

Estudio de las alteraciones hidrotermales presentes en los granitoides aflorantes en el sector de la  
Vereda Las Flores (Municipio de Mogotes, Macizo de Santander, Colombia)

Jorge Hernán Díaz Martínez, Natalia Yineth Manzano Ascanio

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo (a)

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

PhD en Geología económica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A mi madre y a mi abuela por su amor, apoyo, orientación y dedicación durante mi etapa universitaria.

A mi familia por alentarme cada día a cumplir este logro.

A mis amigos por su paciencia y buenos deseos, quienes experimentaron de cerca esta etapa y me ayudaron a avanzar.

A Natalia, por desarrollar este proyecto juntos a pesar de los percances.

A todas las personas que de algún modo aportaron para poder realizar este proyecto.

***Jorge Hernán Díaz Martínez***

### **Dedicatoria**

A Dios por no soltar mi mano ni un segundo.

A mis papás y mi abuelita, por su incalculable amor y apoyo durante esta etapa. Gracias por sus incansables esfuerzos y en especial, por creer en mí.

A mi familia y amigos por su paciencia y cariño al escucharme y aconsejarme. Gracias por no dejarme sola.

A Jorge, por aceptar el reto de sacar este proyecto adelante juntos.

A Daniel, por ser mi mayor apoyo durante mis últimos años universitarios, no existen palabras suficientes para expresar mi amor y agradecimiento.

Al profesor Andrés Cáceres, por su comprensión y palabras de aliento justo cuando las necesité.

A todas aquellas personas que contribuyeron de una u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

*Natalia Yineth Manzano Ascanio*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y habernos dado la oportunidad de formarnos profesionalmente.

Al profesor Luis Carlos Mantilla, por su tiempo, paciencia, consejos y apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

Al Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará, especialmente al profesor Carlos Alberto Ríos por su apoyo y colaboración, así como al profesor Carlos Villareal por su tiempo, buena disposición y acompañamiento en la adquisición de datos.

Al profesor Juan Diego Colegial y al Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) por permitirnos el uso de los equipos de laboratorio.

A nuestros compañeros de la asignatura campo II en el municipio de Mogotes, especialmente a Camila, Leidy y Silvio, así como a los grupos G3 – 3 y G2 – 4 del período académico 2023-1, por su ayuda en la identificación y recolección de las muestras objeto de estudio de este proyecto.

Al profesor Luis Fernando Anaya, técnico del laboratorio de preparación de muestras y secciones delgadas del Parque Tecnológico de Guatiguará, por su ayuda en la elaboración de las secciones delgadas requeridas en este proyecto, así como por su valiosa amistad.

Al Centro de investigaciones en catálisis (CICAT), por facilitarnos el nitrógeno líquido necesario para la microtermometría de inclusiones fluidas, especialmente a Leonela Díaz por su colaboración para agilizar el proceso.

Al Laboratorio de corte y preparación de secciones delgadas de la Universidad Industrial de Santander, especialmente a su técnico encargado Luis Eduardo Garrido.

A César Betancourt por permitirnos amablemente el acceso a los laboratorios de microscopía óptica de la Universidad Industrial de Santander.

Al proyecto titulado: Petrogénesis de las rocas metasomáticas aflorantes entorno a la falla de Onzaga (Departamento de Santander, Cordillera oriental) código 2832, auspiciado por la VIE de la UIS.

Al profesor Andrés Cáceres por su apoyo, amabilidad y disposición incondicional para ayudarnos a resolver inquietudes sobre yacimientos minerales.

A nuestro gran amigo Fabián Samuel Reyes por su amistad sincera a través de los años, al igual que su agrado e interés a la hora de discutir ideas e inquietudes geológicas.

A las personas del municipio de Mogotes por su hospitalidad, sencillez y simpatía durante la realización del trabajo de campo.

A profesores y amigos que hicieron parte de este largo, difícil, pero satisfactorio proceso.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología .....	15
2.1 Trabajo de Pre-campo .....	15
2.2 Trabajo de campo.....	16
2.3 Trabajo de oficina y laboratorio.....	16
2.3.1 Descripción macroscópica .....	16
2.3.2 Elaboración de secciones delgadas .....	16
2.3.3 Descripción petrográfica.....	17
2.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	17
2.3.5 Microtermometría de inclusiones fluidas.....	18
3. Generalidades del área de estudio.....	18
3.1 Localización.....	18
4. Antecedentes .....	19
4.1 Marco geológico regional .....	19
4.2 Marco geológico local.....	20
4.2.1 Batolito de Mogotes.....	20
4.2.2 Falla de Bucaramanga.....	21
4.3 Hidrotermalismo y alteraciones .....	21
5. Consideraciones teóricas.....	22
5.1 Alteraciones hidrotermales .....	22
5.2 Pegmatitas.....	23
5.3 Alteración tipo Greisen.....	24
6. Resultados .....	25
6.1 Relaciones litológicas .....	25
6.1.1 Cuarzo-monzonita.....	25
6.1.2 Monzogranito.....	26
6.1.3 Pegmatita.....	27
6.1.4 Epidotización .....	28
6.1.5 Diques de diabasa .....	29

6.1.6 Alteración tipo Greisen .....	30
6.1.7 Alteración Cuarzo – Sericita.....	31
6.2 Generalidades de las muestras analizadas.....	34
6.3 Análisis petrográfico.....	37
6.4 Análisis Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	43
6.5 Estudio de inclusiones fluidas.....	47
6.5.1 Petrografía de inclusiones fluidas .....	47
6.5.2 Microtermometría de inclusiones fluidas.....	52
7. Discusión.....	55
8. Conclusiones.....	61
9. Recomendaciones .....	62
Referencias Bibliográficas .....	63
Apéndices.....	68

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Coordenadas de los afloramientos correspondientes a las litologías aflorantes</i> .....	33
Tabla 2 <i>Temperaturas del punto eutéctico para los subsistemas salino-acuosos H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-FeCl-FeCl<sub>3</sub></i> .....	53
Tabla 3 <i>Paragénesis de minerales identificados</i> .....	56
Tabla 4 <i>Clasificación de pegmatitas según (Černý, 1991)</i> .....	70
Tabla 5 <i>Clasificación de pegmatitas según (Černý y Ercit, 2005)</i> .....	71

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Mapa de localización de la zona de estudio</i> .....	19
Figura 2 <i>Cuarzomonzonita con presencia de xenolito de rocas ígneas de eventos magmáticos anteriores de edad Paleozoica (?)</i> .....	26
Figura 3 <i>Monzogranito leucocrático (altamente diaclasado)</i> .....	27
Figura 4 <i>Dique granítico pegmatítico cortando rocas cuarzomonzoníticas</i> .....	28
Figura 5 <i>Evidencia de epidotización afectando rocas cuarzomonzoníticas</i> .....	29
Figura 6 <i>Dique de diabasa (a.k.a. Microgabro) cortando rocas cuarzomonzoníticas</i> .....	30
Figura 7 <i>Bolsa pegmatítica con evidencia de alteración tipo greisen en rocas monzograníticas</i>	31
Figura 8 <i>Alteración cuarzo-sericítica que afecta las rocas cuarzomonzoníticas y monzograníticas</i> .....	32
Figura 9 <i>Vena de cuarzo-sulfuros presente en rocas con alteración hidrotermal</i> .....	32
Figura 10 <i>Mapa de la distribución regional de las litologías presentes en el área de estudio.</i> ...	33
Figura 11 <i>Análisis macroscópico de la muestra (NJ-1) con evidencia alteración tipo Greisen ..</i>	35
Figura 12 <i>Afloramiento del cual se recolectó la muestra (NJ-2)</i> .....	36
Figura 13 <i>Análisis macroscópico de la pegmatita</i> .....	36
Figura 14 <i>Microfotografías de la muestra (NJ-1)</i> .....	39
Figura 15 <i>Microfotografía de la muestra (NJ-1)</i> .....	40
Figura 16 <i>Microfotografías de la muestra (NJ-1)</i> .....	41
Figura 17 <i>Mineralogía observada a partir de las secciones delgadas elaboradas para microtermometría</i> .....	42
Figura 18 <i>Espectros de dispersión de los tipos de moscovita presentes en la muestra (NJ-1)</i> ....	43

Figura 19 <i>Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)</i> .....	44
Figura 20 <i>Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)</i> .....	45
Figura 21 <i>Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)</i> .....	45
Figura 22 <i>Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)</i> .....	46
Figura 23 <i>Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)</i> .....	47
Figura 24 <i>Inclusiones fluidas con forma ovoidal</i> .....	48
Figura 25 <i>Inclusiones fluidas con forma irregular</i> .....	49
Figura 26 <i>Inclusiones fluidas con forma tabular</i> .....	49
Figura 27 <i>Asociaciones de inclusiones fluidas</i> .....	50
Figura 28 <i>Asociaciones de inclusiones fluidas</i> .....	51
Figura 29 <i>Inclusiones fluidas monofásicas de líquido</i> .....	51
Figura 30 <i>Inclusiones fluidas secundarias</i> .....	52
Figura 31 <i>Registro fotográfico de las inclusiones fluidas según la variación de la temperatura en el sistema <math>H_2O-NaCl-CaCl_2</math></i> .....	54
Figura 32 <i>Registro fotográfico de las inclusiones fluidas según la variación de la temperatura en el sistema <math>H_2O-NaCl-FeCl_2</math></i> .....	55
Figura 33 <i>Modelo genético propuesto</i> .....	56
Figura 34 <i>Venas reportadas de feldespato potásico</i> .....	58
Figura 35 <i>Isotermas (en grados Celsius) del liquidus del hielo a 1 atm de presión en el sistema <math>H_2O-NaCl-CaCl_2</math> con los ejes en unidades de wt%</i> .....	59
Figura 36 <i>Isotermas (en grados Celsius) del liquidus del hielo a 1 atm de presión en el sistema <math>H_2O-NaCl-FeCl_2</math> con los ejes en unidades de wt%</i> .....	60
Figura 37 <i>Mapa de vías de acceso a la zona de estudio</i> .....	68

**Lista de apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Vías de acceso.....	68
Apéndice B. Clasificación de pegmatitas .....	69

### Resumen

**Título:** Estudio de las alteraciones hidrotermales presentes en los granitoides aflorantes en el sector de la Vereda Las Flores (Municipio de Mogotes, Macizo de Santander, Colombia)\*

**Autor:** Jorge Hernán Díaz Martínez\*\*; Natalia Yineth Manzano Ascanio\*\*

**Palabras Clave:** Colombia, Batolito de Mogotes, Alteración Greisen, Pegmatita, Inclusiones Fluidas, Microtermometría, SEM, Microscopía Óptica.

### Descripción:

En el sector de la vereda Las Flores perteneciente al municipio de Mogotes (Santander), afloran cuerpos plutónicos graníticos correspondientes al Batolito de Mogotes. El cuerpo principal y más antiguo corresponde a cuarzomonzonita, acompañada de monzogranito leucocrático de gran dimensión, estos cuerpos son cortados por pegmatitas y se ven afectados además por algunas alteraciones hidrotermales tales como epidotización, alteración de tipo greisen, cuarzo-sericita con evidencia de venas de sulfuros. Se estudian las inclusiones fluidas presentes en los cristales de cuarzo de las muestras y se determina que alcanzan su homogeneización a estado líquido en un rango de temperatura entre 160°C - 228°C, y su punto eutéctico se logra a -37°C sugiriendo una composición de  $H_2O + NaCl + FeCl_2$ , adicionalmente, en este mismo rango, se encuentran otro grupo de inclusiones con un punto eutéctico de -52°C sugiriendo una composición de  $H_2O + NaCl + CaCl_2$ . Las temperaturas reportadas en este documento encontradas son muy bajas para un sistema pegmatítico, por lo tanto, el evento hidrotermal tipo greisen corresponde a una etapa tardimigmática relacionada a la etapa hidrotermal tardía, aproximadamente del periodo Triásico-Jurásico.

---

\* Trabajo de Grado

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

### Abstract

**Title:** Study of hydrothermal alterations present in the outcropping granitoids in the sector of the vereda Las Flores (Mogotes, Santander Massif, Colombia)\*

**Author(s):** Jorge Hernán Díaz Martínez\*\* ; Natalia Yineth Manzano Ascanio\*\*

**Key Words:** Colombia, Mogotes Batholith, Greisen Alteration, Pegmatite, Fluid Inclusions, Microthermometry, SEM, Optical Microscopy.

**Description:**

In the Vereda Las Flores sector of the municipality of Mogotes (Santander), there are granitic plutonic bodies corresponding to the Mogotes Batholith. The main and oldest body corresponds to quartz monzonite, accompanied by leucocratic monzogranite of large dimension, these bodies are cut by pegmatites and are also affected by some hydrothermal alterations such as epidotization, greisen type alteration, quartz-sericite with evidence of sulfide veins. The fluid inclusions present in the quartz crystals of the samples are studied and it is determined that they reach their homogenization to a liquid state in a temperature range between 160°C - 228°C, and their eutectic point is achieved at -37°C suggesting a composition of  $H_2O + NaCl + FeCl_2$ , additionally, in this same range, another group of inclusions is found with a eutectic point of -52°C suggesting a composition of  $H_2O + NaCl + CaCl_2$ . The temperatures reported in this paper are very low for a pegmatitic system, therefore, the greisen-type hydrothermal event corresponds to a tardimagmatic stage related to the late hydrothermal stage, approximately of the Triassic-Jurassic period.

---

\* Degree Work

\*\* Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School. Director: PhD. Luis Carlos Mantilla Figueroa. PhD Geologist.

## **Introducción**

Comprender los procesos que dan lugar a las alteraciones hidrotermales, ha sido un tema de gran interés para el desarrollo de diversas investigaciones durante décadas no solo en Colombia, sino alrededor del mundo. Estas alteraciones producto de la interacción entre los fluidos hidrotermales y las rocas en el subsuelo, han demostrado ser indicadores clave para la identificación y caracterización de depósitos minerales. Su estudio detallado y la correcta interpretación de resultados son de vital importancia no solo para la identificación de posibles yacimientos minerales, sino también para comprender los procesos geológicos que ocurren en la corteza terrestre.

En aras de cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados, se llevó a cabo una serie de análisis petrográficos, mineralógicos, geoquímicos y microtermométricos, cuyos resultados se comparan con la literatura reportada de la zona de estudio, lo anterior a fin de establecer nuevas relaciones y patrones geológicos que permitan entender mejor los procesos que dan lugar a estas alteraciones hidrotermales.

Esta investigación representa una oportunidad para impulsar la implementación de métodos más precisos y eficientes para la detección, mapeo y estudio detallado de alteraciones hidrotermales, lo cual podría representar una mejora significativa en los procesos de exploración y prospección de recursos minerales. Por otro lado, se espera que los resultados obtenidos en este estudio permitan un mejor entendimiento de los procesos geológicos asociados con las alteraciones hidrotermales presentes en el municipio de Mogotes y sus alrededores, y asimismo contribuyan a ampliar nuestro conocimiento sobre la dinámica de la corteza terrestre.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas plutónicas graníticas aflorantes en la Vereda Las Flores (Municipio de Mogotes) desde el punto de vista petrográfico y geoquímico, para establecer las condiciones fisicoquímicas que controlaron su formación.

### **1.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar la recopilación y posterior análisis de la bibliografía existente sobre la zona de estudio.
2. Desarrollar un estudio mineralógico-petrográfico del material encontrado mediante microscopía óptica y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).
3. Llevar a cabo un estudio petrográfico y microtermométrico de inclusiones fluidas a fin de elaborar un inventario de los diferentes pulsos paleo-hidrotermales registrados.
4. Establecer criterios de temporalidad que permitan determinar el orden cronológico de los eventos hidrotermales mediante el análisis composicional y textural de la roca.
5. Sugerir a la luz de nuevos datos, un modelo preliminar que establezca la génesis de las alteraciones hidrotermales objeto de estudio.

## **2. Metodología**

Para la realización de este proyecto se plantean las fases que se muestran a continuación.

### **2.1 Trabajo de Pre-campo**

Esta fase consiste en la recopilación de información disponible sobre la zona de estudio, sus características topográficas, cartográficas y geológicas, esta información se obtiene de mapas de la zona, informes de salidas de campo previas, proyectos de grado, artículos científicos y cualquier otro documento desarrollado en el área de interés de este proyecto.

## **2.2 Trabajo de campo**

La fase de campo de este proyecto se realizó durante la salida práctica de la asignatura Campo 2 desarrollada en marzo del año 2021 y dirigida por los docentes Luis Carlos Mantilla y Francisco Velandia. Durante esta fase se llevó a cabo el reconocimiento del área y, con base en la información recopilada en la fase previa, se identifican las litologías presentes y se hace una breve descripción y registro fotográfico de la geología observada, recolectando las muestras de mano objeto de estudio de este proyecto (NJ-1) y (NJ-2).

## **2.3 Trabajo de oficina y laboratorio**

En la fase de laboratorio se realiza la interpretación de datos obtenidos en campo y la aplicación de diversos métodos de análisis a las muestras recolectadas. Esta fase se subdivide en seis etapas explicadas a continuación.

### ***2.3.1 Descripción macroscópica***

Para comenzar con la descripción, se adecuaron las muestras de mano eliminando las áreas con alto grado de meteorización y se busca la roca fresca para poder observar sus características correctamente. Las muestras objeto de estudio se analizaron en el laboratorio de esteromicroscopía propiedad de escuela de Geología de la UIS con un estereomicroscopio binocular Nikon Ni-150 modelo C-PS y se realizó su respectiva descripción.

### ***2.3.2 Elaboración de secciones delgadas***

La elaboración de las secciones delgadas se llevó a cabo en el Laboratorio de Preparación de Muestras del Parque Tecnológico Guatiguará de la UIS. En primer lugar, se extrajo un plug con el equipo Cinco Automated Drill Press, al cilindro obtenido se le realizan los cortes necesarios en las direcciones indicadas para extraer las secciones con una cortadora de precisión Bühler Isomet Low Speed Shaw, se efectuaron más cortes a cada sección rebajando su espesor utilizando el

equipo Bühler PetroThin Thin Sectioning Sistema alcanzando el espesor requerido para la sección, posteriormente se pule como fase final de la preparación con una pulidora Bühler EcoMet 250 Grinder-Polisher. Se realizaron seis secciones delgadas de la muestra tipo Greisen, tres para análisis petrográfico de la roca y tres más espejo para petrografía de inclusiones fluidas, y una para la pegmatita.

### ***2.3.3 Descripción petrográfica***

**2.3.3.1 Descripción petrográfica mineralógica.** Se analizaron las secciones delgadas mediante microscopía óptica de luz transmitida usando el equipo NIKON Eclipse E200 50/POL. Se realizó la revisión petrográfica identificando los minerales presentes en las muestras y mediante un conteo de 300 puntos en cada sección, fue posible obtener una aproximación a los porcentajes de cada mineral en la composición total de la roca.

**2.3.3.2 Descripción petrográfica de inclusiones fluidas.** Las cuatro secciones delgadas elaboradas para el análisis de inclusiones fluidas se examinaron en el laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Aplicada ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, con ayuda del microscopio Leica modelo DM750P, el cual está equipado con una cámara que facilita la visualización de las inclusiones fluidas en el monitor, permitiendo de esta manera, observar mejor sus características y obtener una descripción precisa y detallada.

### ***2.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)***

Se sometieron al análisis SEM dos secciones delgadas y un fragmento de roca, las secciones fueron previamente recubiertas con grafito y llevadas al metalizador Quorum Q150R, para luego ser revisadas en el Microscopio Electrónico de Barrido FEG Quanta FEG 650 (Field Emission Gun). Se examinaron varios puntos correspondientes a los minerales opacos que no se pudieron caracterizar en el microscopio.

### ***2.3.5 Microtermometría de inclusiones fluidas***

Posterior a la descripción petrográfica de las inclusiones fluidas, se cortan las secciones delgadas y se despegan del portaobjetos para extraer pequeños chips, los cuales se introducen en la platina THMS 600 de marca LINKAM que esta incorporada a un microscopio ZEISS y que permite la visualización de la muestra al interior de la platina. En este equipo, la muestra se somete a procesos de enfriamiento y calentamiento con el fin de medir la temperatura de homogeneización y el punto eutéctico de las inclusiones fluidas, lo anterior a fin de conocer el estado y temperatura en la cual se dio su atrapamiento y posteriormente determinar su composición.

## **3. Generalidades del área de estudio**

### **3.1 Localización**

La zona de estudio de este proyecto de investigación se ubica al NE del casco urbano del municipio de Mogotes (Santander) como se muestra en la Figura 1, abarcando las veredas “Las Flores” y “El Gaital”. El punto de recolección de la primera muestra (NJ-1) se localiza a 4.7 km sobre las coordenadas X: 1'125.647; Y: 1'209.718; h: 1.905 msnm, mientras la segunda muestra (NJ-2) se ubica a 8.5 km sobre las coordenadas X:1'129.344; Y: 1'207.066; h: 1.926 msnm. El área en la que se centra este proyecto se encuentra en la plancha topográfica 136IIIIC, escala 1:25.000 del Instituto Agustín Codazzi (Instituto Geográfico Agustín Codazi, 2014). La descripción de las vías de acceso se hace en el Apéndice A. Vías de acceso

**Figura 1***Mapa de localización de la zona de estudio*

## 4. Antecedentes

### 4.1 Marco geológico regional

La contextualización de la zona de estudio a nivel regional resulta indispensable para comprender su evolución geológica, así como sus principales características litológicas y estructurales. El Macizo de Santander se encuentra localizado en el departamento del mismo nombre, en un nodo de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, este se conforma mayormente por rocas ígneas y metamórficas, y en menor medida por rocas sedimentarias.

El Macizo de Santander es un bloque estructuralmente levantado que se halla limitado por las fallas Bucaramanga – Santa Marta, Oca y Boconó (Mantilla *et al.*, 2011), forma parte del

sistema orogénico Andino (Andes del norte) y es continuación de la cordillera oriental de Colombia y forma el margen SW del bloque de Maracaibo (Van Der Lelij *et al.*, 2016). Limita al oeste por la Falla Bucaramanga - Santa Marta, al este por el sistema de fallas Pamplona - Cubogón – Mercedes y con cinturones Cenozoicos que lo separan de los Andes de Mérida (Ward *et al.*, 1973) al sur con el Macizo La Floresta y al norte con la Serranía del Perijá.

Según (Ward *et al.*, 1973) las rocas del basamento del Macizo de Santander se localizan en el Neis de Bucaramanga, el Ortoneis y la Formación Silgará. Esta última posteriormente denominada Esquistos de Silgará por (Urueña, 2014). Estas unidades están cubiertas en discordancia por rocas sedimentarias de la Formación Floresta del Devónico (Cediel, 1969). Algunas dataciones de U/Pb en circón indican magmatismo posterior al metamorfismo, representado por metavulcanitas y plutones que intruyen el basamento metamórfico, con edades U/Pb en circón del Silúrico, Devónico Inferior, Carbonífero y límite Triásico-Jurásico (Goldsmith *et al.*, 1971) (Mantilla *et al.*, 2011) (Van Der Lelij R. , 2013).

## **4.2 Marco geológico local**

### **4.2.1 Batolito de Mogotes**

El Batolito de Mogotes está constituido principalmente por monzogranitos y en menor proporción por granodioritas. En dirección del Municipio de Onzaga (sector SE de la unidad), la roca es una granodiorita localmente porfirítica (Ward *et al.*, 1973). Las granodioritas son comunes principalmente al E y NE del municipio de San Joaquín y en menor cantidad ocurren al SE de este y al norte de Onzaga. Al noroeste en cercanías de Cepitá también se encuentran granodioritas. Cuarzodioritas ocurren en la parte norte del cuerpo y como enclaves máficos pequeños de hasta 2 cm de diámetro, redondeados en el monzogranito (Correa *et al.*, 2016). En el extremo suroccidental del cuerpo, en la vía que de Mogotes conduce a San Joaquín, afloran un cuerpo de criolitas de

feldespatos alcalinos y traquitas de feldespatos alcalinos, que fue reportado por (Ward *et al.*, 1973) y posteriormente cartografiado por (Ward *et al.*, 1977) como una parte del Granito de Pescadero.

#### **4.2.2 Falla de Bucaramanga**

La Falla de Bucaramanga es una estructura de rumbo regional, la cual se considera como el límite Oeste del Bloque de Maracaibo y el Macizo de Santander (núcleo de la Cordillera Oriental de Colombia) (Velandia, 2017). Es el rasgo estructural más notorio y de gran extensión que atraviesa la región centro-oriental del Departamento de Santander, con una dirección estimada de N20°W (Royero y Clavijo, 2001). Se considera como un sistema de fallas de rumbo (Campbell, 1965; León, 1991; Vargas y niño 1992; Clavijo, *et al.*, 1993; Clavijo, 1994 en (Royero y Clavijo, 2001) con movimiento sinistral, cuyo desplazamiento se calcula en unos 100 a 110 km (Campbell (1965) y Tschanz, *et al.*, (1969, 1974) en (Royero y Clavijo, 2001).

#### **4.3 Hidrotermalismo y alteraciones**

Algunas zonas del batolito de Mogotes presentan afectación, producto de procesos hidrotermales los cuales han sido evidenciados y descritos por diversos estudios previamente desarrollados y que se exponen brevemente a continuación. Se describen bandas de alteración hidrotermal con rumbo N23W y espesor entre uno y tres metros, en las cuales se identifican cinco eventos: el primero de ellos es un evento de Epidotización, un segundo evento de Cloritización, el tercero corresponde a un evento de Clorita+Epidota+Cuarzo+sericita acompañado de vetillas de Cuarzo+Clorita, el cuarto es un evento de Cuarzo-Sericita y por último Silicificación y Piritización, se identificaron también venas de Cuarzo+Pirita con contenidos de Oro y Plata (Gamboa, 2016).

Según (Pinilla y Almanzar, 2017), se definen tres eventos principales, en primer lugar, la alteración Potásica producto del intercambio entre cationes de K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>/Ca<sup>+</sup> el cual se desarrolla en fluidos neutros y se genera por la adición de potasio al sistema (Robb, 2005). El segundo evento

corresponde a una alteración hidrotermal correlacionable con la alteración sericítica denominada por (Sillitoe, 2010) caracterizada por su asociación mineral de clorita, sericita, rutilo y cuarzo de alteración, describen la hematización como tercer evento hidrotermal ocasionado por la interacción de fluidos oxidantes que contienen hierro.

Según (Ardila y Ayala, 2017), se evidencian cinco eventos alteración hidrotermal definidos como: Metasomatismo Álcali, Cloritización, evento de alteración Moscovita-Cuarzo-Rutilo y un evento de Cuarzo-Sericita siendo este el principal y para el cual mediante análisis geocronológico  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  realizados en Sericita hidrotermal se reporta una edad de  $184\pm 1$  Ma.

Según (Guerrero y Oviedo, 2018), se identifican dos alteraciones correspondientes a la alteración Cuarzo-Sericita asociada a cuerpos Riolíticos y la segunda alteración denominada como un evento de Epidotización identificado por una paragénesis Epidota $\pm$ Cuarzo $\pm$ Albita $\pm$ Apatito. Mencionan también alteraciones menores las cuales tienden a ser más locales y estas son: evento de Silicificación caracterizado por la presencia de cuarzo calcedónico, Cloritización y una alteración tipo Clorita-Sericita.

Según (Reyes, 2021), se sugiere una alteración de sericita, especularita y moscovita gruesa hidrotermal de la roca caja como evidencia de un ambiente subepitermal con una superposición de eventos de ambiente epitermal representado por venas hidrotermales de Cuarzo-Especularita $\pm$ sulfuros (pirita, galena, esfalerita, calcopirita), estos sulfuros junto con cuarzo de textura crustiforme corresponden a la mineralogía dominante del ambiente epitermal.

## **5. Consideraciones teóricas**

### **5.1 Alteraciones hidrotermales**

Las alteraciones hidrotermales implican modificaciones de carácter composicional y textural en las rocas preexistentes (Véliz *et al.*, 2012). Estos son procesos de tipo fisicoquímico

considerablemente complejos que enlazan los cambios, tanto en la mineralogía de la roca y su composición química, como las texturas de la roca a lo largo del tiempo geológico (Seedorf, 2005). Estos cambios mencionados anteriormente, se traducen como el resultado de la fuerte interacción de fluidos hidrotermales a elevadas temperaturas, con las rocas del subsuelo con las que cuales tienen contacto, esto, principalmente como producto de la porosidad o permeabilidad de la roca, ya sea de tipo primaria o secundaria (Pirajno, 2009) en (Malagón y Saa, 2021).

Actualmente, es elevado el número de tipos de alteraciones hidrotermales reconocidas, las cuales son fácilmente identificadas por sus asociaciones minerales características, estos diversos tipos de alteración dependen en gran medida de la composición del fluido hidrotermal, la composición química de la roca encajante, la temperatura, el tiempo de interacción entre el fluido hidrotermal y la roca, la acidez (pH), entre otros (Véliz *et al.*, 2012).

## **5.2 Pegmatitas**

A grandes rasgos, las pegmatitas son rocas ígneas intrusivas con texturas de tamaño muy grueso a gigante (Simmons y Webber, 2008). Según la definición acuñada por (London, 2008), “una pegmatita es una roca fundamentalmente ígnea, normalmente de composición granítica y tamaño de grano variable que presenta abundantes texturas minerales indicativas de un crecimiento direccional, y que forma cuerpos claramente delimitables y diferenciados de las rocas ígneas o metamórficas en la que se encuentran”. Dentro de las características más importantes de las pegmatitas están, además de la variación de tamaño de grano, las fábricas anisotrópicas, la heterogeneidad y el fraccionamiento químico (Llera, 2014).

Se han propuesto muchas hipótesis diferentes para explicar las pegmatitas, la mayoría de las cuales datan del siglo XIX (London, 2008), sin embargo, aún no ha surgido ningún modelo universalmente aceptado de génesis de pegmatitas que explique satisfactoriamente todas las

diversas características de las pegmatitas graníticas. Actualmente, la mayoría de los investigadores se inclina por la génesis a partir de fundidos residuales derivados de la cristalización de plutones graníticos (Simmons y Webber, 2008).

Para una mayor profundización en la clasificación de este tipo de rocas ver Apéndice B.

Clasificación de pegmatitas

### **5.3 Alteración tipo Greisen**

La alteración hidrotermal tipo greisen consiste en una asociación de cuarzo y mica con cantidades variables de fluorita, topacio y turmalina (Garrido *et al.*, 2017), esta alteración se forma cuando fluidos hidrotermales ricos en volátiles, como vapor de agua y dióxido de carbono, interactúan con el granito adyacente durante un evento de alta temperatura.

La formación de un greisen es específica de las zonas de cúpula de granitos altamente diferenciados (tipo S) que contienen mineralización de Sn y W, así como concentraciones significativas de otros elementos incompatibles como F, Li y B (Robb, 2005). Las observaciones de campo han demostrado que el greisen puede formarse (i) a escala local adyacente a las vetas o fracturas presentes en el granito, como en Cligga Head (Hall, 1971), y (ii) a gran escala como greisen masivo que está presente principalmente en las porciones apicales del granito mineralizado, como en Cinovec, East Kemptville (Halter *et al.*, 1996) (Launay *et al.*, 2019).

El proceso de greisenización se traduce en una ruptura de feldespatos y biotita y ocurre generalmente en las cúpulas de las intrusiones durante la etapa de enfriamiento de las intrusiones graníticas y las primeras etapas de la actividad hidrotermal. Numerosos estudios han establecido que la greisenización es el resultado de fuertes interacciones entre rocas graníticas y fluidos ácidos a temperaturas que oscilan entre 250° C y 450° C (M. Stempok (1987), A. C. Bishop (1989), G.

N. Shcherba (2009), R. G. Taylor y P. J. Pollard (1988) y G. P. Zraisky y F. M. Stoyanovskaya (1995)) en (Launay *et al.*, 2019).

## **6. Resultados**

### **6.1 Relaciones litológicas**

Durante la fase de campo se identificaron las litologías presentes en el área de estudio, los cuerpos principales corresponden a Cuarzomonzonita y Monzogranito, adicionalmente, se apreciaron cuerpos menores como diques de pegmatita y diques de diabasa que intruyen y afectan estas masas principales. Asimismo, alteraciones hidrotermales como epidotización, alteración fílica, alteración tipo greisen y venas de cuarzo – sulfuros también se evidencian en la zona.

#### **6.1.1 Cuarzo-monzonita**

La litología más antigua presente en la zona y a su vez la masa principal, corresponde a la Cuarzomonzonita – Cuarzosienita – Cuarzomonzodiorita, términos con los cuales se le denomina de acuerdo con la relación del porcentaje de plagioclasa y feldespato potásico. Adicionalmente, exhibe color blanco rosáceo, equigranular y subporfirítico. Localmente se pueden encontrar en ella algunos xenolitos cuya composición no se logró precisar (Ver Figura 2).

**Figura 2**

*Cuarzomonzonita con presencia de xenolito de rocas ígneas de eventos magmáticos anteriores de edad Paleozoica (?)*



**6.1.2 Monzogranito**

La Cuarzomonzonita es cortada por un Monzogranito (localmente sienogranito) siendo la segunda litología dominante en la zona. El monzogranito se encuentra altamente meteorizado, sin embargo, localmente exhibe su textura original. Es un cuerpo fanerítico, porfirítico e inequigranular con cristales de tamaño medio. Su composición consiste en minerales como cuarzo, plagioclasa y feldespato, por lo tanto, se describe como una roca leucocrática (también llamado Leucomonzogranito). Además, contiene algunos minerales arcillosos, así como biotita y óxidos que le otorgan una apariencia ligeramente moteada.

**Figura 3**

*Monzogranito leucocrático (altamente diaclasado)*



**6.1.3 Pegmatita**

La cuarzomonzonita presenta localmente bolsas, lentes y diques de pegmatitas graníticas compuestas principalmente por cuarzo y feldespato en cristales grandes subhedrales, algunos de estos cuerpos pegmatíticos presentan también epidota en su composición como resultado de un evento de epidotización. Los diques observados (Figura 4) presentan un espesor inferior a un metro.

**Figura 4**

*Dique granítico pegmatítico cortando rocas cuarzomonzoníticas*



**6.1.4 Epidotización**

El cuerpo principal de Cuarzomonzonita presenta localmente epidotización especialmente cerca de los xenolitos y también afectando a las pegmatitas. Esta alteración se presenta principalmente como agregados microcristalinos de epidota subhedral a anhedral, la cual le da a la roca su color verde oliva característico (Figura 5), acompañando a cristales de cuarzo y feldespato angulosos y de mayor tamaño.

**Figura 5**

*Evidencia de epidotización afectando rocas cuarzomonzoníticas*



**6.1.5 Diques de diabasa**

Las dos litologías principales (Cuarzomonzonita y Monzogranito) son cortados por diques de diabasa, estos diques se hallan ampliamente distribuidos en la zona de estudio, estas rocas serían evidencia de magmatismo de composición básica el cual ha sido reportado por diversos autores. Se aprecia en estas rocas un alto grado de alteración supérgena y meteorización lo cual le proporciona una tonalidad café rojiza (Figura 6) que resalta en medio de los cuerpos que intruyen cuya coloración es más clara.

**Figura 6**

*Dique de diabasa (a.k.a. Microgabro) cortando rocas cuarzomonzoníticas*



**6.1.6 Alteración tipo Greisen**

En el monzogranito se aprecian bolsas de pegmatita Figura 7 y algunas de estas bolsas presentan alteración de tipo greisen. Estas rocas con el objeto de este proyecto de investigación y sus características texturales y composicionales se detallan en los apartados de descripción macroscópica y petrográfica.

**Figura 7**

*Bolsa pegmatítica con evidencia de alteración tipo greisen en rocas monzograníticas*



**6.1.7 Alteración Cuarzo – Sericita**

La Cuarzomonzonita y Monzogranito son afectados por alteraciones hidrotermales de tipo cuarzo-sericita, también llamada alteración filica o sericítica que corresponde a la alteración con mayor presencia en el área de estudio, debido a su intensidad en algunas zonas, suprime parcial y casi totalmente la mineralogía original a la cual alteró. Se caracteriza por sericita en agregados masivos con tamaños de grano muy finos, asociada a cristales de cuarzo hidrotermal subhedrales.

**Figura 8**

*Alteración cuarzo-sericítica que afecta las rocas cuarzomonzoníticas y monzograníticas*



Localmente las alteraciones de tipo cuarzo-sericita presentan en su interior venas de cuarzo-sulfuros, estas venas de unos cuantos centímetros de espesor (Figura 9) presentan silicificación y sulfuros como pirita, galena y esfalerita las cuales ya han sido datadas por otros autores. Se muestran con alto grado de afectación por la meteorización del medio.

**Figura 9**

*Vena de cuarzo-sulfuros presente en rocas con alteración hidrotermal*



**Tabla 1**

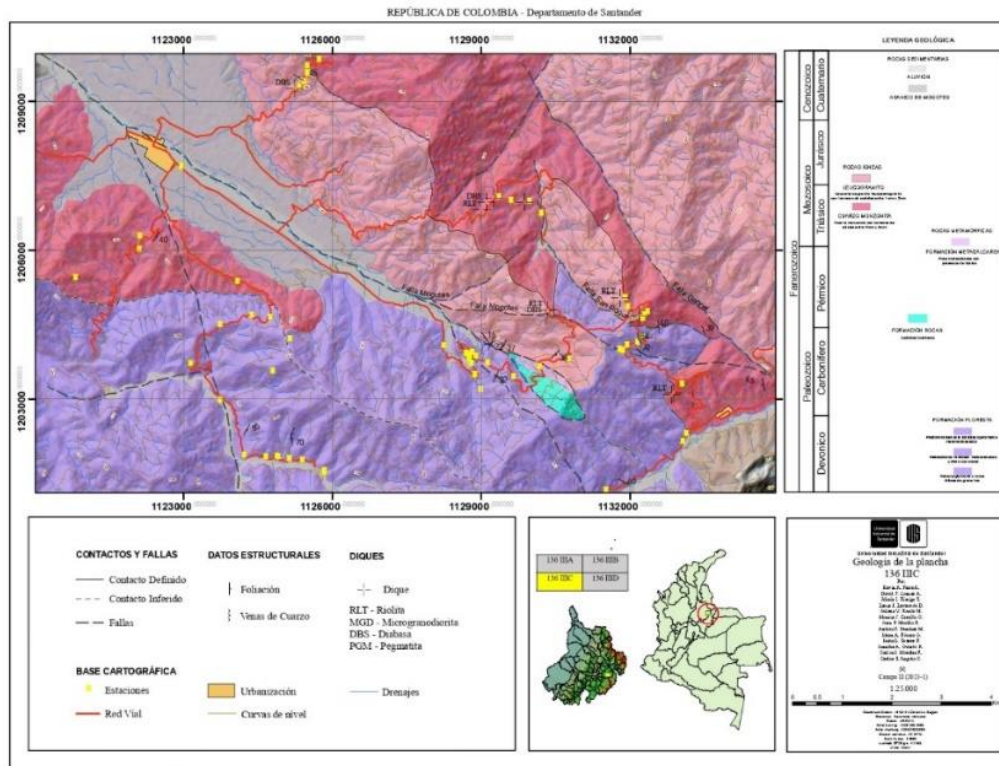
*Coordenadas de los afloramientos correspondientes a las litologías aflorantes*

Descripción	Coordenadas		
	E	N	h (msnm)
Cuarzomonzonita	1'129.344	1'207.066	1926
Monzogranito	1'125.394	1'209.385	1832
Pegmatita	1'129.344	1'207.066	1926
Diques de Diabasa	1'129.956	1'206.966	1780
Alteración tipo Greisen	1'125.327	1'209.254	1818
Alteración Cuarzo - Sericita	1'125.495	1'209.540	1840
Venas de Sulfuros	1'125.496	1'209.541	1840
Epidotización	1'129.344	1'207.066	1926

La disposición a nivel regional de las litologías aflorantes anteriormente mencionadas, se pueden observar en la Figura 10.

**Figura 10**

*Mapa de la distribución regional de las litologías presentes en el área de estudio.*



*Nota.* Mapa adaptado del producto final de la salida de campo de la asignatura Campo II elaborado por los grupos G3 – 3 y G2 – 4 del período académico 2023-1.

## 6.2 Generalidades de las muestras analizadas

Para este estudio se analizó una primera muestra recolectada (NJ-1) en la vereda las Flores del municipio de Mogotes (Santander), exactamente en el punto de coordenadas 1°209.718 N y 1°125.647 N a una altura de 1.905 msnm.

Esta muestra presenta coloración blancuzca grisácea con brillos metálicos y algunos parches rojizos producto de oxidación. La mineralogía identificable a nivel macroscópico (Figura 11B) corresponde a cuarzo, moscovita y en menor medida Sericita; el cuarzo presenta mayor porcentaje dentro de la roca y muestra coloración blanca grisácea, se encuentra en forma masiva en cristales grandes fácilmente visibles que rondan los 5 y 20 mm, intercalados con moscovitas de color gris plateado con brillo metálico, aunque se aprecian de forma masiva presenta hábito laminar ya que se desprenden pequeñas láminas de moscovita al contacto a pesar de la dureza alta de la muestra. La sericita normalmente incolora es similar a la moscovita, pero presenta brillo vitreo o sedoso lo que junto a su hábito masivo le otorga una coloración de tonalidad blanca ligeramente gris.

Se observa también en la muestra, estrías de falla evidenciadas en la Figura 11C.

**Figura 11**

*Análisis macroscópico de la muestra (NJ-1) con evidencia alteración tipo Greisen*



*Nota.* A) Muestra de mano donde se evidencia el corte del plug del cual se extrajeron las secciones delgadas; (B) Acercamiento a la mineralogía visible de la muestra; (C) Estrías de falla.

Adicionalmente, se analiza una segunda muestra (NJ-2), recolectada en la vereda El Gaital, perteneciente al municipio de Mogotes (Santander) en el punto de coordenadas N 1'207.066 y E 1'129.344 a una altura de 1.926 msnm.

Esta muestra exhibe coloración blanca, grisácea y rosada resaltando los minerales dominantes en ella (Figura 13A), se encuentra con un grado moderado de meteorización lo cual se evidencia en las tonalidades naranjas y verdosas en sus caras expuestas. Presenta cristales grandes fácilmente visibles a simple vista y su composición mineral consiste en cuarzo ahumado (Figura 13C) en agregados masivos y brillo sedoso siendo el de mayor porcentaje en la roca, y en segundo lugar se halla feldespato potásico caracterizado por su color rosado pálido (Figura 13B) cuyos cristales contrastan con el cuarzo grisáceo que lo rodea.

**Figura 12**

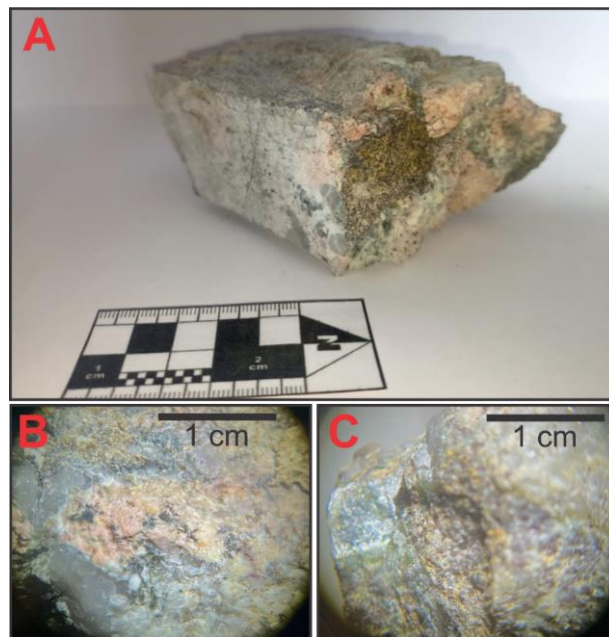
*Afloramiento del cual se recolectó la muestra (NJ-2)*



*Nota.* El cuadro rojo en la figura denota el punto del cual se extrajo la muestra (NJ-2)

**Figura 13**

*Análisis macroscópico de la pegmatita*



*Nota.* (A) Muestra de mano; (B) Acercamiento a la mineralogía enfocando cristales de feldespato potásico; (C) Acercamiento a la mineralogía mostrando cristales de cuarzo.

### 6.3 Análisis petrográfico

Este análisis se desarrolló, como se menciona en el apartado de metodología, la descripción de 3 (tres) secciones delgadas de roca obtenidas de la muestra de mano correspondiente a la alteración tipo greisen. Para la muestra de pegmatita se realizó la descripción petrográfica de manera menos detallada usando la muestra de mano y la sección cortada para inclusiones fluidas, ya que tener cristales grandes y pocos minerales facilitó su revisión.

- **Descripción muestra (NJ-1)**

La roca se encuentra conformada por Cuarzo (59%), Moscovita Gruesa (20%), Agregados de moscovita (Sericita) (16%), Óxido de Titanio y Zircón (3%), Óxidos de Hierro, Óxidos de Manganeso, Biotita y Apatito (2%). El cuarzo se encuentra en cristales grandes subhedrales caracterizado por ser incoloro en nicoles paralelos y presentando colores de interferencia que fluctúan en los tonos de gris de primer orden en nicoles cruzados (Figura 16A, 1B, 2A y 2B), estos cristales presentan extinción ondulante en algunos casos. Los cristales de cuarzo de origen magmático fueron afectados por la alteración hidrotermal y recrystalizaron atrapando en ellos las inclusiones fluidas objeto de estudio de este proyecto.

Los cristales de moscovita exhiben forma tabular alargada y colores de interferencia intensos del segundo orden que incluyen el rosado, amarillo, naranja, violeta y azul, estos cristales se encuentran en menor proporción que el cuarzo y no siguen una orientación en particular. Se identifican dos clases de moscovita de acuerdo con su coloración: la Ms1 de color azul y la Ms2 de color naranja (Figura 16 3A, 3B), con ayuda del análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido se atribuye esta diferencia a su composición. Un tercer tipo de moscovita se encuentra en la muestra diferenciada de las otras porque sus cristales se organizan de forma radial (Figura 16 2A). La sericita es distinguible de moscovita por presentarse en cristales de menor tamaño, además,

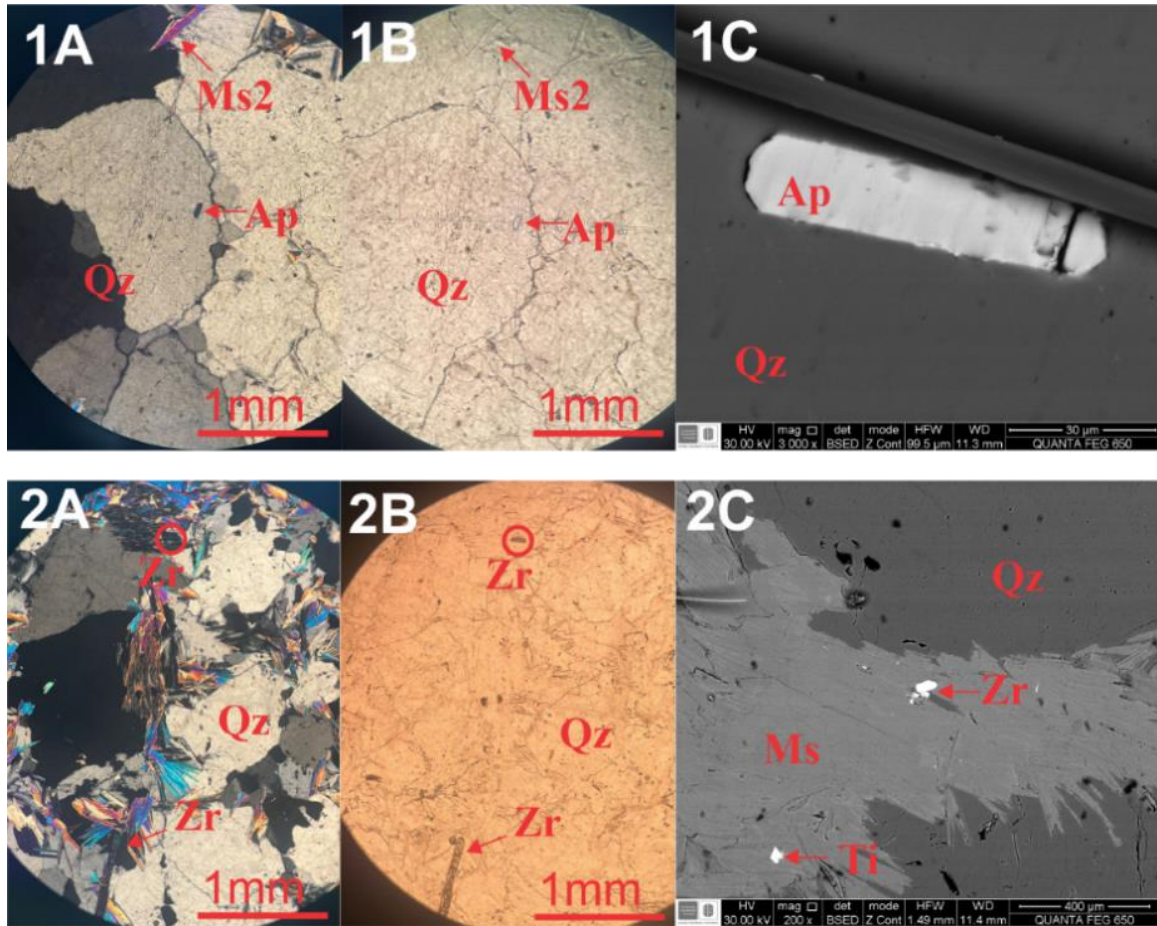
se muestra mayormente en forma radial correspondiendo a un mineral producto de alteración en la fase hidrotermal.

Se encuentran también cristales de zircón los cuales son relictos de la composición magmática original de la roca, estos cristales son principalmente euhedrales o subhedrales algunos de forma bipiramidal y tabular de tamaños variables no superiores a 100 micras, los cuales son fácilmente identificables por su alto relieve, numerosas fracturas y color café claro a incoloro, lo cual lo hace resaltar entre el cuarzo y moscovita incoloros que le rodean, en nicoles cruzados presenta colores de interferencia que oscilan entre el segundo y tercer orden (Figura 14 2A y 2B).

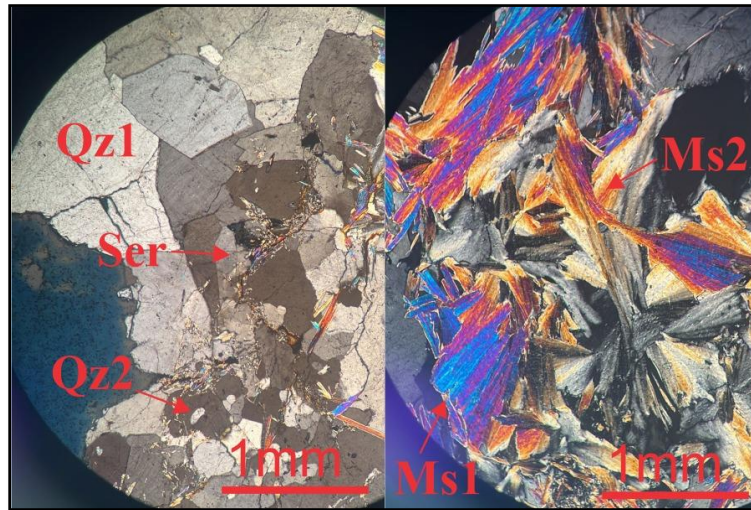
Cristales escasos de apatito, pequeños no superiores a 100 micras, de forma tabular alargada caracterizados por ser incoloros, limpios y color de interferencia gris azulado de primer orden, (Figura 14 1A y 1B) el apatito es común como mineral accesorio en las rocas ígneas por tanto corresponde a la composición original de la roca.

**Figura 14**

*Microfotografías de la muestra (NJ-1)*



*Nota.* ((Qz1) Cuarzo asociado a la (Ms) Moscovita gruesa (Greisen)); ((Qz2) Cuarzo asociado a la (Ser) Moscovita fina) (TiO<sub>2</sub>) Óxido de Titanio; (MnO<sub>2</sub>) Óxido de Manganeso; (FeO<sub>2</sub>) Óxido de Hierro; (Bt) Biotita; (Ap) Apatito; (Zr) Zircón.

**Figura 15***Microfotografía de la muestra (NJ-1)*

*Nota.* ((Qz1) Cuarzo asociado a la (Ms) Moscovita gruesa (Greisen)); ((Qz2) Cuarzo asociado a la (Ser) Moscovita fina)

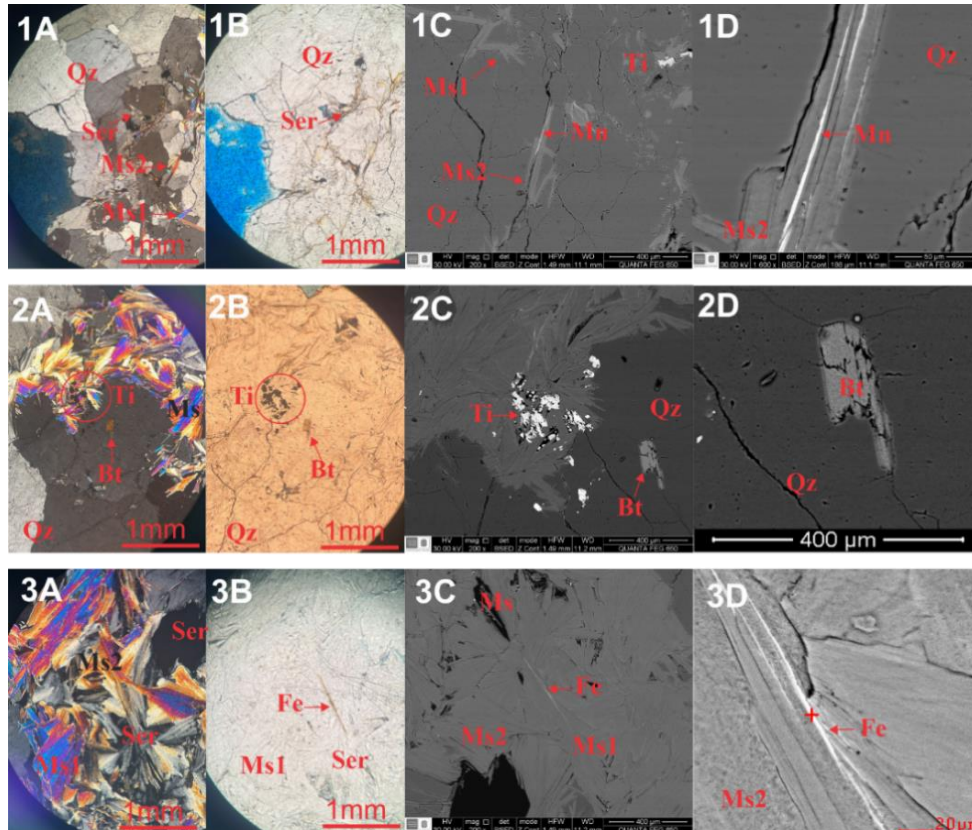
Cristales de biotita escasos y aislados fueron detectados también, exhiben color café claro con tonos de interferencia naranja y café de primer a segundo orden (Figura 16 2A, 2B, 2C y 2D) y forma tabular alargada con planos de exfoliación paralelos al elongamiento del cristal. Se hallan numerosos cristales opacos en pequeñas agrupaciones (Figura 16 2A y 2B) y distribuidos a lo largo de toda la muestra, aunque presentan diversas formas y tamaños se distinguen algunos particularmente rómbicos, con relieve superior a los cristales de cuarzo y moscovita que los rodean. Mediante el análisis SEM se descifraron estos cristales como óxidos de titanio originarios de la fase magmática.

Finalmente, se halló la presencia de óxidos principalmente en los contactos de los cristales de moscovita, estos óxidos no muestran forma cristalina, hábito, o cualquier otra característica cristalográfica por lo que se determinan como producto de la fase de alteración supérgena. Con

ayuda del análisis SEM se precisa su composición y se les agrupa en dos clases: Óxidos de Manganeso (Figura 16 1C y 1D) y Óxidos de Hierro (Figura 16 3C y 3D).

### Figura 16

*Microfotografías de la muestra (NJ-1)*



*Nota.* ((Qz1) Cuarzo asociado a la (Ms) Moscovita gruesa (Greisen)); ((Qz2) Cuarzo asociado a la (Ser) Moscovita fina) (TiO<sub>2</sub>) Óxido de Titanio; (MnO<sub>2</sub>) Óxido de Manganeso; (FeO<sub>2</sub>) Óxido de Hierro; (Bt) Biotita; (Ap) Apatito; (Zr) Zircón.

- **Descripción muestra (NJ-2)**

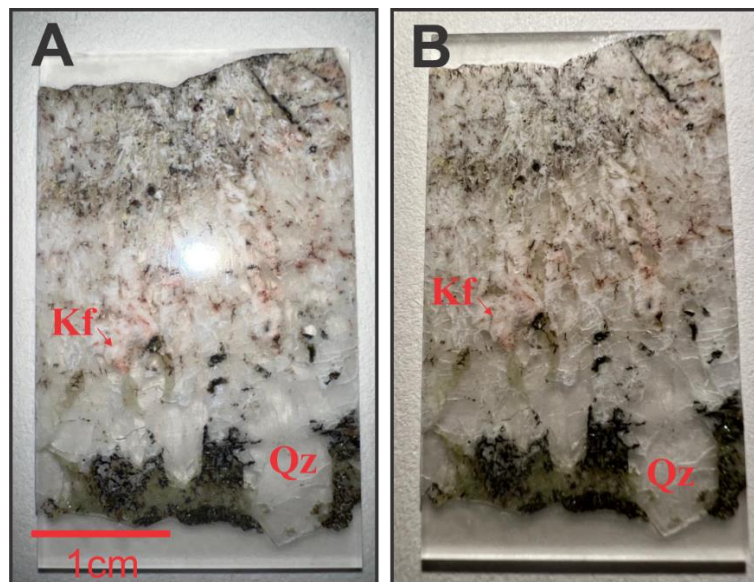
Como se mencionó en el apartado de relaciones litológicas, los lentes y bolsas de pegmatita presentan secciones con alteración tipo greisen, por tanto, se hace una breve revisión petrográfica a esta roca para relacionar y comparar la composición litológica del cuerpo pegmatítico con y sin

presencia de alteración. Esta muestra se utilizó únicamente para estudiar las inclusiones fluidas presentes en el cuarzo, y por lo tanto no se realizó sección delgada para análisis petrográfico, esta descripción se realizó con ayuda de la muestra de mano y las secciones delgadas elaboradas para microtermometría.

La composición mineralógica de la pegmatita consta de cuarzo mayormente seguido de feldespato potásico, característico de la textura pegmatítica, los cristales son grandes permitiendo su reconocimiento mediante la observación de la muestra de mano, el cuarzo se exhibe transparente y en algunas zonas un poco más ahumado, con bordes planos y en contacto con el feldespato potásico reconocible por su color rosado (Figura 17A), se aprecia un mineral de color oscuro en agregados masivos posiblemente correspondiente a oxidación ya que la muestra presenta un grado moderado de meteorización.

### Figura 17

*Mineralogía observada a partir de las secciones delgadas elaboradas para microtermometría*



*Nota.* (Kf) Feldespato potásico; (Qz) Cuarzo.

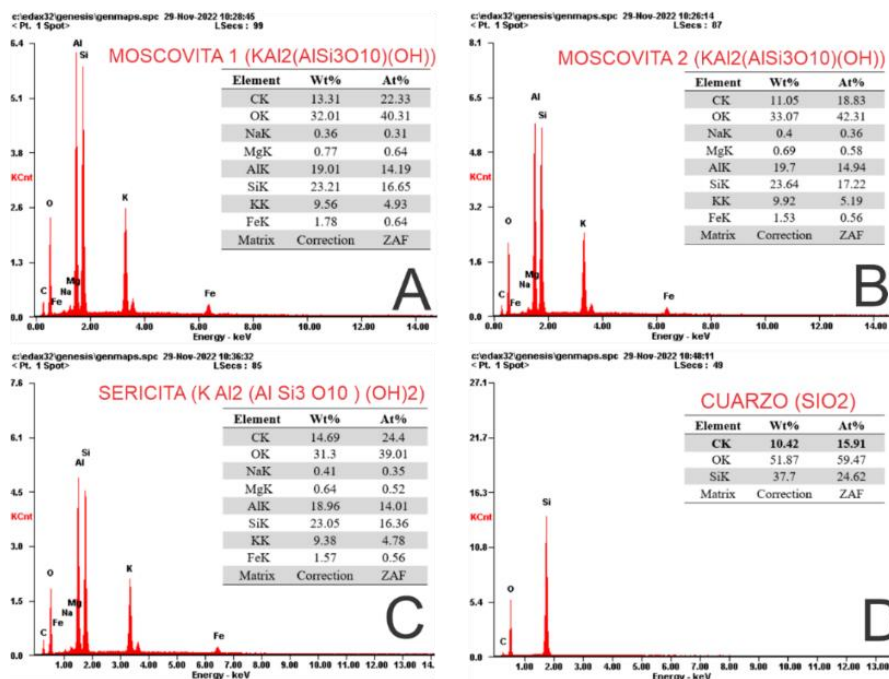
### 6.4 Análisis Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Se analizaron bajo el microscopio los cristales que durante la petrografía no se pudieron caracterizar, así mismo se escogió un punto de cada uno de los minerales identificados gracias a sus propiedades en el análisis petrográfico para corroborar los resultados de dicho análisis (Figura 18).

En primer lugar, se estudian los minerales ya identificados en la petrografía los cuales corresponden a cuarzo, sericita y dos clases de moscovita (Ms1 y Ms2). Para la moscovita caracterizada en la fase de petrografía y separada en dos clases con base a su coloración, se realiza el análisis y se aprecia una diferencia también a nivel composicional, la Ms1 presenta en su composición un porcentaje de hierro mayor que el datado para la Ms2 (Figura 18 A y B).

**Figura 18**

*Spectros de dispersión de los tipos de moscovita presentes en la muestra (NJ-1)*

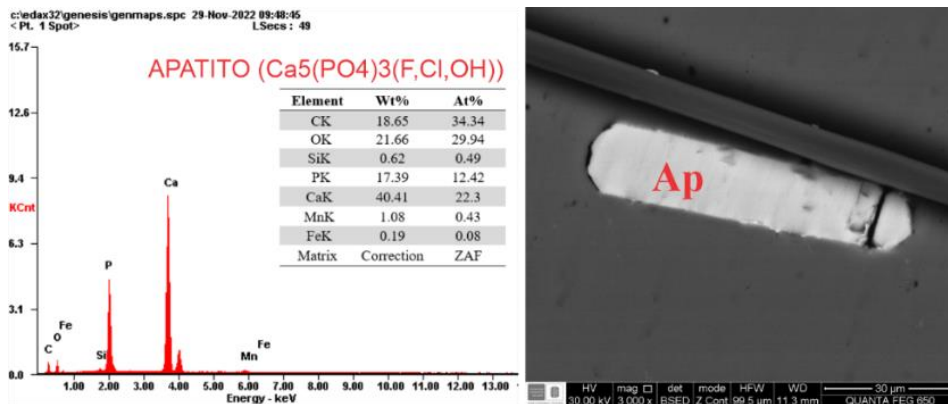


Nota. (A) Moscovita 1; (B) Moscovita 2; (C) Sericita; (D) Cuarzo.

Dentro de los minerales accesorios se encuentra el apatito, los cristales de este mineral son muy escasos y de tamaño reducido en relación con los demás minerales presentes, este al no ser un mineral opaco, permite observar y definir sus características ópticas y, por lo tanto, se somete al análisis SEM para obtener su composición química (Figura 19) y corroborar que se identificó correctamente el mineral.

### Figura 19

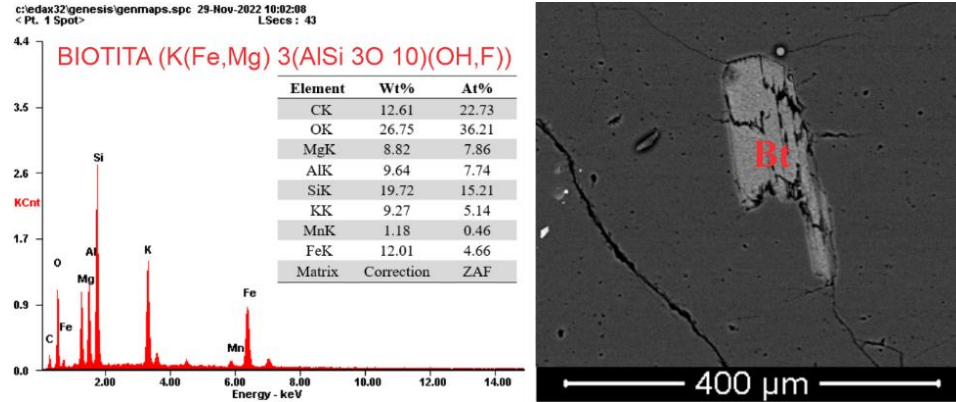
*Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)*



Los cristales de biotita son bastante escasos y más pequeños en comparación con los demás minerales accesorios, sin embargo, presentan sus características muy bien definidas y se puede apreciar claramente la forma tabular alargada con trazas de exfoliación paralela al elongamiento. El análisis SEM corrobora que el cristal seleccionado corresponde a biotita (Figura 20).

**Figura 20**

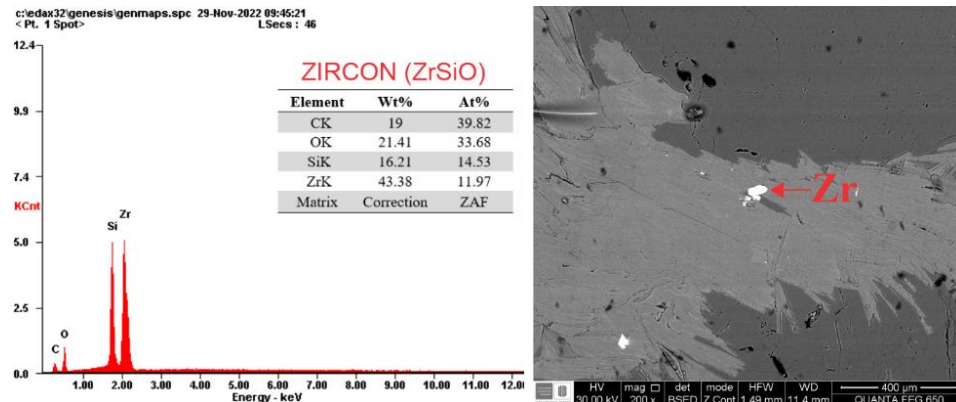
*Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)*



Debido a su composición, estos cristales se observan en el microscopio de electrones con un color blanco brillante cubriendo las características de su superficie permitiendo diferenciar únicamente su forma ya que este mismo color brillante genera un contraste con los minerales más opacos que lo rodean, son de tamaño reducido, pero tienen presencia considerable dentro de la muestra, el resultado de la medición en estos cristales arroja una composición alta en circonio y sílice (Figura 21) con lo cual se identifica como zircón.

**Figura 21**

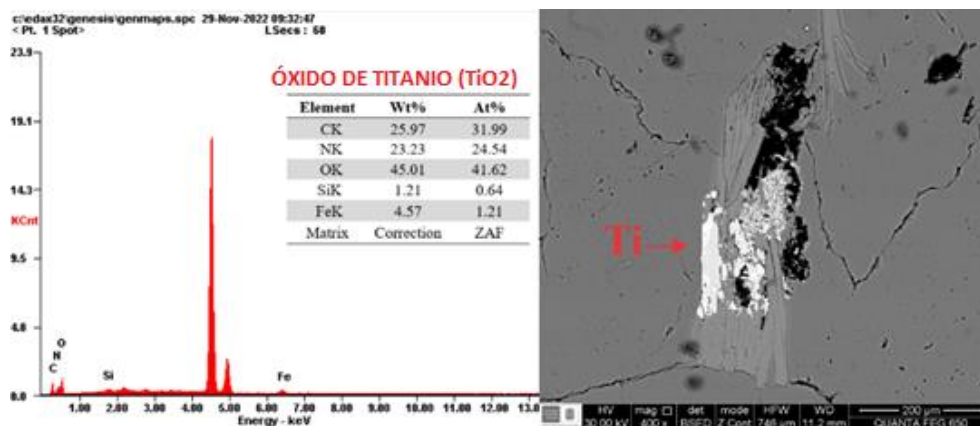
*Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)*



Los minerales opacos más abundantes corresponden a este tipo, se encuentran principalmente en grupos donde exhiben formas y tamaños variados, se muestran de un color blanco brillante y con alto relieve respecto a las moscovitas y cuarzos que le rodean. Como anotación debido a un inconveniente con el equipo de medición el cual no reconoce el titanio (Ti) los picos que se muestran en el espectro y no se les atribuye un elemento, así mismo, al no identificarse este elemento el sistema aproxima todos los demás a una composición del 100% omitiendo este fallo generando que los valores porcentuales mostrados en la tabla sean erróneos, sin embargo, se observa que este pico sin categorizar es el más alto superando con creces a los demás elementos (Figura 22). Por tanto, estos cristales corresponden a óxidos de titanio que con ayuda de las características ópticas estudiadas en la fase de petrografía se concluye que se trata de Esfena, también denominada Titanita.

## Figura 22

*Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)*

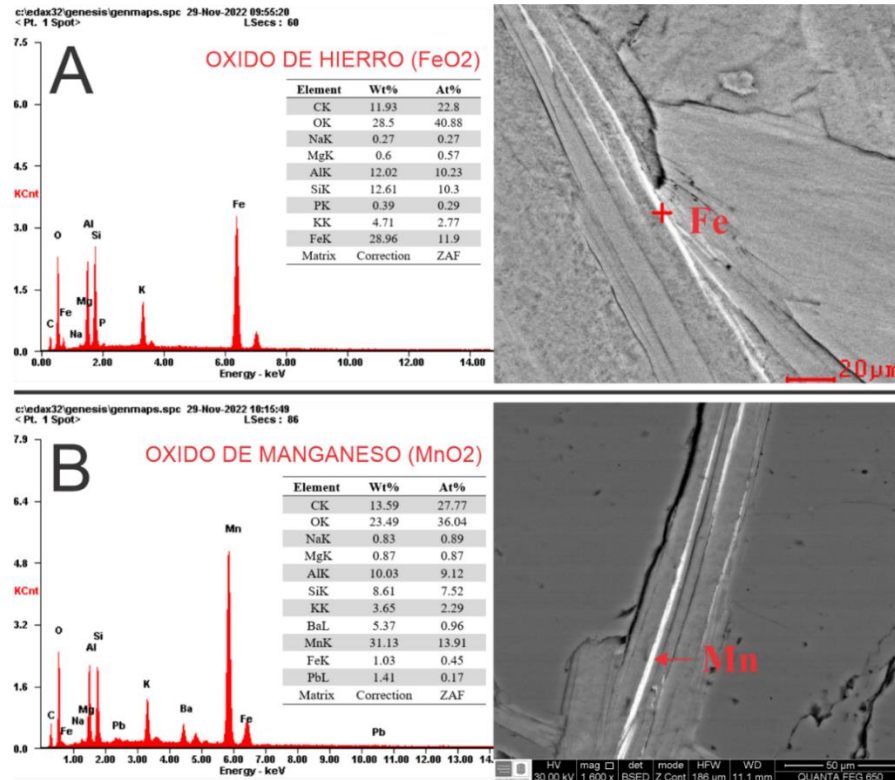


Las trazas de óxidos se aprecian dispersas en la muestra generalmente en los contactos de cristales de moscovita, como se menciona en el apartado de petrografía estos no presentan forma cristalina ni ninguna otra característica que permita clasificarlos como un mineral en particular, pero el análisis SEM permite descifrar su composición y se encuentran dos clases catalogadas

como óxido de Hierro (Figura 23 A) siendo el tipo más abundante de estas dos, y óxido de Manganese (Figura 23 B).

### Figura 23

*Espectros de dispersión de la mineralogía presente en la muestra (NJ-1)*



## 6.5 Estudio de inclusiones fluidas

### 6.5.1 Petrografía de inclusiones fluidas

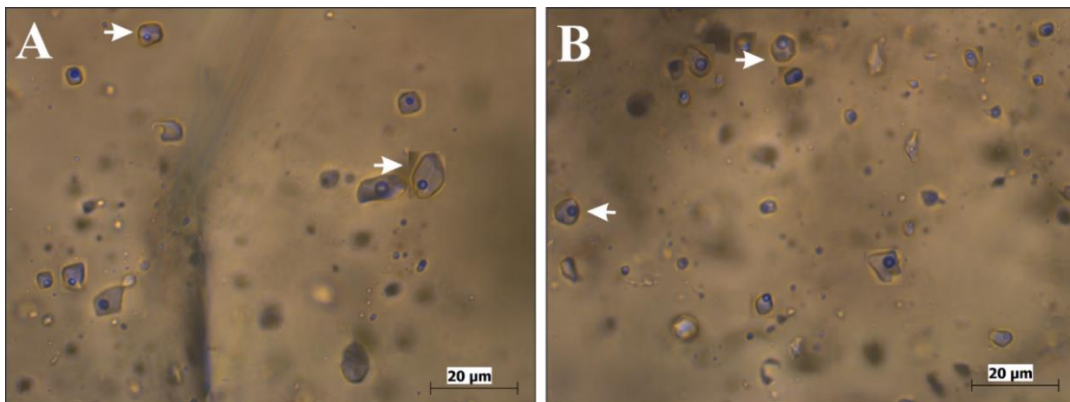
Para el estudio petrográfico de inclusiones fluidas se hizo una revisión detallada de los cristales de cuarzo encontrados en la muestra (NJ-1), seleccionando las inclusiones de mayor tamaño, así como las que se pudiesen encontrar en asociación. Se encontraron inclusiones fluidas primarias, secundarias y pseudosecundarias dentro de las cuales solo las primarias resultan relevantes para este estudio, por lo tanto, estas son las que se encuentran dispuestas en este informe.

Ubicando las áreas con mayor densidad de inclusiones fluidas primarias se tomaron numerosas fotografías en un mismo punto modificando el enfoque del objetivo para así obtener todas las inclusiones presentes en una zona particular, estas fotografías fueron posteriormente sobrepuestas entre sí para visualizar todas las inclusiones en un solo plano, la descripción se realiza en base a la clasificación de (Shepherd *et al.*, 1985).

Dada la cantidad de inclusiones fluidas presentes en los cristales estudiados se encontraron variedad de formas y tamaños, en la Figura 24 se aprecian inclusiones fluidas con forma ovoidal con tamaños que varían entre 3 y 10 micras, las inclusiones de esta forma presentan tamaños relativamente más pequeños y en menor abundancia que las irregulares y tabulares.

#### **Figura 24**

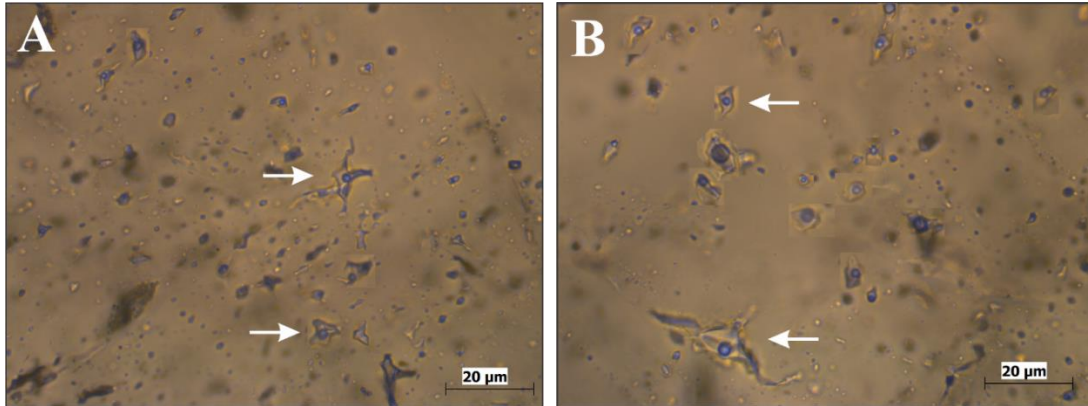
*Inclusiones fluidas con forma ovoidal*



Las inclusiones fluidas con forma irregular son las más abundantes y sus tamaños varían desde 2 hasta 20 micras, como su nombre lo indica su forma no sigue ningún patrón por tanto cualquier inclusión que no pueda catalogarse en alguna de las otras categorías corresponderá a esta, en la Figura 25 se muestran algunos ejemplos de estas inclusiones donde también se aprecia la variación en sus tamaños.

**Figura 25**

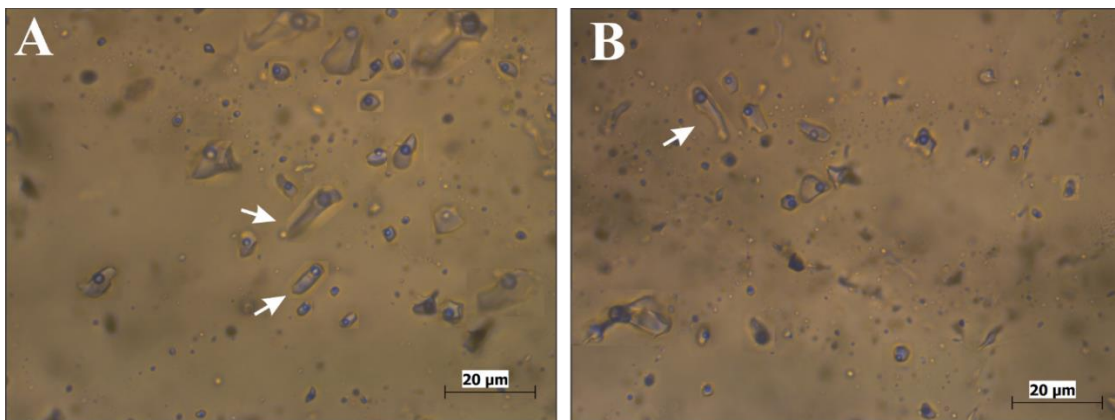
*Inclusiones fluidas con forma irregular*



Las inclusiones de forma tabular son relativamente escasas y de tamaño no superior a 10 micras al igual que las ovoidales, en la Figura 26 se observan algunas de estas como ejemplo rodeadas de más inclusiones fluidas principalmente irregulares.

**Figura 26**

*Inclusiones fluidas con forma tabular*

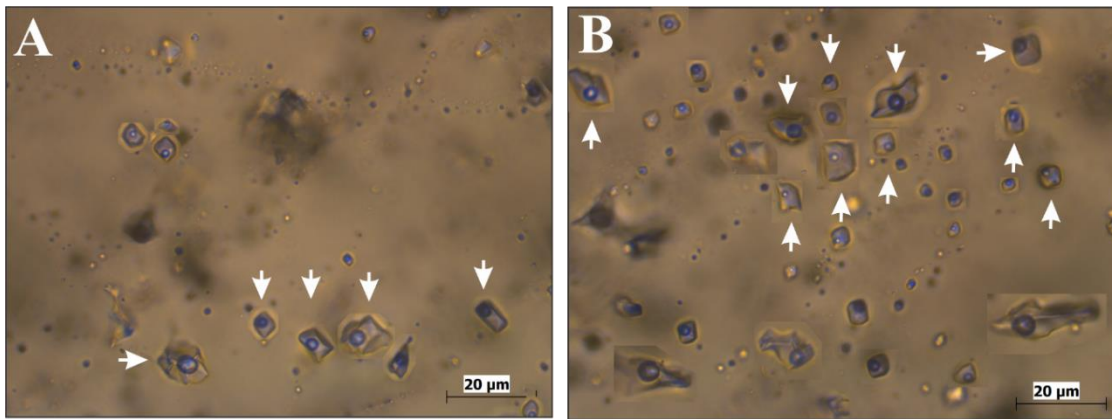


A continuación, se muestran algunas asociaciones de inclusiones fluidas, todas ellas son primarias, en la Figura 27A se observa una asociación de inclusiones predominantemente de forma irregular, una de ellas tabular y una más pequeña de forma ovoidal, sus tamaños van de 5 a 12 micras, todas bifásicas de tipo II (fase líquida > 50% (*l*) + fase vapor < 50% (*v*)) y grado de relleno

(o relación de volumen  $Vl/(Vl+Vv)$ ) de 0.90 y una inclusión presenta un grado de relleno con un porcentaje de vapor mayor correspondiente a un valor de 0.70. En la Figura 27B se aprecia otra asociación esta vez con inclusiones de tamaños más variados sin superar el rango de 3 a 15 micras, en estas el grado de relleno es principalmente de 0.90 con algunas inclusiones de grado 0.95.

### Figura 27

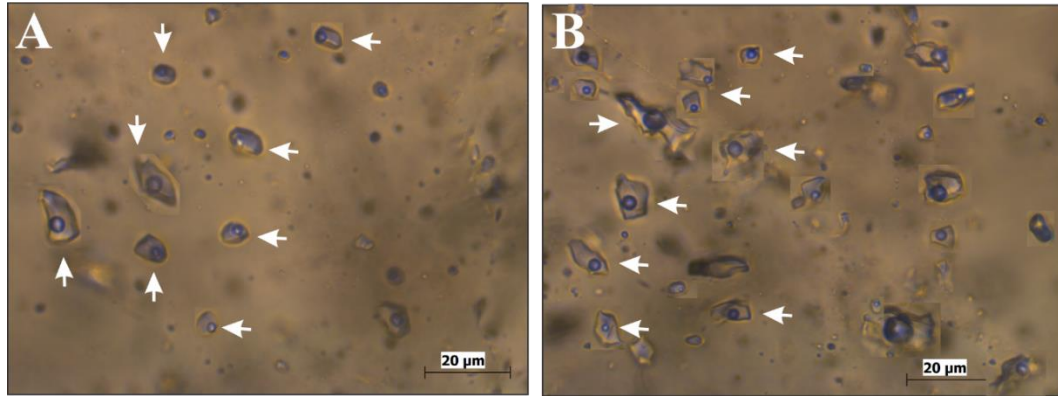
#### *Asociaciones de inclusiones fluidas*



En la Figura 28A se muestra una asociación de inclusiones de forma ovoidal y algunas irregulares, sus tamaños van desde 5 hasta 17 micras, corresponde a inclusiones fluidas de tipo II con grado de relleno equivalente a 0.90 en todas ellas. Para la Figura 28B se aprecian inclusiones con tamaños más variados donde las más pequeñas rondan las 4 micras y la más grande supera las 20 micras en su lado más largo, son mayormente irregulares alargadas y una de forma ovoidal, de tipo II y con un grado de relleno que también varía, predominando los valores de 0.90 y 0.95. La inclusión de mayor tamaño tiene un grado de relleno de 0.70.

**Figura 28**

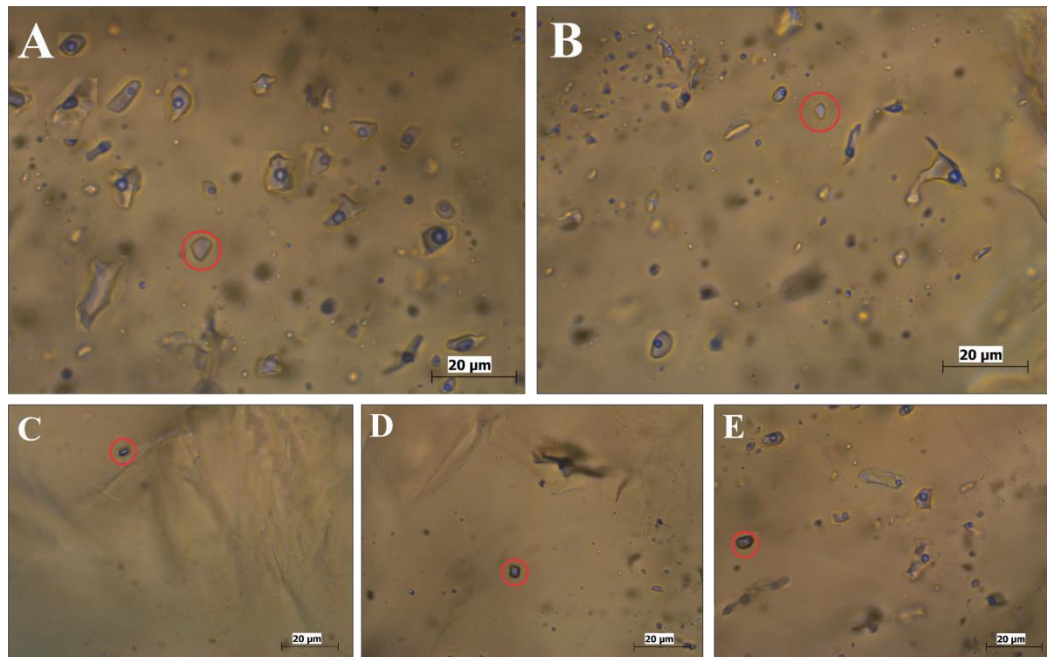
*Asociaciones de inclusiones fluidas*



Las inclusiones fluidas de tipo II son las dominantes, sin embargo, se encuentran también escasas inclusiones de otras categorías, en la Figura 29A y B se muestran inclusiones de tipo I (monofásicas de fase líquida), ovoidales de tamaño entre 3 y 8 micras. Adicional a estas se observan inclusiones de tipo IV (monofásicas de fase vapor) (Figura 29C, D y E).

**Figura 29**

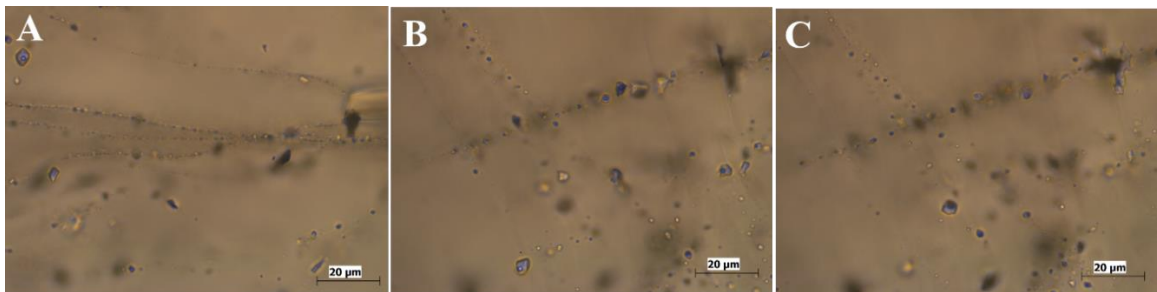
*Inclusiones fluidas monofásicas de líquido*



Por otro lado, se anexan imágenes (Figura 30) donde se aprecian inclusiones fluidas secundarias caracterizadas por seguir patrones lineales irregulares, ya que estas se forman en fracturas presentes en los cristales y no se tiene certeza de que su composición sea concordante con el sistema objeto de estudio.

### Figura 30

#### *Inclusiones fluidas secundarias*



#### **6.5.2 Microtermometría de inclusiones fluidas**

El análisis microtermométrico se realiza a fragmentos de sección delgada de muestras de greisen los cuales son enfriados y luego calentados con el fin de obtener la información necesaria para este estudio. Adicionalmente, se analizaron fragmentos correspondientes a la pegmatita sometiéndolos a calentamiento únicamente.

Se realizan numerosas mediciones y se hallan dos composiciones diferentes dentro del mismo rango de temperaturas, a continuación, se muestra un seguimiento fotográfico de dos inclusiones fluidas en un rango de temperatura desde  $-100^{\circ}\text{C}$  hasta la temperatura de fusión correspondiente para cada una de ellas a el fin de mostrar los cambios ocurridos en la inclusión durante este proceso. Las composiciones de los fluidos se describen según la tabla de composición relacionada al punto eutéctico para soluciones salino-acuosas (Steele-MacInnis *et al.*, 2016) (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Temperaturas del punto eutéctico para los subsistemas salino-acuosos H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-FeCl-FeCl<sub>3</sub>*

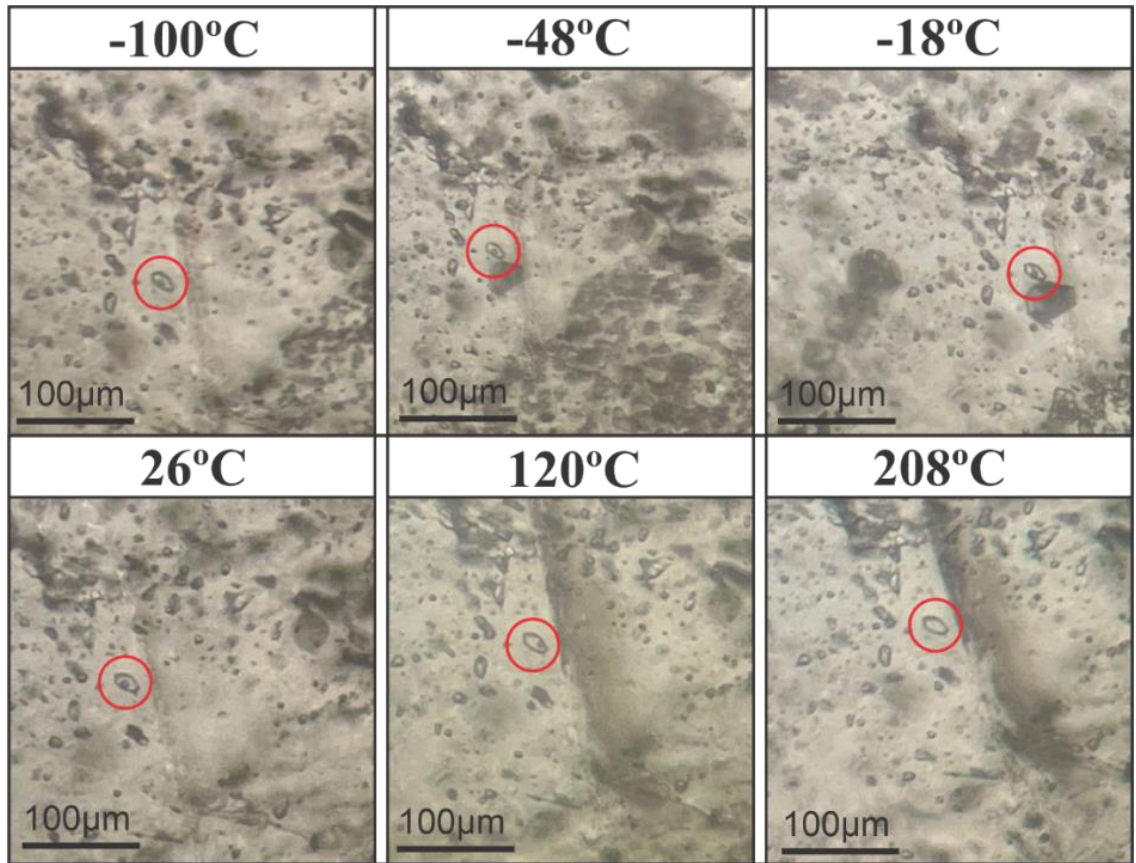
<b>Temperaturas del punto eutéctico para diferentes sistemas salino-acuosos (a 1 atm)</b>		
<b>Sistema salino</b>	<b>Temp. eutéctico (°C)</b>	<b>Fases sólidas</b>
H <sub>2</sub> O-NaCl-CaCl <sub>2</sub>	-55 (-52)	hielo+NaCl.2H <sub>2</sub> O+CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub>	-52.2	hielo+ MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O+CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-KCl-CaCl <sub>2</sub>	-50.5	hielo+ CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-CaCl <sub>2</sub>	-49.8	hielo+ CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-37.0	hielo+ (Na,K) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-FeCl <sub>2</sub>	-37.0	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+FeCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-FeCl <sub>2</sub>	-35.0	hielo+ FeCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-MgCl <sub>2</sub>	-35.0	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-MgCl <sub>2</sub>	-33.6	hielo+ MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-KCl	-23.5 (-22.9)	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+ KCl.nH <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-NaSO <sub>4</sub>	-21.7	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-NaHCO <sub>3</sub>	-21.8	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+NaHCO <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O-NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-21.4	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl	-21.2 (-21.8)	hielo+ NaCl.2H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-KCl	-10.6	hielo+ KCl.nH <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaHCO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-3.3	hielo+NaHCO <sub>3</sub> +Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaHCO <sub>3</sub>	-2.3	hielo+NaHCO <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-2.1	hielo+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1.2	hielo+Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O

*Nota.* Adaptado de (Roedder, 1984)

En la Figura 31 se aprecia la primera fusión a una temperatura correspondiente a -48°C, esta, aunque no es exacta, se atribuye a error humano en la medición posiblemente por la velocidad a la cual la temperatura aumentaba y se aproxima al punto eutéctico del sistema salino H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> siendo esta su potencial composición. esta inclusión alcanza su homogeneización a estado líquido a una temperatura de 208°C.

**Figura 31**

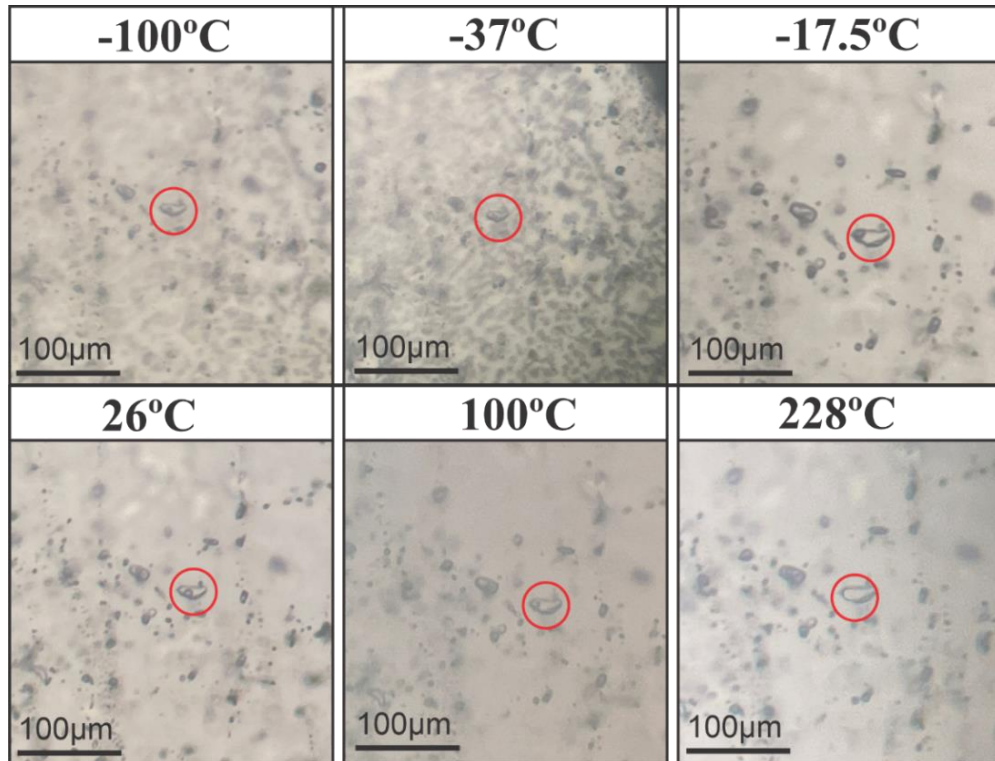
*Registro fotográfico de las inclusiones fluidas según la variación de la temperatura en el sistema  $H_2O-NaCl-CaCl_2$*



La Figura 32 exhibe la primera fusión del sistema a una temperatura de  $-37^{\circ}\text{C}$  la cual es equivalente al punto eutéctico del sistema salino  $H_2O-NaCl-FeCl_2$ , siendo esta la composición del fluido atrapado en la inclusión, su temperatura de homogeneización corresponde a  $228^{\circ}\text{C}$  en estado líquido.

**Figura 32**

*Registro fotográfico de las inclusiones fluidas según la variación de la temperatura en el sistema  $H_2O-NaCl-FeCl_2$*



## 7. Discusión

En esta sección del proyecto, se desarrollan algunas ideas que se consideran relevantes a la hora de establecer una interpretación a los resultados anteriormente expuestos. En la Tabla 3 se vinculan la génesis de los minerales a una etapa evolutiva, Se determinan cuatro etapas evolutivas para este sistema, estas se detallan a continuación y en la Figura 33 se representa gráficamente un esquema estimado de la textura y composición mineral de la roca en las diferentes fases.

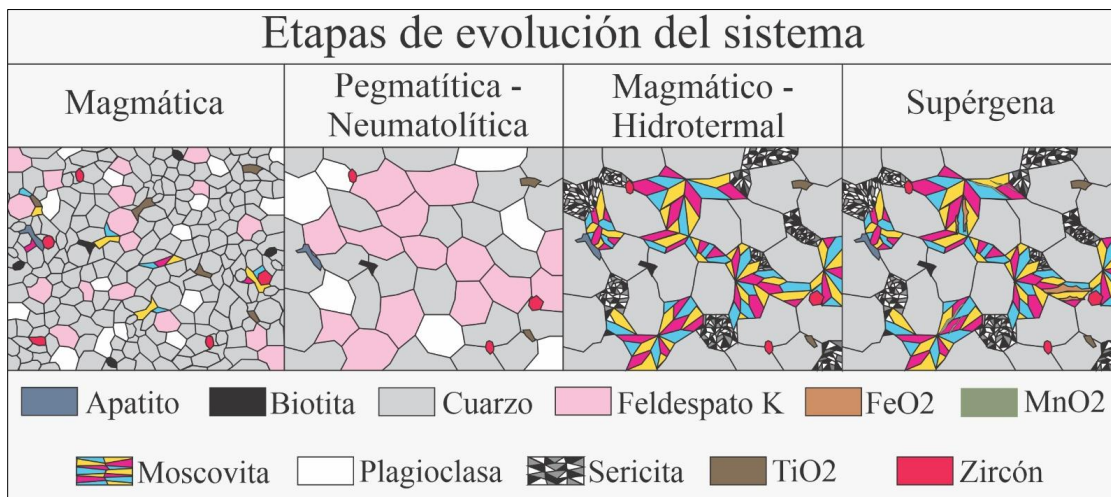
**Tabla 3**

*Paragénesis de minerales identificados*

Paragénesis mineral				
Período Mineral	Magmático	Pegmatítico - Neumatolítico	Magmático - Hidrotermal	Supérgeno
Apatito	-----			
Biotita	=====			
Cuarzo	=====	=====	=====	
Feldespato (K)	=====	=====		
FeO <sub>2</sub>				-----
MnO <sub>2</sub>				-----
Moscovita	-----		=====	
Plagioclasa	=====			
Sericita			=====	
TiO <sub>2</sub>	=====			
Zircón	-----			
	Abundante <b>=====</b>	Frecuente <b>=====</b>	Escaso <b>-----</b>	

**Figura 33**

*Modelo genético propuesto*



La primera etapa corresponde a la fase magmática cuyas litologías dominantes corresponden a la Cuarzomonzonita y al Monzogranito como se menciona en el apartado de

relaciones litológicas. La composición mineral de estas rocas es cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y biotita como elementos más abundantes, lo cual es típico de la composición de rocas ígneas graníticas, acompañados de zircón, apatito y óxidos de titanio como accesorios.

La segunda fase evolutiva es la neumatolítica, a la cual se atribuye la formación de las rocas pegmatíticas que, como su nombre lo indica, resulta en un cambio notable en la textura de la roca. En esta etapa el aumento en la temperatura del sistema genera una fusión parcial de los minerales dando lugar a la recristalización de cuarzo y feldespato potásico en cristales de mayor tamaño, disminuyendo a su vez la presencia de los demás minerales considerablemente.

La actividad hidrotermal que afecta la roca representa la tercera etapa de formación de este sistema, en esta fase el contacto de la roca con fluidos enriquecidos de alta temperatura modifica su composición y textura, se produce el desplazamiento de K y Na los cuales se escapan del sistema a través de fracturas, este proceso se evidencia en venas de composición potásica observadas en el área de estudio (Figura 34), por tanto el feldespato potásico es eliminado de la mineralogía de la roca y en su lugar cristaliza moscovita de forma radial siendo indicativa de la alteración greisen según (Launay *et al.*, 2021). A pesar de presentar características propias de la alteración greisen este caso no corresponde al modelo ideal de dicha alteración debido a que el magma involucrado en el proceso no es el adecuado; el magma de tipo S es el responsable de la mineralización de wolframio y estaño, minerales de alto interés, pero para el caso objeto de estudio el magma involucrado es de tipo I lo cual explica la ausencia de estos minerales.

Finalmente, la última etapa del proceso evolutivo de este sistema es la alteración supérgena.

En esta fase, se presentan óxidos de hierro y manganeso, depositados y alojados de forma paralela a los planos de exfoliación de los cristales de moscovita, estos óxidos no cristalizan por tanto no se produce enriquecimiento secundario.

### Figura 34

*Venas reportadas de feldespato potásico*



*Nota.* Adaptado del registro fotográfico de salidas de la asignatura Campo II de la escuela de Geología, UIS.

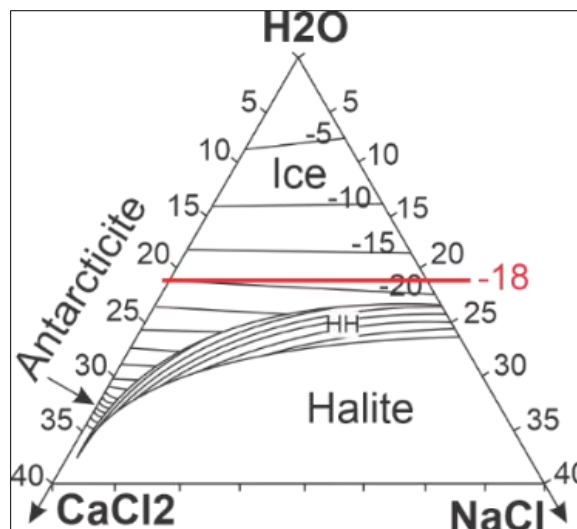
Al realizar el enfriamiento se lleva la muestra una temperatura en la que la que se solidifiquen las fases líquidas presentes en las inclusiones, con esto se busca determinar el punto eutéctico que corresponde a la temperatura en que se aprecian los tres estados de la materia en la inclusión: la fase vapor, la solución salina en estado sólido y el segundo compuesto en estado líquido, con este valor se aproxima la composición de la sustancia según la tabla de composición relacionada al punto eutéctico para soluciones salino-acuosas según (Roedder, 1984). Se calcula también la temperatura a la que fusiona la hidrohalita, lo cual permite establecer un porcentaje estimado de cada uno de los compuestos presentes, sin embargo, debido a la dificultad que representa el tamaño de las inclusiones y el aumento del objetivo del microscopio a la hora del

análisis, no se logra diferenciar el punto en que la hidrohilita empezó su fusión, por ello solo se menciona la composición de los fluidos sin poder asignar valores porcentuales a cada uno de ellos.

Con ayuda de los diagramas de (Steele-MacInnis *et al.*, 2016) se buscan los porcentajes de cada uno de los compuestos en la composición total, ubicando el valor de temperatura para la última fusión del sistema se halla el porcentaje de agua presente en el sistema el cual para la solución  $H_2O-NaCl-CaCl_2$  esta temperatura es de  $-18^\circ C$  correspondiendo aproximadamente a 23% de  $H_2O$ , el 77% restante equivale a una mezcla de  $NaCl$  y  $CaCl_2$  sin poder discriminar entre estos.

### Figura 35

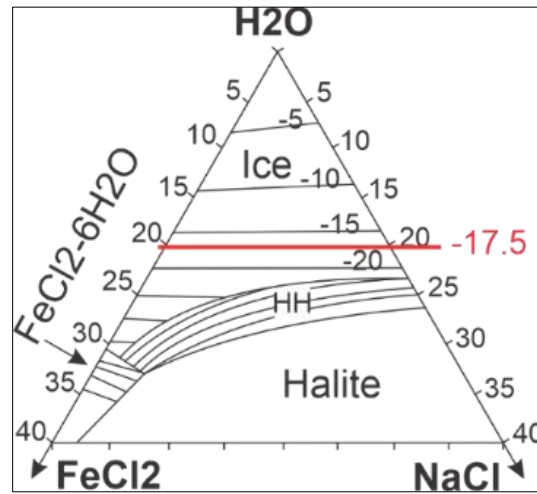
*Isotermas (en grados Celsius) del liquidus del hielo a 1 atm de presión en el sistema  $H_2O-NaCl-CaCl_2$  con los ejes en unidades de wt%.*



Para el sistema  $H_2O-NaCl-FeCl_2$  la temperatura de última fusión registrada equivale a  $-17.5^\circ C$  la cual, al ser representada en el diagrama, corresponde a aproximadamente 20% de  $H_2O$  en la composición y 80% de la mezcla  $NaCl + FeCl_2$ .

**Figura 36**

*Isotermas (en grados Celsius) del liquidus del hielo a 1 atm de presión en el sistema  $H_2O$ - $NaCl$ - $FeCl_2$  con los ejes en unidades de wt%*



Posteriormente se calienta la muestra buscando la homogeneización del sistema, la temperatura y estado al cual ocurre dicha homogeneización corresponden a las condiciones que presentaba el fluido al momento del atrapamiento que para este caso ambos fluidos se encontraban en estado líquido a temperaturas de 208°C para  $H_2O$ - $NaCl$ - $CaCl_2$  y 228°C para  $H_2O$ - $NaCl$ - $FeCl_2$ .

Las temperaturas de homogeneización obtenidas de las muestras recolectadas y anteriormente mencionadas no coinciden con las altas temperaturas esperadas, por lo tanto, los pulsos hidrotermales documentados en este proyecto son de tipo epigenético.

Tomando como referencia el gradiente de temperatura promedio en un orógeno entre 30°C/Km (Crespo-Blanc, 2018) y habiendo obtenido temperaturas de homogeneización entre los 160°C - 228°C, sugerimos que las inclusiones analizadas debieron haber quedado atrapadas a aproximadamente 6 km de profundidad. Lo anterior, es posible si y sólo si, el fluido estaba en equilibrio con la temperatura de la roca encajante. Sin embargo, los fluidos pueden escapar rápidamente por fracturas y llegar con una temperatura de 210°C a 2 o 3 km de profundidad. Es

posible que el fluido haya ascendido por las fracturas tan rápidamente, debido a su baja densidad respecto a la densidad del medio. Esta deducción es de tipo especulativa, teniendo en cuenta que no fue posible hacer un modelamiento preciso que permitiera determinar la presión mínima de atrapamiento.

## 8. Conclusiones

-En el área de estudio se reconoce la presencia de rocas ígneas asociadas a un evento magmático calcoalcalino tipo I indicativo de margen continental activo con (aproximadamente 200 Ma).

-Las litologías ígneas observadas corresponden a dos eventos distintos, el primero de ellos representado por rocas cuarzomonzónicas, monzograníticas leucocráticas y rocas con textura pegmatítica en la fase tardía de este evento magmático, y un segundo evento asociado a diques de diabasa.

-Los estudios mineralógicos – petrográficos de las litologías estudiadas evidencian la presencia de alteraciones hidrotermales tales como alteración de tipo greisen, alteración cuarzo – sericítica con presencia de venas de cuarzo - sulfuros, alteración supergéna tipo argílica y epidotización.

-El estudio de las inclusiones fluidas en las estructuras hidrotermales analizadas permite reconocer dos eventos paleohidrotermales representados por los sistemas químicos  $H_2O+NaCl+CaCl_2$  y  $H_2O+NaCl+FeCl_2$ .

-La temperatura de primera fusión para el sistema  $H_2O+NaCl+CaCl_2$  es de aproximadamente  $-52^{\circ}C$  y para el sistema  $H_2O+NaCl+FeCl_2$  es de  $-37^{\circ}C$ .

-Dada fuerte evidencia de alteraciones hidrotermales presentes en la zona de estudio, esta se convierte en un área de gran interés a nivel académico que puede ser objeto de estudio de futuros proyectos de investigación.

### **9. Recomendaciones**

- Se sugieren la aplicación de estudios geocronológicos que permitan datar con mayor precisión los eventos geológicos aquí mencionados.

- Se recomienda promover el desarrollo de proyectos de investigación en la zona de estudio, teniendo en cuenta no sólo la fuerte evidencia de alteraciones hidrotermales mencionadas anteriormente, sino como parte de la construcción de nuevos modelos a la luz de nuevos datos.

- Se propone realizar un estudio a fondo sobre la muestra de pegmatita, que permita determinar las condiciones que propiciaron su formación y estimar un modelo genético detallado para este cuerpo.

### Referencias Bibliográficas

- Ardila, D. H., & Ayala, A. C. (2017). *Estudio mineralógico-petrográfico de las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas ígneas aflorantes a lo largo de la transecta Mogotes-San Joaquín (Macizo de Santander, Colombia)*. Proyecto de Grado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga.
- Cediel, F. (1969). *Geología del Macizo de Floresta*. Primer Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Černý, P. (1991). Rare-Element Granitic Pegmatites. Part I: Anatomy and Internal Evolution of Pegmatitic Deposits. *Geoscience Canada*, 49-67.
- Černý, P., & Ercit, T. (2005). The Classification of Granitic Pegmatites Revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6).
- Correa, A., Rodríguez, G., Arango, M., Zapata, G., & Bermúdez, J. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Batolito de Mogotes. Cordillera Oriental, Departamento de Santander. *Servicio Geológico Colombiano*.
- Crespo-Blanc, A. (2018). Deformación, metamorfismo y magmatismo: el cóctel de la formación de las cadenas de montañas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 35-46.
- Gamboa, J. A. (2016). *Estudio de las alteraciones hidrotermales asociadas a sistemas de fallas de dirección Noreste en el Batolito de Mogotes (sector Mogotes-Alto de los Cacaos; Macizo de Santander)*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga.
- Garrido, M. M., Grecco, L. E., Gómez, M. C., Pavón, C., & Luna, L. I. (2017). Manifestación de greisen relacionada a la. *Acta geológica lilloana* 29, 20–38.

- Goldsmith, R., Marvin, R. F., & Mehnert, H. H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 750, 44-49.
- Guerrero, C. E., & Oviedo, J. P. (2018). *Identificación y estudio de las alteraciones hidrotermales presentes entorno a la Falla de Onzaga y El Gaital, en el área comprendida al noreste del municipio de San Joaquín (Departamento de Santander, Colombia)*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga.
- Hall, A. (1971). Greisenisation in the granite of Cligga Head Corn-. *Proceedings of the Geologists' Association*, vol. 82, no. 2,, 209–IN1.
- Halter, W. E., Williams-Jones, A. E., & Kontak, D. J. (1996). The role of greisenization in cassiterite precipitation at the East Kemptville tin deposit, Nova Scotia. *Economic Geology*, vol. 91, no. 2, 368–385.
- IGAC. (2014).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). HOJA No. 136IIC Escala 1:25.000.
- Launay, G., Branquet, Y., Sizaret, S., Guillou-Frottier, L., & Gloaguen, E. (2023). How greisenization could trigger the formation of large vein-and-greisen Sn-W deposits: A numerical investigation applied to the Panasqueira deposit. *Ore Geology Reviews*.
- Launay, G., Sizaret, S., Guillou-Frottier, L., Fauguerolles, C., Champallier, R., & Gloaguen, E. (2019). Dynamic Permeability Related to Greisenization: Quantitative Petrophysical and Experimental Evidence. *Hindawi Geofluids*, 23.
- Launay, G., Sizaret, S., Lach, P., Melleton, J., Gloaguen, É., & Poujol, M. (2021). Genetic relationship between greisenization and Sn-W mineralizations in vein and greisen deposits: Insights from the Panasqueira deposit (Portugal). *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, 192.

- Llera, A. R. (Julio de 2014). Caracterización Del Campo Pegmatítico De Panceiros Y La pegmatita De Presqueira: Evaluación De Su Interés Como Fuente De Elementos Escasos. Oviedo, España.
- London, D. (2008). *Pegmatites*. Québec: Mineralogical Association of Canada.
- Malagón, D., & Saa, A. (2021). *Características petrográficas y de alteración hidrotermal en litotipos asociados a sistemas magmático-hidrotermales tipo pórfido en los andes y el Cratón amazónico: estudio del caso Chuscal (Colombia), Pegasus (Ecuador), Antamina (Perú), Las Tórtolas (Chi. Medelín.*
- Mantilla, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, H. (2011). Mioceno en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander). *Boletín Geológico*, 33(1).
- Pinilla, D. M., & Almanzar, J. D. (2017). *Estudio geológico de los diques riódacíticos porfiríticos aflorantes en el sector Cerro de las Antenas (Municipio de Mogotes, Departamento de Santander)*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología , Bucaramanga .
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Berlín: Springer.
- Reyes, F. (2021). *Génesis de las venas hidrotermales cuarzo-especularita aflorantes en el Cerro El Cardonal (Municipio de Mogotes, M.S)*. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología , Bucaramanga.
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Carlton, Australia: Blackell Publishing.
- Roedder, E. (1984). Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America*, 644.
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). *Mapa geológico generalizado del departamento de Santander, escala 1:400.000: memoria explicativa*. Bogotá: INGEOMINAS.

- Seedorf, E. (2005). Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *ECONOMIC GEOLOGY*, 251–298.
- Shepherd, T., Rankin, A., & Alderton, D. (1985). *A Practical guide to Fluid Inclusion Studies*.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.
- Simmons, S. (Enero de 2005). A LOOK AT PEGMATITE CLASSIFICATIONS. New Orleans, Louisiana, United States of America: Department of Geology and Geophysics, University of New Orleans.
- Simmons, W. B., & Webber, K. L. (2008). Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*, 421 - 438.
- Steele-MacInnis, M., Ridley, J., Lecumberri-Sanchez, P., Schlegel, T. U., & Heinrich, C. A. (2016). Application of low-temperature microthermometric data for interpreting multicomponent fluid inclusion compositions. *Earth-Science Reviews*, 14-35.
- Urueña, S. C. (2014). Metamorfismo, exhumación y termocronología del Neis de Bucaramanga. (Macizo de Santander, Colombia). Tesis de maestría. *Universidad Nacional de Colombia*, 191.
- Van Der Lelij, R. (2013). Reconstructing northwestern Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a geochronological, thermochronological and geochemical study. Tesis Doctoral. doi:10.13097/archive-ouverte/unige:31653
- Van Der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., & Mora, A. (2016). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research*, 31, 271-294.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., & Tellez, N. (1981). GEOLOGÍA DEL CUADRANGULO I-13, MALAGA. INGEOMINAS. *Boletín Geológico*, 24, 1-76.

- Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga.
- Véliz, J. D., Egoávil, C. H., & Tumialán de la Cruz, P. (2012). Influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, A. (1973). geología del cuadrangulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. INGEOMINAS. *Boletín Geológico*, 21, 1–134.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Tellez, N., & Jaramillo, L. (1977). Mapa geológico San Gil y Málaga (parte de los cuadrángulos I-12 y I-13), Colombia. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.

## Apéndices

### Apéndice A. Vías de acceso

Para llegar a la zona de recolección de la primera muestra desde la cabecera municipal de Mogotes, se debe tomar la vía Mogotes- San Gil por alrededor de 500 m y posteriormente una ruta alterna al NE, que conduce a la vereda “Las Flores” a una distancia de 4.2 km. Para llegar al punto de recolección de la segunda muestra, se toma la vía Mogotes-San Joaquín y aproximadamente a 3 km de recorrido, se toma la vía que se dirige hacia la vereda “El Gaital” sobre la cual se avanza 5.3 km. Saliendo de las carreteras intermunicipales, las vías se convierten en zonas carreteables con partes del trayecto particularmente inestables. El recorrido hacia la zona de estudio se basó en la información proporcionada por la plancha 136IIC, escala 1:25.000 del Instituto Agustín Codazzi (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2014).

### Figura 37

*Mapa de vías de acceso a la zona de estudio*



*Nota.* Adaptado de Google Earth.

## Apéndice B. Clasificación de pegmatitas

Los esquemas modernos de clasificación de pegmatitas están fuertemente influidos por la clasificación por zonas de profundidad de las rocas graníticas publicada por (Buddington, 1959), y la clasificación de (Ginsburg *et al.*, 1979) (Simmons S. , 2005).

Por ejemplo, (Ginsburg *et al.*, 1979) distingue cuatro clases (abisal, moscovítica, elementos raros o escasos y miarolítica) basadas en el emplazamiento cortical y en su relación con el metamorfismo y con los plutones graníticos. (Černý y Ercit, 2005) realizan una nueva revisión de esta clasificación, en la que incluyen otra clase (moscovitica-elementos escasos) (Llera, 2014).

La clasificación de (Černý, 1991) es la clasificación de pegmatitas más utilizada en la actualidad, su clasificación es una combinación de profundidad de emplazamiento, grado metamórfico y contenido de elementos menores e incluye 4 categorías o clases principales, estas son: abisal (alto grado, alta a baja presión), muscovita (alta presión, baja temperatura), de elementos raros (baja temperatura y presión) y miarolítica (nivel poco profundo). Las clases de elementos raros se subdividen en función de la composición en tipos LCT y NYF: LCT para el enriquecimiento en litio, cesio y tantalio y NYF para el enriquecimiento en niobio, itrio y flúor. La clase de elementos raros se subdivide a su vez en tipos y subtipos según las características mineralógicas/geoquímicas. Este esquema se ha utilizado en la mayoría de los estudios modernos sobre pegmatitas (Simmons S. , 2005)

**Tabla 4**

*Clasificación de pegmatitas según (Černý, 1991)*

THE FOUR CLASSES OF GRANITIC PEGMATITE ČERNÝ, 1991						
Class	Family	Typical Minor Elements	Metamorphic Environment	Relation to Granite	Structural Features	Examples
Abyssal	—	U, Th, Zr, Nb, Ti, Y, REE, Mo  poor (to moderate) mineralization	(upper amphibolite to low- to high-P granulite facies  ~4-9 kb ~700-800°C	none (segregations of anatectic leucosome)	conformable to mobilized cross-cutting veins	Rae and Hearne Provinces, Sask. (Tremblay, 1978); Aldan and Anabar Shields, Siberia (Bushev and Koplus, 1980); Eastern Baltic Shield (Kalita, 1965)
	—	Li, Be, Y, REE, Ti, U, Th, Nb > Ta  poor (to moderate) mineralization, micas and ceramic minerals	high-P, Barrovian amphibolite facies (kyanite-sillimanite)  ~5-8 kb ~650-580°C	none (anatectic bodies) to marginal and exterior	quasi-conformable to cross-cutting	White Sea region, USSR (Gorlov, 1975); Appalachian Province (Jahns <i>et al.</i> , 1952); Rajahstan, India (Shmakin, 1976)
Rare - Element	LCT	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Nb <> Ta, Sn, Hf, B, P, F  poor to abundant mineralization, gemstock industrial minerals	low-P, Abukuma amphibolite to upper greenschist facies (andalusite-sillimanite) ~2-4 kb ~650-500°C	(interior to marginal to) exterior	quasi-conformable to cross-cutting	Yellowknife field, NWT (Meintzer, 1987); Black Hills, South Dakota (Shearer <i>et al.</i> , 1987); Cat Lake-Winnipeg River field, Manitoba (Černý <i>et al.</i> , 1981)
	NYF	Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta, F  poor to abundant mineralization, ceramic minerals	variable	interior to marginal	interior pods, conformable to cross-cutting exterior bodies	Llano Co., Texas (Landes, 1932); South Platte district, Colorado (Simmons <i>et al.</i> , 1987); Western Keivy, Kola, USSR (Beus, 1960)
Miarolitic	NYF	Be, Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta, F  poor mineralization, gemstock	shallow to sub-volcanic  ~1-2 kb	interior to marginal	interior pods and cross-cutting dikes	Pikes Peak, Colorado (Foord, 1982); Sawtooth batholith, Idaho (Boggs, 1986); Korosten pluton, Ukraine (Lazarenko <i>et al.</i> , 1973)

Recientemente, (Černý y Ercit, 2005) publicaron una nueva revisión de la clasificación de (Černý, 1991). En esta revisión proponen una serie de cambios que abordan la clasificación de pegmatitas NYF y una clasificación petrogenética de pegmatitas derivadas de plutones. Se introducen nuevas categorías de subclases NYF y LCT y se amplían las firmas geoquímicas. La clasificación petrogenética modificada es un "sistema familiar" de clasificación de pegmatitas graníticas de derivación plutónica. Esta clasificación ha sido ampliamente aceptada y es de uso generalizado en la actualidad (Simmons y Webber, 2008).

**Tabla 5***Clasificación de pegmatitas según (Černý y Ercit, 2005)*

Class	Subclass	Type	Subtype
Abyssal (AB)	AB-HREE		
	AB-LREE		
	AB-U		
	AB-BBe		
Muscovite (MS)			
Muscovite- Rare-Element (MSREL)	MSREL-REE		
	MSREL-Li		
Rare-element (REL)	REL-REE	allanite-monazite	
		euxenite	
		gadolinite	
	REL-Li	beryl	beryl-columbite beryl-columbite-phosphate
		complex	spodumene petalite lepidolite elbaite amblygonite
		albite-spodumene albite-spodumene	
Miarolitic (MI)	MI-REE	topaz-beryl	
		gadolinite-fergusonite	
	MI-Li	beryl-topaz	
		MI-spodumene MI-petalite MI-lepidolite	