura 23A y 23D), y algunos presentan zonación, visible en nicoles cruzados, con zonas opacas y otras con interferencia gris de primer orden. El granate también presenta cloritización en ciertas áreas (figura 23B).

El cuarzo es incoloro y sin pleocroísmo, con bajo relieve. En nicoles cruzados, presenta colores de interferencia blancos de primer orden y una forma xenoblástica. Su tamaño varía de medio a grueso. El cuarzo se encuentra en dos formas principales: como inclusiones dentro de los cristales de granate o en venas que rellenan fracturas entre los minerales principales de la roca.

La plagioclasa se presenta incolora, sin pleocroísmo, con bajo relieve. En nicoles cruzados, muestra colores de interferencia blancos de primer orden y su macla polisintética característica (figura 23C). Tiene una forma xenoblástica y su tamaño varía de fino a medio. Está en contacto neto con granate y muestra alteración a sericita.

La clorita se observa como agregados xenoblásticos de color verde en nicoles paralelos, aunque en algunas ocasiones puede verse incolora o con tonos cafés debido a cambios en su

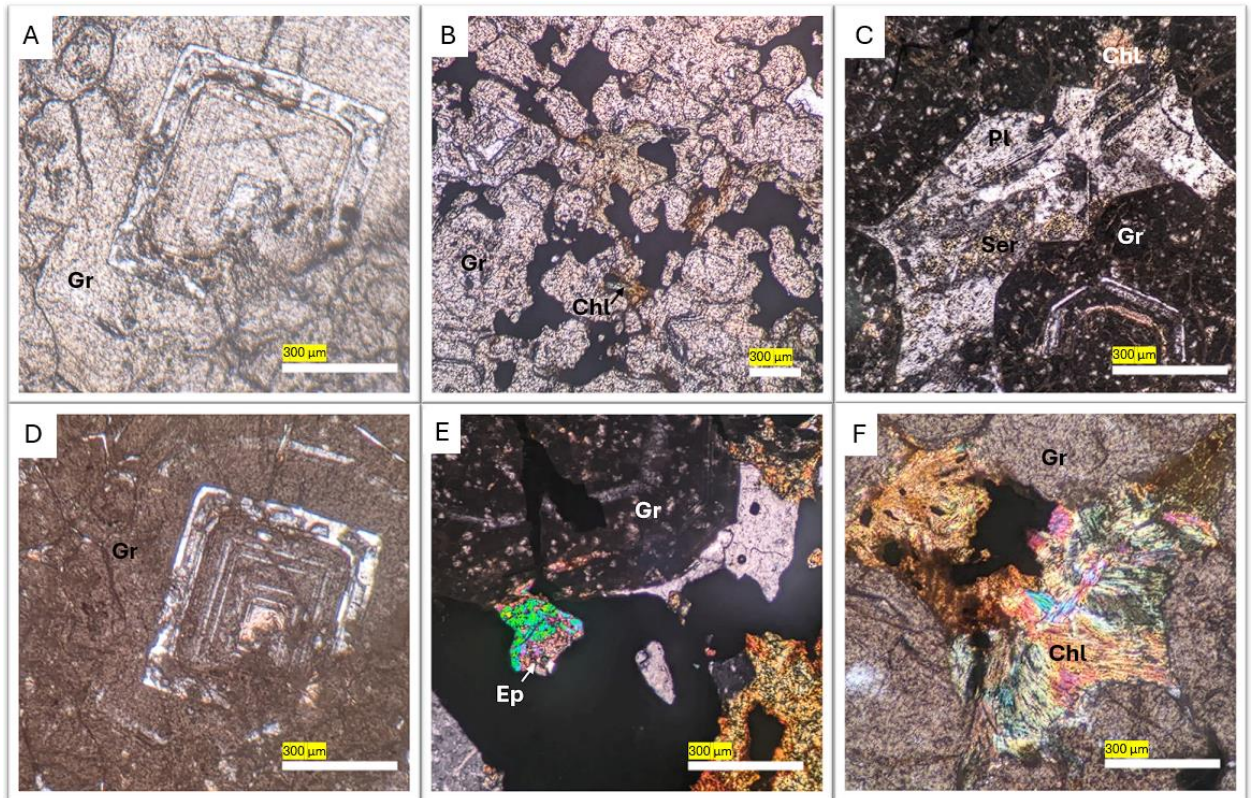
composición química. La clorita presenta pleocroísmo y en nicoles cruzados muestra colores de interferencia amarillo grisáceo de primer orden, además de tonos morados y azules anómalos (figura 23F). Este mineral está en contacto principalmente con granate, aunque también se encuentra junto a epidota o cuarzo, y se distribuye de manera heterogénea en la sección.

La epidota se presenta en cristales que varían entre incoloros y verde pistacho, con un pleocroísmo leve, una forma homeoblástica a subidioblástica, y relieve alto. El tamaño de grano varía de fino a medio, y algunos cristales muestran hábito granular (figura 23E). Está en contacto neto con cuarzo y granate.

La calcita se observa como cristales xenoblásticos incoloros, con relieve medio y sin pleocroísmo. En nicoles cruzados, presenta colores de interferencia cafés con tonos amarillos y algunos cristales muestran irisaciones de órdenes superiores, aunque no se observan maclas polisintéticas características.

**Figura 23.**

*Aspecto microscópico de la litología metamórfica presente en el pozo Nereidas-1, muestra LFC #5 (4017-4509.7 ft).*

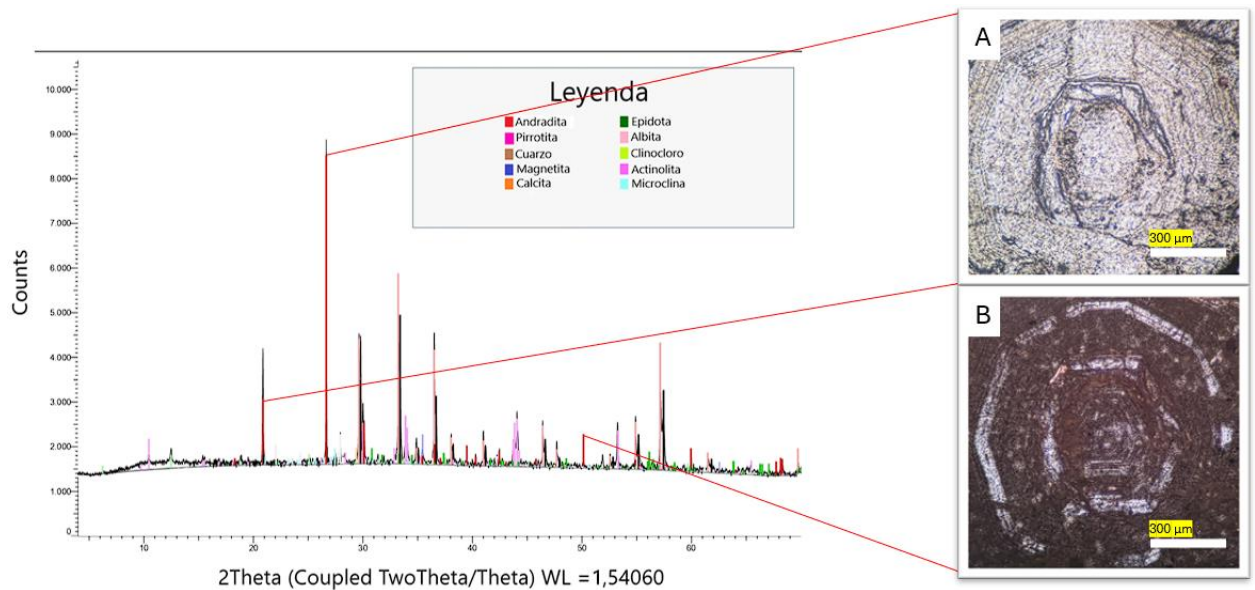


### 5.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Para este estudio, se utilizó una porción de la muestra LFC #5 con el objetivo de precisar su composición mineralógica. Los resultados se muestran en la figura 24.

#### Figura 24.

*Patrón de difracción de rayos x de la muestra LFC #5, los picos señalados corresponden a los picos más altos de la andradita. A. Cristal de granate en nicoles paralelos. B. Cristal de granate en nicoles cruzados.*



El análisis permitió una caracterización más precisa de los minerales previamente reportados. El granate, anteriormente identificado de manera general, fue determinado específicamente como andradita, mientras que la clorita se clasificó como clinocloro y la plagioclasa se identificó como albita. Además, el estudio reveló la presencia de minerales que no habían sido reportados en los anteriores análisis, como la magnetita, la pirrotita, la actinolita y la microclina.

Cabe destacar que los picos señalados en la figura 24 corresponden a los picos característicos del granate tipo andradita, confirmando su presencia y aportando mayor detalle sobre su estructura mineralógica.

#### 5.4 Inclusiones Fluidas

Las muestras estudiadas se identifican como LFC #1 y LFC #2. Estas fueron seleccionadas cuidadosamente debido a la limitada disponibilidad de secciones delgadas. Se tuvo que decidir de manera precisa qué muestras someter a corte y qué tipo de secciones preparar. Para ambas muestras se realizaron dos secciones doblemente pulidas, con el objetivo de llevar a cabo análisis microtermométricos. Estas muestras fueron elegidas para dicho análisis debido a la presencia de venas de cuarzo de gran tamaño, observadas previamente en capítulos anteriores (figuras 16 y 17).

Las inclusiones fluidas encontradas son diversas y presentan diferentes tamaños, formas y tipos, llegándose a observar los 3 tipos diferentes de inclusiones según su génesis, estos resultados se resumen en la siguiente tabla 2:

**Tabla 2.**

*Tabla resumen de los tipos de inclusiones fluidas observadas.*

Tipo de Inclusión	Descripción	Morfología	Composición
<b>Inclusiones Primarias</b>	Distribuidas paralelamente a las caras de crecimiento del cristal.	Irregular, regular, ovoide y tabular	Bifásicas (L+V) Monofásicas (solo V)
<b>Inclusiones Secundarias</b>	Grupos numerosos con orientación clara, relacionadas con microfisuras o estructuras secundarias.	Irregular, regular, ovoide y tabular	Bifásicas (L+V) Monofásicas (solo V)
<b>Inclusiones Pseudo secundarias</b>	Grupos de tamaño intermedio, siguen fracturas no extensas ni rectas, perdiendo su orientación cerca del borde del cristal.	Irregular, ovoides, tabular	Bifásicas (L+V)

Es importante resaltar la presencia de ciertas inclusiones fluidas con formas irregulares y notablemente alargadas. Aunque estas inclusiones pueden parecer tabulares en un principio, su

forma no se mantiene uniforme a lo largo de su estructura. A medida que se extienden hacia sus extremos, se estrechan gradualmente, lo que da lugar a la formación de nuevas inclusiones, un fenómeno conocido como estrangulamiento o "*necking-down*" (figura 25). Al principio, estas inclusiones son xenomorfas, pero con el tiempo adoptan formas más redondeadas u ovoides. Este proceso genera una distribución de inclusiones más pequeñas en un plano, con una proporción de gas/líquido cada vez menor (Velasco, 2004).

**Figura 25.**

*Inclusión fluida afectada por el fenómeno "necking-down".*

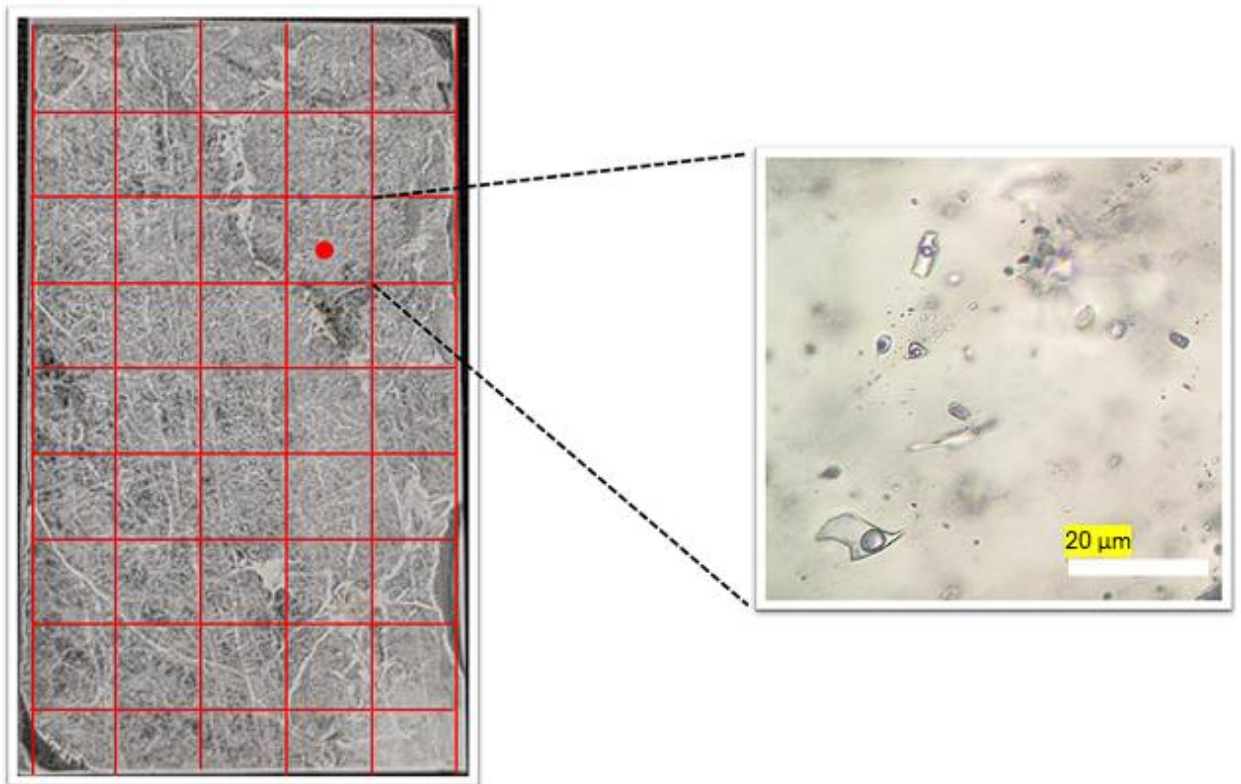


Se delimitaron 4 asociaciones de inclusiones fluidas (AIF), las cuales corresponden a pequeñas agrupaciones de inclusiones fluidas con un mismo origen y con características similares como lo pueden ser su composición líquido-vapor o su morfología. Estas AIF se encuentran presentes tanto LFC #1 como en LFC#2 y se describen de la siguiente manera:

- AIF #1: Corresponde a inclusiones primarias bifásicas (L+V) con morfología que varía desde irregular hasta ovoide, con tamaños que se encuentran en un intervalo de 3  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  (figura 26).

**Figura 26.**

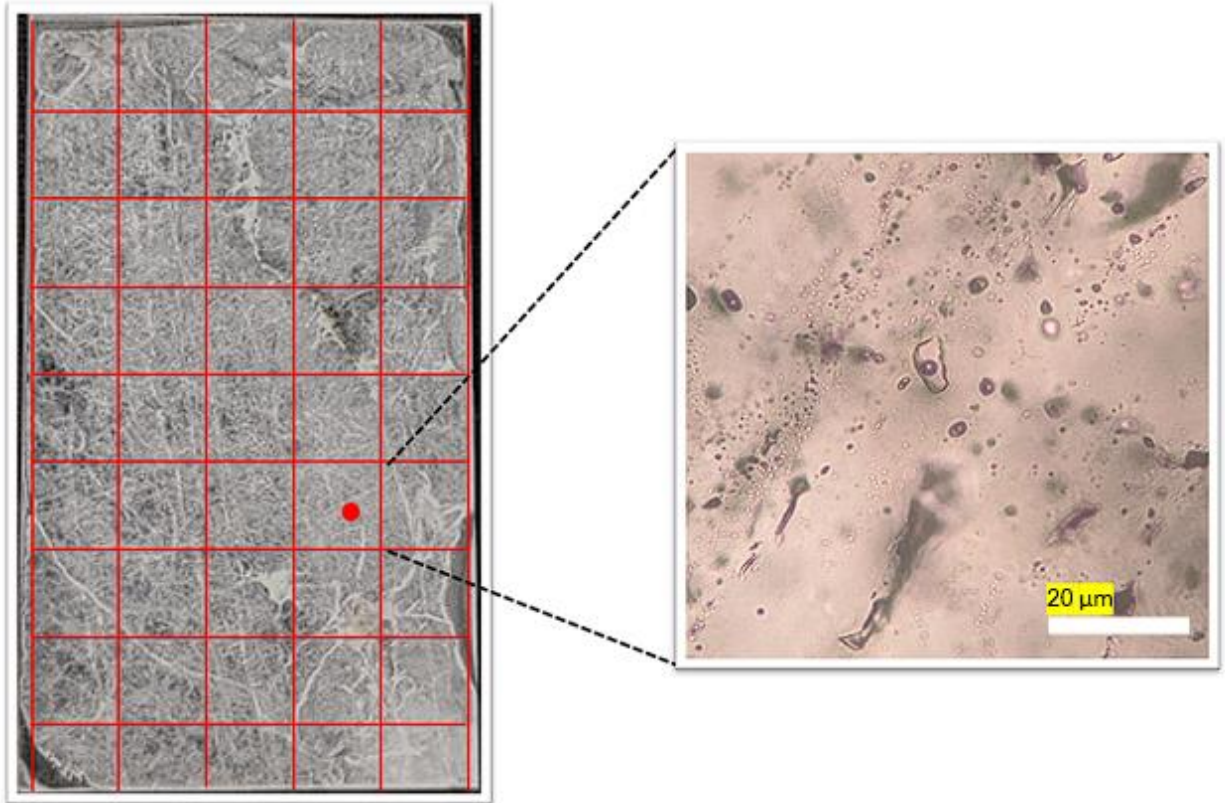
*Aspecto general de las IF tipo AIF# 1 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 1.*



- AIF #2: Corresponde a inclusiones secundarias bifásicas (L+V) con morfología que varía desde irregular hasta regular, con tamaños que se encuentran en un intervalo de 2  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$  (figura 27).

**Figura 27.**

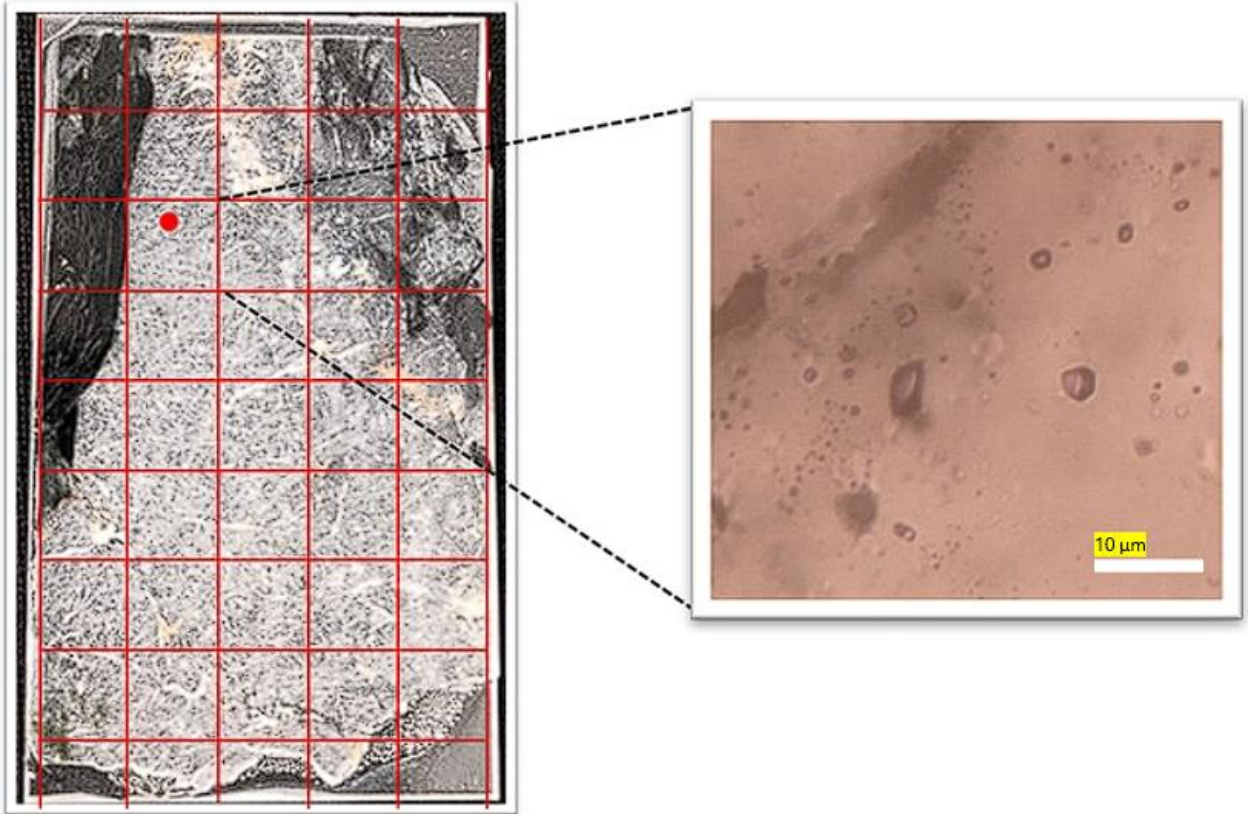
*Aspecto general de las IF tipo AIF# 2 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 1.*



- AIF #3: Corresponde a inclusiones primarias monofásicas ricas en vapor con morfología que varía desde irregular hasta ovoide, con tamaños que se encuentran en un intervalo de 1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  (figura 28).

**Figura 28.**

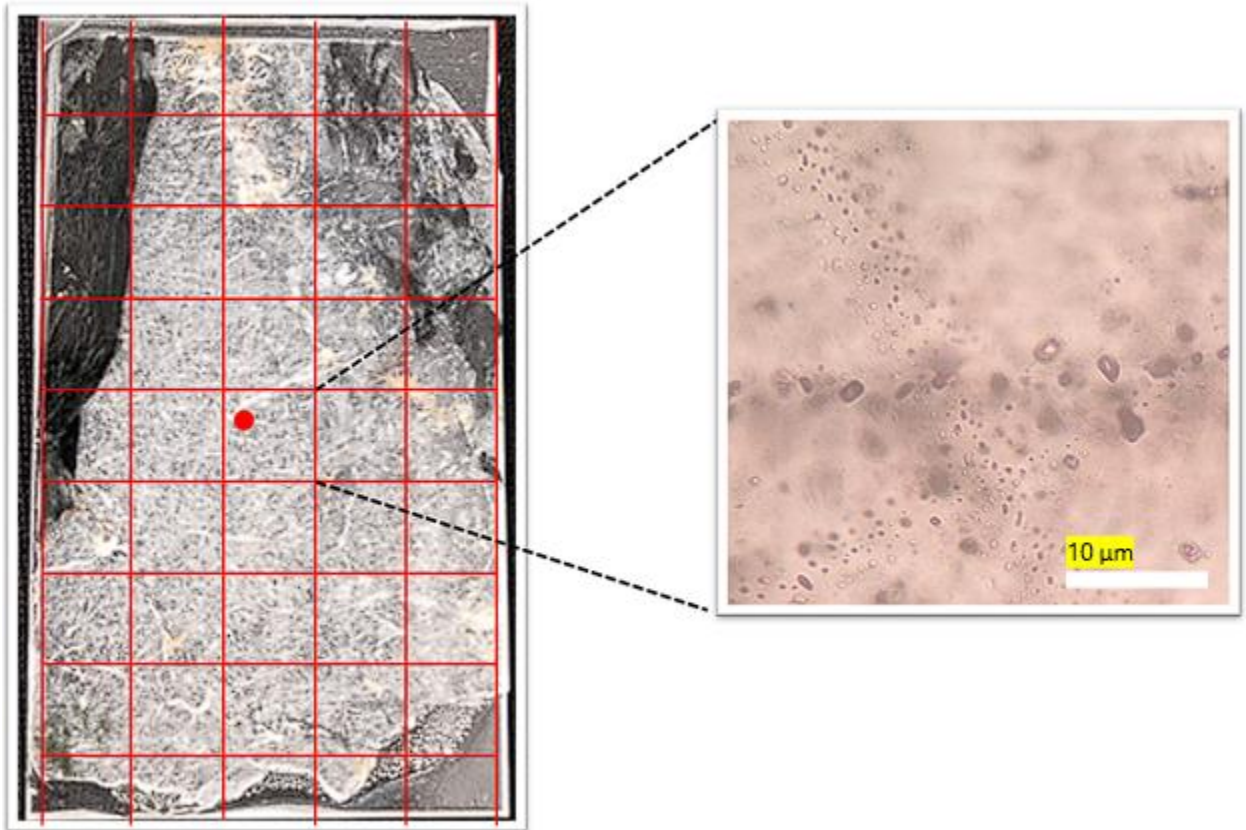
*Aspecto general de las IF tipo AIF# 3 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 2.*



- AIF #4: Corresponde a inclusiones secundarias monofásicas ricas en vapor con morfología que varía desde irregular hasta ovoide, con tamaños que se encuentran en un intervalo de 1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  (figura 29).

**Figura 29.**

*Aspecto general de las IF tipo AIF# 4 en rellenos hidrotermales presentes en la muestra LFC# 2.*

**5.5 Microtermometría de Inclusiones Fluidas**

Las inclusiones fluidas analizadas tanto en LFC#1 Y LFC#2, se separaron en cuatro grupos diferentes denominados AIF (Asociación de Inclusiones Fluidas), estos grupos se diferencian de la siguiente manera:

- AIF1: Inclusiones fluidas bifásicas primarias
- AIF2: Inclusiones fluidas bifásicas secundarias
- AIF3: Inclusiones fluidas monofásicas primarias
- AIF4: Inclusiones fluidas monofásicas secundarias

Debido al tamaño y visibilidad de las inclusiones encontradas solo se pudieron medir 23 en total que se dividen en 18 AIF# 1, 2 AIF# 2 y 3 AIF# 3 como se observa en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Datos microtermométricos. Abreviaturas tomadas de Bakker (2011). Te: temperatura eutéctica*

*Tm (Ice): temperatura fusión final Th: Temperatura de homogenización.*

Tipo de Muestra	Total	Rango Te (°C)	Rango Tm (Ice) (°C)	Rango Th (°C)	Homogenización	Rango Salinidad (wt % NaCl eq.)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Sistema químico
AIF 1	18	-11.1	-0.2	225.4 a 320.9	Líquido	0.9	0.67	H <sub>2</sub> O-NaCl (?)
		a	a			8.3	0.82	
AIF 2	2	-26.6	-2.8	298.9 a 306.4	Líquido	4.6	0.75	H <sub>2</sub> O-NaCl (?)
		a	a			5.2	0.77	
AIF 3	3	-53.3 a -47.1						CO <sub>2</sub> (?)

Las inclusiones AIF#1 presentan una temperatura eutéctica (Te) que varía entre -11.1 °C a -19.4 °C, con un promedio de -15.8 °C; en cuanto a su temperatura de fusión final del hielo (Tm (Ice)) se encontró que oscila entre -0.2 °C a -5.3 °C, con un promedio de -1.7 °C; por último tenemos la temperatura de homogenización (Th) la cual obtuvo de rango de 225.4 °C a 320.9 °C con un promedio de 284.1 °C.

Las inclusiones AIF #2 presentan una temperatura eutéctica (Te) que varía entre -26.6 °C a -28.2 °C, con un promedio de -27.4 °C; en cuanto a su temperatura de fusión final del hielo (Tm (Ice)) se encontró que oscila entre -2.8 °C a -3.2 °C, con un promedio de -3 °C; por último tenemos la temperatura de homogenización (Th) la cual obtuvo de rango de 298.9 °C a 306.4 °C con un promedio de 302.6 °C.

Las inclusiones AIF #3 al ser inclusiones únicamente de vapor, no era posible la obtención de datos como la temperatura de homogenización, por lo tanto el único dato que se extrajo de estas muestras corresponde a la temperatura eutéctica ( $T_e$ ), la cual varía entre  $-53.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-47.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con un promedio de  $-50.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los cálculos tanto de la salinidad como de la densidad de las muestras fueron realizados dentro del programa software Package FLUIDS 1 (Bakker, 2003), que dieron como resultado para las inclusiones AIF #1 una salinidad que se encuentra en un intervalo de  $0.9\text{ wt \% NaCl eq}$  a  $8.3\text{ wt \% NaCl eq}$  con un promedio de  $2.8\text{ wt \% NaCl eq}$ . junto con una densidad que oscila entre  $0.67\text{ g/cm}^3$  a  $0.82\text{ g/cm}^3$  con un promedio de  $0,76\text{ g/cm}^3$ ; para las inclusiones AIF #2 se encontraron salinidades de entre  $4.6\text{ wt \% NaCl eq}$ . a  $5.2\text{ wt \% NaCl eq}$ . con un promedio de  $4,9\text{ wt \% NaCl eq}$ . y densidades que varían entre  $0.75\text{ g/cm}^3$  a  $0.77\text{ g/cm}^3$  con un promedio de  $0,76\text{ g/cm}^3$ .

Se sugiere que las inclusiones AIF #1 y AIF #2 pertenecen a un sistema acuoso-salino de tipo  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ . Los puntos de temperatura eutéctica obtenidos, que están cerca del valor del  $\text{NaCl}$  ( $-21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), respaldan esta hipótesis preliminar. Sin embargo, las ligeras variaciones en los valores observados indican la posible presencia de otras sales, como el  $\text{KCl}$ . Por lo tanto, aunque es probable que estas inclusiones pertenezcan al sistema  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ , se necesita un análisis más detallado para confirmarlo.

En cuanto a las inclusiones AIF #3, estas son monofásicas de vapor, y su composición se determinó a partir de las temperaturas eutécticas encontradas. Estos valores son cercanos al punto eutéctico del  $\text{CO}_2$  ( $-56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que sugiere que podrían contener estar compuestas por este gas. Sin embargo, al igual que con las inclusiones AIF #1 y #2, no se puede asegurar esta composición sin contar con datos adicionales.

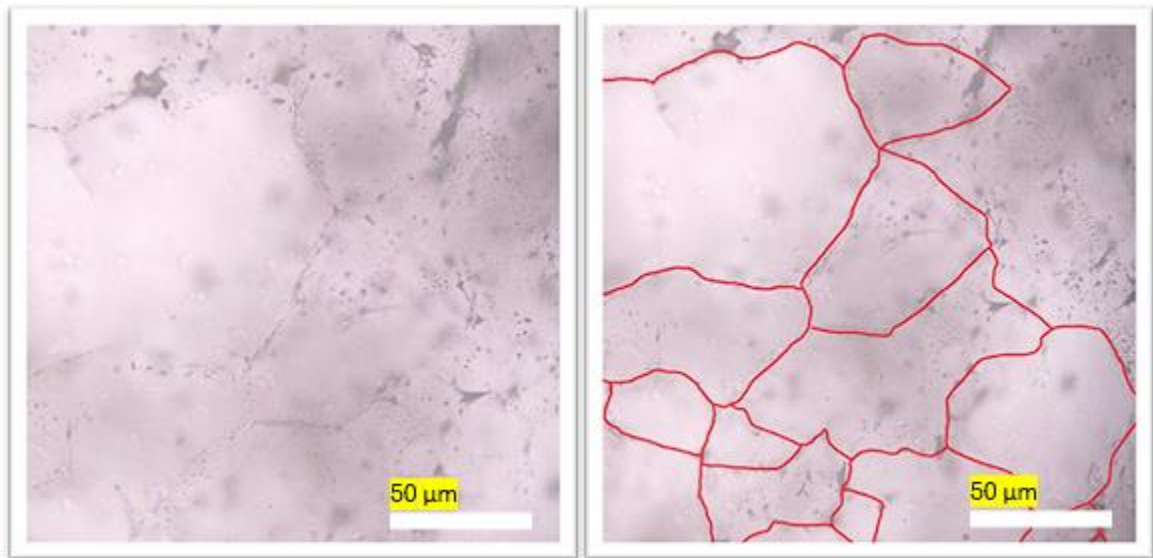
## 6. Interpretación de Resultados

## 6.1 Venas Hidrotermales

Las venas de cuarzo encontradas en las rocas del "Segmento 1" (LFC #1 y #2) exhiben una textura tipo blocky (figura 30), caracterizada por la disposición masiva de los cristales de cuarzo. Esta morfología sugiere que las venas podrían corresponder a venas syntaxiales, en las cuales el crecimiento de los cristales ocurre desde las paredes de la fractura hacia el centro.

### Figura 30.

*Morfología general de los cristales de cuarzo en las venas asociadas a las muestras LFC #1 y #2.*



Sin embargo, debido a la falta de observación directa del borde de las venas, no es posible confirmar esta hipótesis de manera concluyente. La identificación de venas syntaxiales requiere la observación de cómo los cristales de cuarzo crecen hacia el centro de la vena desde ambos lados, lo cual no ha sido posible determinar con precisión en este caso. Por tanto, aunque las características observadas son consistentes con venas syntaxiales, se necesita una observación más detallada del borde de la fractura para corroborar esta hipótesis.

## 6.2 Alteración propilítica

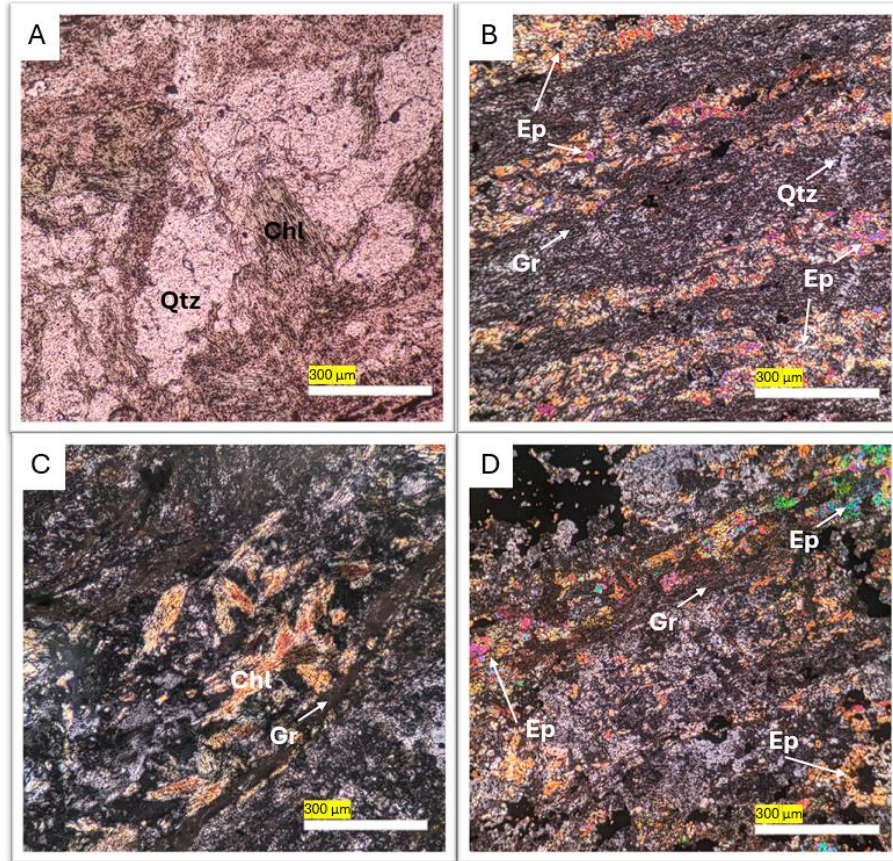
Dentro de las muestras analizadas, se ha observado la presencia de alteración propilítica, destacando especialmente en la muestra LFC #4, a una profundidad aproximada de 4017 a 4509.7 pies. Esta alteración se manifiesta en una amplia gama de grados, desde el reemplazo parcial hasta el reemplazo total de los minerales primarios. A nivel visual, las rocas afectadas por la alteración propilítica suelen exhibir un tono verde pálido, resultado de la presencia variable, pero abundante, de minerales como la clorita, la epidota y la calcita. Estos minerales se forman típicamente a partir de la descomposición de minerales que contienen hierro y magnesio, tales como la biotita, el anfíbol o el piroxeno (Bakhsh, 2018).

Los estudios mineralógico-petrográficos revelan que la asociación mineral en la muestra LFC #4 está compuesta principalmente por clorita, carbonatos, epidota y pirita (figura 31). La clorita aparece en la muestra como un mineral secundario que se genera a través de un proceso conocido como cloritización, en el cual minerales como la muscovita y la biotita reaccionan al entrar en contacto con fluidos hidrotermales, resultando en la formación de cristales de clorita. Adicionalmente, la epidota se genera en la muestra como resultado de la alteración hidrotermal, específicamente mediante un proceso conocido como epidotización. En este proceso, la plagioclasa presente en la roca reacciona con el fluido de alteración, dando lugar a la formación de epidota.

Asimismo, en la muestra de mano se puede observar otro mineral característico de este tipo de alteración: la pirita, que se presenta en forma de agregados o venas que rellenan fracturas. Este conjunto de elementos, compuesto por la asociación mineral y las venas de pirita, ha permitido la identificación de la alteración propilítica en la muestra analizada.

**Figura 31.**

*Tipología de las alteraciones hidrotermales reconocidas en la muestra LFC #4.*



### 6.3 Skarn

Para caracterizar el skarn identificado en este estudio, es fundamental considerar tanto sus características intrínsecas como los factores geológicos regionales que lo rodean.

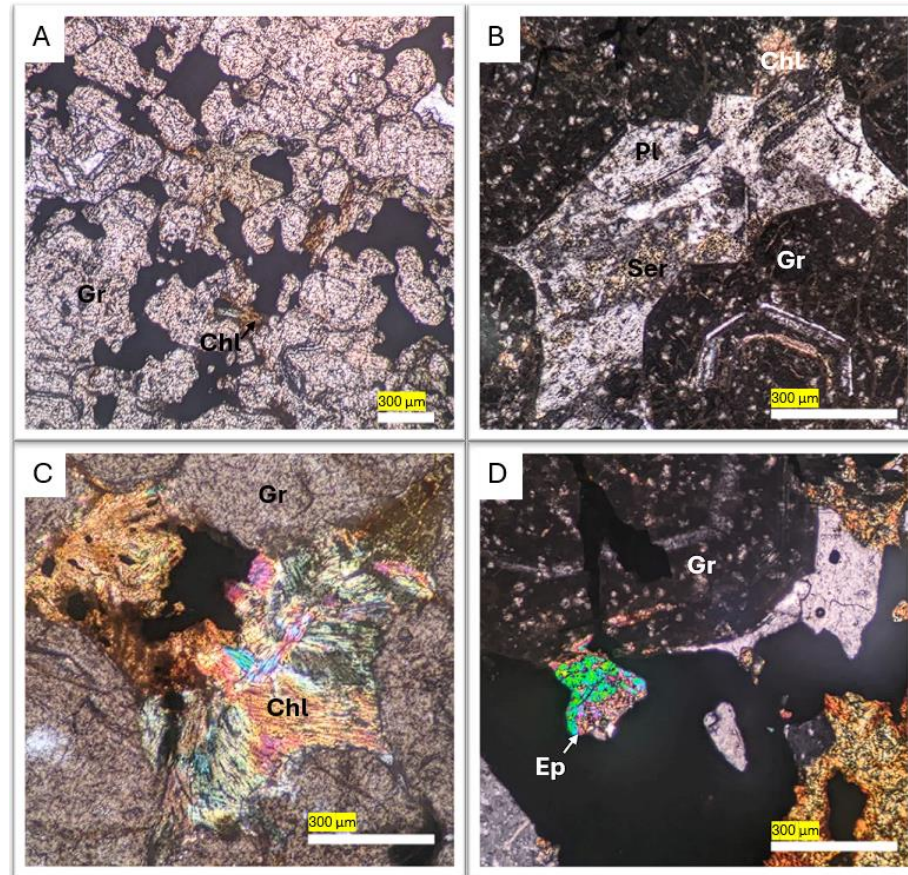
Entre los factores intrínsecos, destaca su mineralogía, que presenta evidencia de alteración progradada, como la presencia de granate (específicamente andradita), y de alteración retrógrada, reflejada en la aparición de minerales como la epidota, la clorita y la actinolita (figura 32). La andradita se encuentra en alta proporción, cubriendo casi toda la muestra. Además, se han identificado sulfuros, tales como pirita, pirrotita, calcopirita y bornita, así como óxidos, entre ellos la magnetita.

En cuanto a los factores relacionados con la geología regional, es relevante destacar la presencia de varias intrusiones ígneas, particularmente el stock de Manizales, el Batolito de El Bosque y el stock del Hatillo. Según Bustamante *et al.* (2017), desde un punto de vista geoquímico, el Batolito de El Bosque y el Stock del Hatillo corresponden a rocas calcoalcalinas, con una marcada afinidad hacia los arcos volcánicos. Este mismo estudio señala una tendencia "tipo adakita" en dichas rocas. Además, se han identificado eventos paleohidrotermales asociados a estos intrusivos, evidenciados por venas de diversas composiciones que podrían albergar mineralizaciones de interés económico.

En base a los datos obtenidos y la bibliografía existente, se concluye que el skarn analizado probablemente corresponde a un skarn de Cu-Fe. Esta conclusión se fundamenta en la predominancia de andradita, la presencia de minerales con cobre (calcopirita y bornita) y hierro (magnetita), y en la naturaleza de los eventos ígneos de la zona, caracterizados por magmas tipo I, de la serie magnetita, calcoalcalinos y adakíticos, típicamente oxidados y con potencial para la formación de depósitos minerales. Sin embargo, se recomienda realizar análisis adicionales para obtener una caracterización más precisa del skarn reportado.

**Figura 32.**

*Tipología de la mineralogía tipo skarn reconocidas en la muestra LFC #5.*



#### 6.4 Eventos Paleohidrotermales

Entre los eventos paleo-hidrotermales reconocidos, se definieron los siguientes: (1) Entre los 3026 a 4017 ft pies, venas de cuarzo paralelas a la foliación metamórfica; (2) Entre los 4017 a 4509.7 ft reemplazamiento mineral típico de alteración hidrotermal, específicamente alteración propilítica, junto con venas de sulfuros; (3) A los 4509,7 ft se reconoció la asociación mineral típica de un skarn, con alteración progradada y retrogradada. Aún queda por esclarecer la cronología de estos eventos y la correlación que tengan entre sí (tabla 4).

La mineralogía y petrografía del Evento (1), se constituye fundamentalmente de cuarzo en venas que se encuentran rellenando cavidades dentro de esquistos grafitos; estas estructuras a pesar de estar compuestas en más del 80% por cuarzo, también presenta otros minerales como pirita.

La mineralogía y petrografía del Evento (2), mencionado anteriormente, está compuesta principalmente por cuarzo, epidota, clorita, carbonatos y sulfuros presentes en venas. Estos minerales están relacionados con un proceso de alteración propilítica que ha sustituido la mineralogía original de esquistos moscovíticos con grafito. La formación de epidota y clorita ocurrió a través de procesos de reemplazamiento mineral, conocidos como epidotización y cloritización.

La mineralogía y petrografía del Evento (3) antes referido se compone fundamentalmente de cuarzo, magnetita, granate, epidota, clorita y algunos sulfuros como pirita, pirrotita, calcopirita y bornita, los cuales están asociados a un evento tipo skarn (exo-skarn). La presencia de epidota y clorita se relaciona directamente con la etapa retrógrada del skarn, debido a su naturaleza hidratada. Además, la información geológica de la zona sugiere que el cuerpo ígneo causante de este skarn es de tipo oxidado, más específicamente un cuerpo ígneo adakítico.

Cabe recalcar que la presencia simultánea de magnetita y pirrotita en la mineralogía reconocida lleva a la conclusión que dentro de esta mineralogía tipo skarn se han sobreimpuesto más de un evento hidrotermal, dado que estos minerales se forman en ambientes químicamente distintos. La magnetita se forma típicamente en condiciones más oxidadas, mientras que la pirrotita se asocia con ambientes más reducidos, lo que hace improbable que ambos se hayan generado en un solo evento hidrotermal.

**Tabla 4.**

Tabla resumen de los contextos paragenéticos asociados a los diferentes eventos hidrotermales reconocidos

Tabla Paragenética				
Eventos		Evento 1	Evento 2	Evento 3
Características		Venas y vetillas de cuarzo	Alteración Propilítica	Asociación mineral tipo skarn
Mineralogía	Bornita			_____
	Calcita		_____	
	Calcopirita		_____	
	Clorita		_____	
	Cuarzo	_____		_____
	Epidota		_____	
	Granate			_____
	Magnetita			- - - ? - ? - ? -
	Pirita	_____		_____
	Actinolita			_____
Pirrotita			- - - ? - ? - ? -	

## 7. Discusión

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con lo descrito por Monsalve *et al.* (1998), se observan algunas discrepancias, especialmente en la caracterización de las litologías a mayor profundidad, correspondientes en este trabajo a las muestras LFC #3, LFC #4 y LFC #5. Monsalve *et al.* (1998) describe estas litologías como gneises calcosilicatados y gneises biotíticos; sin embargo, los datos actuales indican que tanto la muestra LFC #3 como la muestra LFC #4 corresponden a esquistos, específicamente cuarzomoscovítico y moscovítico con grafito, respectivamente. De igual manera, la muestra LFC #5 difiere de lo reportado, ya que los datos obtenidos en este estudio la identifican como una mineralogía tipo skarn, compuesta

principalmente por cuarzo, magnetita, granate, epidota, clorita y sulfuros como pirita, pirrotita, calcopirita y bornita. Esta mineralogía indica la presencia de procesos de alteración progradada, representados por el granate, y retrógrada, evidenciados por la epidota, clorita y actinolita.

Por otro lado, se encontraron coincidencias significativas con lo descrito por Monsalve *et al.* (1998) en las muestras LFC #1 y LFC #2, cuyas litologías coinciden con las características reportadas en dicho estudio, reafirmando algunas de sus observaciones.

Aunque no se alinea directamente con los objetivos planteados, es importante destacar la posible existencia de una estructura termal invertida. Monsalve *et al.* (1998) informaron sobre una unidad de gneises (clasificados como esquistos en este estudio) que se superpone a una unidad de filitas, a la cual no se tuvo acceso en la presente investigación. Esta disposición invertida podría haber surgido a causa de una falla que desplazó las rocas, resultando en la inusual superposición de gneises sobre filitas. Así mismo, los datos aquí presentados muestran evidencias de la existencia de procesos estructurales, algunos ejemplos de esto son clivaje (figura 22B) y cizallamiento (figura 21A) en cristales de moscovita y sigmoides de cuarzo (figura 22D).

Los resultados de este estudio, comparados con los de Sturchio *et al.* (1988), indican que las inclusiones fluidas en las venas de cuarzo del evento 1 no están relacionadas con el sistema geotérmico activo. Según Sturchio *et al.* (1988), los geotermómetros isotópicos y químicos reportan temperaturas de hasta 175 °C en los acuíferos en ebullición, en contraste con las temperaturas mínimas de atrapamiento encontradas en este estudio, que van de 225,4 °C a 320,9 °C. Estas temperaturas de atrapamiento reflejan las condiciones de los fluidos hidrotermales que originaron las venas, lo que permite una comparación con los fluidos del sistema geotérmico actual. Estas diferencias sugieren que las inclusiones fluidas analizadas podrían estar asociadas a

eventos hidrotermales previos y de mayor temperatura, independientes del sistema geotérmico activo de la región.

La alteración propilítica identificada como evento 2 se compone principalmente de clorita, carbonatos, epidota y piritita (figura 31). La formación de epidota en la muestra se atribuye a un proceso hidrotermal específico conocido como epidotización, en el cual la plagioclasa presente en la roca reacciona con los fluidos de alteración, generando epidota. Este mineral generalmente se forma a altas temperaturas ( $\approx 300$  °C) que no coinciden con las condiciones actuales del sistema geotérmico en la zona. Esto sugiere que la formación de la epidota ocurrió durante un evento hidrotermal de mayor temperatura, diferente al sistema geotérmico activo en la actualidad.

De igual manera, la separación del evento 3 del sistema geotérmico actual se refuerza por la presencia de granate en la mineralogía asociada a dicho evento, un mineral que se forma a temperaturas aún más elevadas, entre 400°C y 600°C. Esto indica que el evento hidrotermal correspondiente a la formación del granate fue parte de un sistema de mayor temperatura, lo que evidencia la complejidad geotérmica y la superposición de diferentes eventos hidrotermales en la zona.

En la zona de estudio se han identificado diversas intrusiones ígneas a lo largo del tiempo, entre las cuales destacan el stock de Manizales, el Batolito de El Bosque y el stock del Hatillo. Asociados a estos eventos ígneos, se han identificado múltiples eventos paleohidrotermales, evidenciados por la presencia de venas con diversas composiciones, que podrían contener mineralización de importancia económica, como se ha documentado en áreas cercanas, como Líbano (Tolima) y Argelia (Valle del Cauca). En vista de esto, se recomienda la realización de estudios adicionales para estimar el potencial de mineralización presente en el skarn, dado que

estos pulsos magmáticos han mostrado evidencias claras de mineralización significativa en zonas aledañas al área de estudio.

## 8. Conclusiones

- Posterior al metamorfismo que formó las rocas del Complejo Cajamarca, se registraron tres eventos hidrotermales diferentes, los cuales se identifican por la formación venas y vetillas de cuarzo que cortan paralelamente la foliación (1), evidencias de una alteración propilítica (2) y, por último, un skarn (3).
- Los eventos hidrotermales reportados no guardan relación con el actual evento geotérmico, ya que todos ellos presentan indicios de formación a temperaturas superiores a las registradas en el sistema geotérmico del Valle de Nereidas.
- Las venas de cuarzo presentes en las rocas analizadas presentan una textura tipo *blocky* que posiblemente puedan corresponder a venas sintaxiales. Sin embargo, al no observar el borde de las venas no es posible aseverar esta afirmación.
- La alteración mineral más evidente en las muestras estudiadas corresponde a alteración propilítica, caracterizada por la asociación mineral junto con la presencia de vetillas de sulfuros.
- Las evidencias indican que la mineralogía tipo skarn encontrada puede ser de tipo skarn de Cu-Fe, debido a la presencia predominante de andradita sobre otros minerales, así como la presencia de minerales de cobre (calcopirita y bornita) y hierro (magnetita).
- Las inclusiones fluidas encontradas, posiblemente pertenecen al sistema acuoso-salino tipo H<sub>2</sub>O-NaCl.

- Las temperaturas de homogenización (Th) obtenidas indican un rango de temperatura mínima de atrapamiento entre 225,4 °C y 320,9 °C, con un promedio de 284,1 °C.

## **9. Recomendaciones**

A pesar de la variedad de datos obtenidos, aún persisten numerosas incógnitas sobre la geología de las rocas presentes en el Pozo Nereidas-1. Esto se debe a que el enfoque del presente estudio no fue realizar un relageo completo del pozo, sino un relageo detallado de pequeños tramos de la columna estratigráfica. Por ello, se recomienda llevar a cabo un relageo integral del pozo, con el fin de obtener datos que puedan complementar la historia de la evolución geológica de la zona, incluyendo la posible inversión termal, el origen del skarn y la relación entre las intrusiones reportadas con los eventos hidrotermales aquí descritos.

Con este objetivo, se sugiere realizar dataciones Lutecio-Hafnio en granates para determinar la edad del skarn, así como dataciones argón-argón en sericita para establecer la edad del evento de más baja temperatura. Asimismo, se recomienda profundizar en los estudios microtermométricos y petrográficos de las rocas asociadas al skarn, con el fin de obtener una comprensión más detallada de su composición y evolución.

### Referencias Bibliográficas

- Angée Moreno, D. L. (2022). Origen y evolución de la mineralización aurífera en la mina El Gran Porvenir, Líbano, Tolima (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Bakker, R. (2003). Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3), 3-23. doi: 10.1016/S0009 2541(02)00268-1.
- Bakker, R. (2011). The use of quantities, units and symbols in fluid inclusion research. XXI European Current Research on Fluid Inclusions, Leoben, Austria.
- Bons, P. D., Elburg, M. A., & Gomez-Rivas, E. (2012). A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology*, 43, 33-62.
- Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C. J., Bayona, G., Lara, M., & Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 277, 199-209.
- Camprubí, A. (2010). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 25-42.
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block.
- Cediel, F., & Shaw, R. P. (Eds.). (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction* (pp. 3-95). Springer International Publishing.
- CHEC - Central Hidroeléctrica de Caldas, (1983). Instituto colombiano de Energía eléctrica, consultoría técnica colombiana Ltda., geotérmica italiana. In: Etapa, A. (Ed.), Fase II, Vols. II, III. Bogotá. Investigación Geotérmica Macizo volcánico del Ruíz.

- Giggenbach, W. F. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1-2), 13-39.
- González, H. (2001). Planchas 206 y 225 Manizales – Nevado del Ruíz. Escala 1:100.000, memoria explicativa. Instituto de investigación e información geocientífica, mineroambiental y nuclear (INGEOMINAS).
- Hincapié-Jaramillo, G. (2013). Análisis estructural en la zona del proyecto geotérmico de EPM-CHEC. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectonomagmatic Approach. PhD Thesis. University of Barcelona, Spain (1000 pp.).
- Macias, P. A., & Granja, G. (2020). Cinemática, análisis deformativo y configuración estructural, del sector Laguna Baja; entre el río Claro y el río Molinos, Villamaría (Caldas) (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia).
- Martínez, L., Valencia L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J., & Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano.
- Maya, M. (1992). Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. Ingeominas, *Boletín Geológico*, 32(1-3): 127-187.
- Maya, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, Ingeominas, 35, 43-57.

- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis estructural al noreste del volcán Nevado del Ruíz, Colombia-Aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. *Econ Geol* 100th Ann Vol, 299–336.
- Ocampo, O. L., Restrepo, A., Botero, A., Forero, A. T., Ospina, C., Marín, E. S., Ríos, J. P., Álvarez, J. N., Castañeda, K., Montoya, K., Salazar, K., Becerra, L., Berrio, L. V., Pineda, R., Gómez, S., & González, T. (2019). Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del Departamento de Caldas: Documento para responsables de política.
- Ortiz-González, J. A. (2023). Aplicación del enfoque de desarrollo en cascada en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 109-128.
- Oviedo, M. J., Blessent, D., López-Sánchez, J., & Raymond, J. (2023). Contribution to the characterization of the Nevado del Ruiz geothermal conceptual model based on rock properties dataset. *Journal of South American Earth Sciences*, 124, 104259.
- Pareja, E., & García, R. (2013). Análisis estructural de la falla Nereidas, en el sector de Nereidas, Villamaría–Caldas (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Geología, Universidad de Caldas).
- Pirajno, F. (2008). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science y Business Media.
- Quintana-Cárdenas, J. (2023). Mecanismos de deformación en rocas con metamorfismo dinámico (pasantía de investigación). Universidad Industrial de Santander.

- Ramos Rosique, A. (2007). Microscopía, microespectrometría y modelado termodinámico de inclusiones fluidas acuosas y de hidrocarburos (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/tesisAldoRR07.pdf>.
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Restrepo13/publication/344158802\\_Chapter\\_3\\_Tectonostratigraphic\\_Terranes\\_in\\_Colombia\\_An\\_Update\\_First\\_part\\_Continental\\_Terranes/links/5f56b4f8458515e96d38f542](https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Restrepo13/publication/344158802_Chapter_3_Tectonostratigraphic_Terranes_in_Colombia_An_Update_First_part_Continental_Terranes/links/5f56b4f8458515e96d38f542).
- Restrepo, J. J., Ordóñez-Carmona, O., Armstrong, R., & Pimentel, M. M. (2011). Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 497-507.
- Rosero Portilla, L. S. (2023). Aporte a la exploración del proyecto geotérmico Valle de Nereidas, CHEC-EPM, mediante el ajuste y análisis de la configuración geológica estructural.
- Schaefer, S. (1995). Nevado del Ruiz Volcano, Colombia: Magmatic system and evolution. PhD Thesis (Geología). Tucson: Arizona State University.
- Stix, J., Layne, G. D., & Williams, S. N. (2003). Mechanisms of degassing at Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of the Geological Society*, 160(4), 507-521.
- Sturchio, N., Williams, S., García, N., & Londoño, A. (1988). The hydrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 50, 399-412.
- Toro Toro, L. M., Borrero-Peña, C. A., & Ayala Carmona, L. F. (2010). Petrografía y geoquímica de las rocas ancestrales del volcán Nevado del Ruiz. *Boletín de Geología*, 32(1), 95-105.
- Velasco, F. (2004). Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. XXIII Curso Latinoamericano de Metalogénia, Mendoza, Argentina.

- Viñuela, J. M., & Sánchez, J. S. (1991). Las inclusiones fluidas: Métodos de análisis e interpretación. In Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración (pp. 79-146). Centro de Estudios Ramón Areces.
- Wilkins, R. W., & Barkas, J. P. (1978). Fluid inclusions, deformation and recrystallization in granite tectonites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65(3), 293-299.