

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA
NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA, GEOQUÍMICA Y DE INCLUSIONES
FLUIDAS EN LA MINERALIZACIÓN DE NIOBIO, URANIO Y TANTALIO DE LA
SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE, COLOMBIA.

Lexlys Stefany Avendaño Gómez

Leidy Julieth Muñoz Martínez



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA
NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA, GEOQUÍMICA Y DE INCLUSIONES
FLUIDAS EN LA MINERALIZACIÓN DE NIOBIO, URANIO Y TANTALIO DE LA
SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE, COLOMBIA.

Lexlys Stefany Avendaño Gómez y Leidy Julieth Muñoz Martínez

Trabajo de Grado para optar por el título de geólogo

Director:

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc Geología aplicada

Codirector:

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo PhD. Geología Economía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar una de las mejores etapas de mi vida. Por poner en mi camino personas maravillosas que hicieron cada momento extraordinario y me ayudaron a sobrellevar las dificultades y las
tristezas.

A mis papás que con su amor me impulsaron e impulsan cada día a ser mejor y trabajar por mis sueños.

Por confiar en mis capacidades incluso más de lo que yo lo hago.

A mi papá, por ser el mayor ejemplo de bondad, humildad y paciencia, por enseñarme que mostrar el lado
amable a los demás me ayuda a ser más feliz.

A mi mamá por enseñarme que con perseverancia y entrega puedo lograr todo lo que me propongo. Por
cuidar de mí y hacer todo para que siempre me sienta la persona más afortunada.

A mi hermanita, por ser la alegría y la bondad materializada. Por ser
uno de los motivos para trabajar con esmero cada día y motivarme cuando lo necesito.

A mi tía Herminda, por ser una segunda mamá. Por enseñarme con sus acciones a siempre mostrar el lado
amable a los demás.

A Lauris por ser mi gran confidente y mi calma. Por mostrarme que las almas gemelas existen y encontré
la mía.

A Lei por ser como una hermana para mí. Gracias por inspirarme a trabajar incansablemente por mis
sueños.

A Andrés, Ange, Cami, Daya, Dianis, Jeni, Jenny, Juanis, Lauris, Lei, Martyno, Silvi, Tani y Xiomy por
tratarme con tanto amor y enseñarme que el tiempo no determina la fuerza de la amistad. Por mostrarme
que la felicidad son instantes que luego recordamos con nostalgia y anhelo.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

DEDICATORIA

A Dios, por la tranquilidad en los días grises, por guiarme y escucharme.

A mi papá por ser el mejor mapa, guía, por hacer su rol de madre y padre, por enseñarme a ser fuerte, por su apoyo y amor más grande que la galaxia.

A mis abuelas, por enseñarme valores y formarme en base del amor, a ellas les debo quien soy.

A mis tías, en especial a Rosita, por hacer su rol como mamá, por cuidarme y mimarme, por los cafés y huevos en días de traspasado.

A mis angelitos, por acompañarme en cada momento, hermanito, lo estamos logrando.

A mi tío Rubén y Vivi, por motivarme a seguir y cumplir mis metas.

A mis primas, por su amor, ánimo, confianza y motivación.

A mi Tri, por hacer más divertido mi paso por la universidad y enseñarme que la vida académica es más bonita con buenos amigos.

A mi Lex, por ser la hermana que la vida me regalo, por estar, acompañarme, incluso en los días donde no creía, por más años de hermandad.

A Sara y Tyn, mis salvavidas.

A mis amigas, por sacarme muchas sonrisas, alimentarme incluso cuando no era capaz. Qué bonito coincidir con mis chicas, mujeres que inspiran.

Finalmente, pequeña lei, estoy orgullosa de ti.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

AGRADECIMIENTOS

Brindamos un especial agradecimiento a la Escuela de Geología y quienes hicieron parte directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto. A los funcionarios y empleados por su colaboración y disponibilidad en todo momento, Luis Garrido, Cesar Llerena, Rosadilia Carrillo, y Martha Blanco. A los directores de escuela Juan Diego Colegial y Carlos Rios por su contribución en nuestra formación profesional. Al profesor Luis Carlos Mantilla, por su guía y ejemplo que representan un gran referente para nuestra vida profesional. A todos los docentes que a lo largo de nuestra formación académica aportaron de distintas formas para nuestro crecimiento personal y universitario.

A nuestro director de tesis, Andrés Mauricio Cáceres por convertirse en un guía y consejero tanto en el ámbito personal, académico como profesional. Por brindarnos herramientas y oportunidades para crecer y fortalecer nuestros conocimientos y habilidades, por confiar en nuestras capacidades y motivarnos a seguir trabajando por nuestros proyectos.

Finalmente, a nuestros compañeros y futuros colegas por hacer de nuestro paso por la universidad ameno y constructivo, porque estos años serán inolvidables gracias a ellos y nos dejan amigos para toda la vida.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 OBJETIVOS	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
3 METODOLOGÍA	18
3.1 Fase 1: Búsqueda bibliográfica	18
3.2 Fase 2: Muestreo	18
3.3 Fase 3: Análisis de laboratorio	20
3.4 Fase 4: Análisis de datos	22
3.5 Fase 5: Elaboración del documento final	23
4 ANTECEDENTES	24
5 MARCO TEÓRICO	30
5.1 Estratigrafía	30
5.2 Geología estructural	35
6 RESULTADOS	37
6.1 Petrografía	37
6.1.1.1 Petrografía <i>macroscópica</i>	37
6.2 Microscopía óptica	39
6.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	50
6.3.1 Muestra LL-005-B	50
6.3.2 Muestra LL-004	55
6.3.3 Muestra LL-002	60
6.4 Petrografía de inclusiones	63
6.5 Difracción de rayos X (DRX)	66
6.5.1 Muestra LL-004	66
6.5.2 Muestra LL-005	68
6.5.3 LL-002	70
6.6 Geoquímica	71

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

7	DISCUSIÓN	81
8	IMPORTANCIA ECONÓMICA DE NIOBIO, URANIO Y TANTALIO EN EL MERCADO INTERNACIONAL	92
8.1.	Niobio	93
8.2.	Tantalio	94
8.3.	Uranio	95
8.4.	Zirconio	96
9.	CONCLUSIONES	98
10.	RECOMENDACIONES	100
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Lista de figuras

Figura 1 Localización área de estudio de las Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, Colombia. En base a la plancha 350 del SGC, cartografía básica por parte del IGAC y DEM por VERTEX NASA.	17
Figura 2 Localización en el área de estudio de los diferentes cuerpos de Sienitas Nefelínicas en San José del Guaviare, Colombia. En base a las planchas 350 y 372 del SGC, cartografía básica por parte del IGAC y DEM por VERTEX NASA.	33
Figura 3 Macrofotografías de las muestras LL-003 - LL-005. A. Aspecto de una muestra de mano de Sienita Nefelínica donde se observan fenocristales de zircón en tonalidades pardo-rojizas. B. Aspecto de una muestra de sienita nefelínica en la cual se observan pirocloros como agregados de coloración caramelo. Macrofotografía de las muestras LL-002 - LL-001. C-D. Aspecto de muestra de mano de la Sienita Nefelínica, donde se observan fenocristales de microclina en tonalidades rosa crema, nefelina y opacos.	38
Figura 4 Macrofotografías de la muestra LL-004-LL003. A. Aspecto de muestra de mano de la sienita nefelínica, donde se observa cambio de coloración por alteración y concentración de minerales máficos. B. Aspecto de muestra de la sienita nefelínica con textura tipo pegmatítica.	39
Figura 5 Diagrama de clasificación modal (Streckeisen, 1976) de las muestras de Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.	41
Figura 6 Fotomicrografías de las muestras LL-005(A), LL-002. A-B. Sección LL-005 Fenocristal de nefelina en nicoles paralelos y cruzados, donde se evidencia microfracturas además de sericitación. C-D. Sección LL-002. Glomero-cristales de nefelina con corona de cancrinita. E. Sección LL-005. Cristal de plagioclasa en nicoles cruzados con macla de albita. F. Sección LL-002. Fenocristal de microclina que desarrolla textura peritítica. Abreviaciones: nef- Nefelina, mcl- microclina, crc- cancrinita, pl- plagioclasa, N// - nicoles paralelos, Nx- Nicoles cruzados.	42
Figura 7 Muestra LL-005 A. Cristal de magnetita-ilmenita en luz reflejada y transmitida respectivamente.	45
Figura 8 Microfotografías de las muestras LL-005 (A-B), LL-004 y LL-002. A-B. Sección LL-002, en N//, NX. Fenocristales de zircón con embainamiento en contacto con fenocristal de microclina. C-D. Sección LL-005 B, donde se evidencian fenocristales de pirocloro y el fracturamiento radial asociado. D. Relación de opacos (magnetita-ilmenita) con cristal de pirocloro. E. Sección LL-005 A, Fenocristal de biotita nucleando en opacos, relacionado con cristal de nefelina alterando en los bordes a cancrinita. F. Sección LL-004, fenocristal de titanita en contacto con biotita y nefelina, en NX. Abreviaciones: Zrn- zircón, mcl- microclina, pcl- pirocloro, bt- biotita, op-opaco, tnt- titanita. N// - nicoles paralelos, Nx- Nicoles cruzados.	46
Figura 9 Microfotografías de las secciones analizadas. A. Sección LL- 001, cristal de microclina con desarrollo de perititas, ligeramente amarillas por el grosor de la sección. B. Sección LL-002. Desmezcla de albita en cristales de microclina, además se observa corona de reacción de cancrinita alrededor de nefelina. C. Sección LL-003. Cristal de zircón con microinclusiones de pirocloro y microclina. D. Sección LL-004. Microcristales de zircons diseminados en cristales de nefelina, plagioclasa y microclina. E-F. Secciones LL-005 A-B, respectivamente. Cristales de pirocloro con fracturamiento radial asociado. Abreviaciones: Zrn- zircón, mcl- microclina, pcl- pirocloro, bt- biotita, op-opaco, tnt- titanita. N// - nicoles paralelos, Nx- Nicoles cruzados.	49
Figura 10 Cristales de Pirocloro y diagrama de elementos. A) LL-005-B -1 B) LL-005-B -3 C) LL-005-B -7 D) LL-005-B -11. Microscopía electrónica de barrido-UIS.	52
Figura 11 Cristales de Óxidos y diagramas de elementos A) LL-005-B-2 B) LL-005-B-6 C) LL-005-B-10.	53
Figura 12 Cristales de Biotita y diagramas de elementos (LL-005-B-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	54
Figura 13 Cristales de biotita y diagrama de elementos (LL-004-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	55
Figura 14 Cristales de calcita y diagrama de elementos (LL-004-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	56
Figura 15 Cristales de Cancrinita y diagrama de elementos (LL-004-5). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	57
Figura 16 Cristal de Apatito y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	58
Figura 17 Cristal de Calcita y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	59
Figura 18 Cristales de óxidos y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	60

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Figura 19 Cristales de Zircón y diagrama de elementos (LL-002-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	61
Figura 20 Cristales de Apatito y diagrama de elementos (LL-002-8). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	62
Figura 21 Cristales de pertitas, donde se observan lámelas de exsolución de plagioclasa en feldespato potásico y diagrama de elementos (LL-002-9 y LL -002-10). Microscopía electrónica de barrido-UIS.	63
Figura 22 Microfotografía de las secciones LL-005 que muestra pequeñas inclusiones tipo I monofásicas acuosas.	65
Figura 23 Difractograma de la muestra LL-004 con código interno 21338003 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.	68
Figura 24 Difractograma de la muestra LL-005 con código interno 21338001 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.	69
Figura 25 Difractograma de la muestra LL-002 con código interno 21338002 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.	71
Figura 26 Diagrama TAS- concentración de álcalis vs SiO ₂ (Cox et al., 1979) para la muestra LL-005 de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.	74
Figura 27 Índice de alcalinidad de la muestra LL-005 para la Sienita Nefelínica de San José de Guaviare, de acuerdo con Maniar y Piccoli (1989).	75
Figura 28 Diagrama K ₂ O vs Na ₂ O, Middlemost (1975) para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.	76
Figura 29 Diagramas binarios de Harker (1909) para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.	77
Figura 30 Diagrama de variación de los elementos traza Nb y Zr respecto a SiO ₂ . Se usaron los datos de los dos informes enviados por el laboratorio.	78
Figura 31 Diagrama de discriminación de granitos por Pearce et al., 1984 para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.	79

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Lista de tablas

Tabla 1 Composición mineralógica de las muestras de roca estudiadas.....	40
Tabla 2 Tabla de Wt% y At% para Pirocloro para la sección LL-005-B el diagrama elemental. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	51
Tabla 3 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de magnetita-ilmenita para la sección LL-005-B. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	53
Tabla 4 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Biotita para la sección LL-005-B. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	54
Tabla 5 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Biotita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	55
Tabla 6 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Calcita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	56
Tabla 7 Tabla de Wa% y At% para el diagrama elemental de Cancrinita para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	57
Tabla 8 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Apatito para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	58
Tabla 9 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Calcita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	58
Tabla 10 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de magnetita, sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	59
Tabla 11 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Zircón para la muestra LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	60
Tabla 12 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de apatito sección LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	61
Tabla 13 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental pertitas en sección LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.	62
Tabla 14 Clasificación de inclusiones según sus fases y origen (Roedder, 1984), Shepherd. Et al., 1985).	64
Tabla 15 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-004 marcada como 21338003 en el laboratorio de rayos X.	67
Tabla 16 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-005 marcada con código interno 21338001.	69
Tabla 17 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-002 marcada con código interno de 21338002.	70
Tabla 18 Resultados de óxidos mayores en la muestra LL-005 de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.	71
Tabla 19 Resultados de elementos analizados en la muestra LL-005 de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.	72
Tabla 20 Comparación entre el promedio de óxidos mayores de la muestra LL-005, el porcentaje promedio de una sienita nefelínica según (Barker, 1983) y porcentaje promedio encontrado en estudios previos.	80
Tabla 21 Secuencia paragenética de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare a partir de las secciones analizadas.	83

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Resumen

Título: Caracterización petrográfica, geoquímica y de inclusiones fluidas en la mineralización de Niobio, Uranio y Tantalio en la sienita nefelínica en San José del Guaviare, Colombia*

Autores: Lexlys Stefany Avendaño Gómez; Leidy Julieth Muñoz Martínez **

Palabras clave: Metales raros, HFSE, complejos peralcalinos, Niobio, Uranio, Tantalio.

Descripción:

La sienita nefelínica de San José del Guaviare (SNSJG), ubicada al sureste de Colombia, departamento del Guaviare, presenta enriquecimientos en Nb, U, Ta, Zr y otros elementos incompatibles. Este cuerpo peralcalino de edad Neoproterozoica corresponde a rocas leucocráticas faneríticas, compuestas principalmente por microclina, nefelina, plagioclasa, biotita, fluorita y óxidos de hierro como magnetita e ilmenita.

La mineralización de Nb_2O_5 , UO_2 , Ta_2O_5 se concentra sobre los cristales de pirocloro, mientras que los altos contenidos de zirconio se encuentran únicamente en cristales de zircón. Esta concentración es el resultado de extrema cristalización fraccionada en la cámara magmática que permite la saturación de elementos incompatibles y la cristalización de las fases minerales que los contienen. El decaimiento radiactivo de los minerales refractarios, en sistemas ricos en volátiles como es el caso, genera fracturamiento que facilita la infiltración de fluidos. La ausencia de inclusiones fluidas confirma la característica magmática del sistema, sin embargo, los cambios texturales, alteración mineral y el fracturamiento encontrado en cristales de zircón y pirocloro, podrían inferir una incipiente transición a procesos magmáticos- hidrotermales por procesos metasomáticos.

La formación de estos cuerpos alcalinos se dio en un ambiente intraplaca anorogénicos durante el proterozoico, relacionado con un ambiente distensivo tipo rift, el cual fue el causante de la formación de magmas alcalinos manto-derivados.

*Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de geología. Director: M. Sc. Andrés Cáceres Bottia.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Abstract

TITLE: Petrography, geochemistry, and fluid inclusions of the rare metal enrichment (Niobium, Uranium, Tantalum) in the Nepheline syenite of San Jose del Guaviare, Colombia. *

AUTHORS: Lexlys Stefany Avendaño Gomez and Leidy Julieth Muñoz Martínez**

KEYWORDS: Rare metals, HFSE, Peralkaline, Niobium, Uranium, Tantalum.

DESCRIPTION

Enrichments of Nb, U, Zr, Ta and other incompatible elements were discovered in the Nepheline Syenite of San José del Guaviare (SNSJG), located in the Guaviare Province in the eastern region of Colombia. This region is part of the northwestern edge of the Amazonian craton. This peralkaline body of Neoproterozoic age corresponds to a phaneritic leucocratic rock mainly composed of microcline, nepheline, plagioclase, biotite, fluorite, and iron oxides (magnetite and ilmenite).

Nb₂O₅, UO₂, Ta₂O₅ mineralization is found on pyrochlore minerals, meanwhile zirconium is concentrated exclusively in zircon. The radioactive decay of U and Th, in volatile-rich systems, allows fluids mobilization through radiating fractures. Enrichment is the result of undergoing fractional crystallization in the magma chamber, which allows an incompatible elements saturation and their recrystallization of mineral and liquids phases. The absence of fluid inclusions supports the magmatic system settings. However: 1) textural changes, 2) deuteric- and mineral alteration, and 3) damage by self-irradiation in zircon and pyrochlore could deduce transition from magmatic to hydrothermal systems, influenced by metasomatism.

The formation of alkaline igneous bodies corresponds to anorogenic settings and alkaline mantle-derived magmas, related to an extensional environment, most likely rift-drift tectonics during Proterozoic.

* Bachelor Thesis

** Physicochemical Engineering College. Geology Department. Director: M.Sc Andres Cáceres Bottia.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

INTRODUCCIÓN

El uso en la industria de los metales raros ha presentado un gran auge en los últimos años debido a las innumerables aplicaciones en metalurgia, medicina, energía renovable, hidrocarburos, alta tecnología y computación (EU Commission, 2014; Zhou, 2017; Alvares & Trujillo, 2020; EU Commission, 2020). La exploración de depósitos de Uranio, Niobio y Tantalio proveen una ventaja económica y estratégica impulsada por un mercado de demanda creciente y precios relativamente estables y con aumento a futuro (CRU Consulting, 2018a; CRU Consulting, 2018b) lo que puede justificar el desarrollo de proyectos prospectivos. Estos metales se encuentran principalmente en complejos peralcalinos, los cuales corresponden a depósitos magmáticos enriquecidos en elementos incompatibles (HFSE) (Dostal, 2016).

Colombia, cuenta con un amplio potencial mineral encontrado en toda su extensión, como ha sido documentado en múltiples campañas exploratorias realizadas dentro del territorio (Bautista *et al.*, 2017; Maya *et al.*, 2018). Un ejemplo de ello la Sienita nefelínica de San José del Guaviare (SNSJG) ubicada en el cratón Amazónico al sureste de Colombia sobre la provincia de Río Negro Juruena, específicamente en el noroccidente del departamento del Guaviare. De acuerdo con estudios previos del Servicio Geológico Colombiano (2012-2018), se han reconocido valores anómalos de Niobio, Uranio y Tantalio en el área de estudio, específicamente en las veredas Nuevo Tolima, El Turpial y Las Pizarras. Estudios petrográficos y mineralógicos (Arango *et al.*, 2012, Maya *et al.*, 2018) determinaron que la mineralización se encuentra hospedada en pirocloros.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

En el presente estudio, se realizarán análisis petrográficos, mineralógicos, litogeoquímicos y de inclusiones fluidas para analizar las muestras correspondientes al cuerpo mineralizado con el fin de confirmar su origen magmático, determinar las características de los procesos geológicos (composición y temperatura) que favorecieron el enriquecimiento en los minerales accesorios, establecer la paragénesis y las concentraciones de Nb, U y Ta, aportando al conocimiento geológico de la zona.

Dado el potencial de los depósitos peralcalinos, se busca extender el conocimiento respecto a estos elementos que han sido considerados como estratégicos por diversos autores, ampliando así las oportunidades de desarrollo regional y nacional.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Identificar las características de la mineralización de Niobio, Uranio, y Tantalio a partir de petrografía, geoquímica e inclusiones fluidas de la Sienita Nefelínica en San José del Guaviare.

1.2 Objetivos específicos

Realizar una revisión y recopilación bibliográfica con el fin de contextualizar geológicamente el área de estudio.

Describir las características texturales y composicionales del cuerpo que conforma la sienita nefelínica en el área de investigación, mediante análisis mineralógicos y petrográficos.

Analizar el contexto geológico del cuerpo mineralizado a partir de estudios litogeoquímicos y de roca total, realizando además una comparación con estudios previos de la zona.

Realizar estudios de inclusiones fluidas para corroborar el origen magmático de la mineralización.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está localizada sobre el dominio metalogénico del Cratón Amazónico (Cordani *et al.*, 2009; Cordani *et al.*, 2016; Lopez & Cramer, 2014; DRM-GrupoMMC, 2016), al sureste del territorio Colombiano y noroccidente del departamento del Guaviare. El área de interés específicamente se sitúa al suroeste del Municipio de San José del Guaviare en jurisdicción de las veredas La Pizarra- Nuevo Tolima y El Turpial; y descrito por Bautista *et al.*, 2017, como sector Monserrate como se observa en la **Figura 1** (Ver **Figura 1**). Compreendida dentro de las coordenadas planas:

X1: 1.151.000 **X2:** 1.156.000

Y1: 759.000 **Y2:** 764.500

Este cuerpo del sector Monserrate, abarca un área de 16 Km² dentro de las planchas 350IVC San José del Guaviare y 372IIA El Retorno del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC-SGC) a escala 1:100.000, que comprende la unidad geológica correspondiente a la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, con relativa homogeneidad en su composición, representada por las facies de Sienita Nefelínica (NPsnsjg-sn) y Sienita de feldespatos alcalinos con nefelina (NPsnsjg-scn) (Maya *et al.*, 2018), la cual se encuentra en contacto inconforme con las Areniscas de San José Miembro basal Ciudad de Piedra (K1mbcp) y la formación Caja (N1c).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

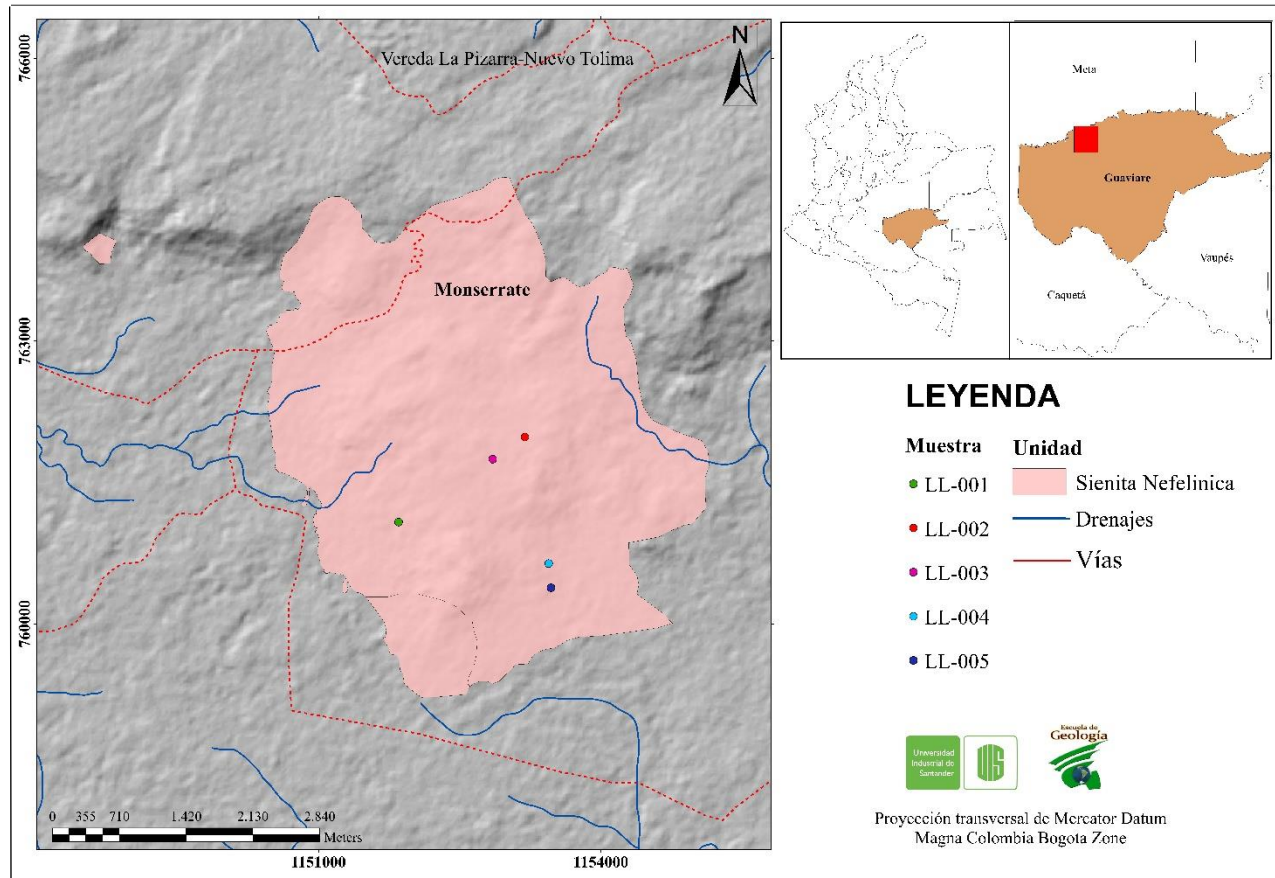


Figura 1 Localización área de estudio de las Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, Colombia. En base a la plancha 350 del SGC, cartografía básica por parte del IGAC y DEM por VERTEX NASA.

3 METODOLOGÍA

La elaboración del trabajo de grado se llevó a cabo a partir de cinco fases secuenciales, establecidas con el fin de lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente mencionados.

Estas fases se detallan individualmente a continuación:

3.1 Fase 1: Búsqueda bibliográfica

Con el fin de proveer un contexto general del área de estudio se recopiló y sintetizó la información a partir de estudios anteriormente realizados en la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, así como de otros cuerpos de sienita nefelínica existentes y ampliamente estudiados en otras partes del mundo.

3.2 Fase 2: Muestreo

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Debido a las complicaciones por la crisis de salubridad ocasionada por el COVID-19 y los problemas de orden público en el área de estudio, la toma de muestras se realizó por medio de un baqueano nativo del municipio de San José del Guaviare, el cual cuenta con experiencia previa en campo, manejo de equipos, toma de muestras y reconocimiento de la mineralogía de interés. Dicha experiencia fue adquirida durante el trabajo en distintas campañas realizadas por el SGC, en las cuales él estuvo contratado. A dicho trabajador, se le enviaron los implementos (brújula, martillo, lupa, GPS) necesarios para la toma de muestras y las coordenadas previamente seleccionadas.

La selección de las áreas de mayor interés se realiza con base en informes previos presentados por el SGC. Estos documentos corresponden a la MEMORIA DE LAS PLANCHAS 350 y 372, y el informe de EXPLORACIÓN DE MINERALES ENERGÉTICOS A PARTIR DE MEDICIONES GAMAESPECTROMÉTRICAS PARA POTASIO, URANIO Y TORIO EN EL ÁREA DE SAN JOSÉ DEL GUAVIARE (Arango et al., 2011; Bautista et al., 2017; Maya et al., 2018).

Con el apoyo del director de tesis Andrés Cáceres, quien visitó la zona en múltiples ocasiones y los documentos anteriormente mencionados, se realizó una correlación de puntos y se definieron los cinco lugares de interés para muestreo.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

3.3 Fase 3: Análisis de laboratorio

Durante la fase de laboratorio se realizó el análisis petrográfico macro y microscópico que determino la mineralogía, texturas y paragénesis inicial de las rocas con el fin de determinar los procesos principales y secundarios implicados en su formación, así como su ambiente geológico particular.

En este proyecto se realizó la petrografía de seis (6) secciones delgadas pulidas y cuatro (4) secciones delgadas doblemente pulidas elaboradas en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander. Las secciones delgadas pulidas se analizaron en el microscopio petrográfico Nikon Eclipse LV100 perteneciente al laboratorio petrográfico de la Universidad Industrial de Santander a través de conteo mineral con un barrido de 1 x 1 mm obteniendo entre 500-600 puntos por sección. Adicionalmente, con el fin de estudiar los minerales opacos presentes en las muestras se utilizó el microscopio de luz reflejada Nikon Optiphot 100S del laboratorio de Geología Aplicada del Parque Tecnológico de Guatiguará, identificando a partir de las propiedades ópticas y de dureza la fase mineral.

Igualmente, en el parque tecnológico de Guatiguara, se realizaron los análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM) para tres secciones previamente analizadas mediante petrografía, correspondientes a LL-002, LL-003 y LL-004.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Sobre cada una de las secciones (3) se marcaron los puntos de interés para analizarlos puntualmente con el Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650, colocándolas sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón y recubiertas con carbono. Las imágenes fueron obtenidas gracias a detectores de electrones secundarios y retrodispersados, Everhart Thornley detector ETD y Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD, respectivamente. Por su parte, el análisis químico EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) y la información semi-cuantitativa de los elementos químicos se obtuvo gracias al Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) y el Software EDX Genesis.

El análisis petrográfico de las secciones doblemente pulidas para el estudio de inclusiones vítreas/fluidas se realizó en el microscopio Nikon Labophot2-pol con objetivo de 40X del GIGBA en el laboratorio de Geología Aplicada del Parque Tecnológico de Guatiguará.

Se hizo uso de la base teórica previamente estudiada a partir de la cual se diferencian inicialmente las inclusiones primarias de las secundarias, describiéndose de acuerdo con las fases que las componen (L+V+S). El análisis petrográfico de las inclusiones es fundamental para definir las características del fundido y dinámica de los fluidos presentes durante la formación del cuerpo.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Adicionalmente, a partir de difracción de rayos X (DRX), se respalda y complementan los resultados de petrografía y SEM. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de rayos X del Parque tecnológico de Guatiguará. Para esto se llevaron tres muestras correspondientes a L-002 molturada, L-004 y L-005 como roca entera, de las cuales el laboratorio realizó el registro de datos para su identificación cualitativa de fases minerales por medio del software *Diffra.Eva* y la base de datos PDF-2 y PDF-4 2021 del *International Center for Diffraction Data* (ICDD).

Se realizó análisis geoquímico de multielementos por ICP/Digestion multiácida para óxidos mayores y menores en el laboratorio SGS. El método de análisis químico se seleccionó debido a que el procedimiento de disolución por medio de la combinación de ácidos resulta muy eficaz para los minerales refractarios presentes en estas muestras.

3.4 Fase 4: Análisis de datos

El análisis e interpretación de datos se realizó simultáneo a la fase de laboratorio con la finalidad de determinar la secuencia paragénetica a partir de descripciones mineralógicas completas, además de especificar las condiciones de formación para las mineralizaciones de Niobio, Uranio y Tantalio, corroborando el origen magmático del sistema.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

3.5 Fase 5: Elaboración del documento final

Finalmente, los datos adquiridos han sido recopilados y estructurados en el presente trabajo de investigación dando respuestas a los objetivos planteados previamente. Los resultados obtenidos tienen como fin aportar al conocimiento geológico de metales raros en Colombia, específicamente para la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.

4 ANTECEDENTES

El contexto geológico en el cual se enmarca el área de estudio está localizado al oeste del Escudo Guayanés, específicamente al noroeste del cratón Amazónico; el cual se encuentra ubicado al este de la Cordillera Oriental, limitando con Venezuela, Brasil y Perú (Pinson *et al.*, 1962; Restrepo y Toussaint 2020). El cratón Amazónico ha sufrido una compleja evolución tectónica a lo largo de la historia de la tierra, impulsada por la geodinámica de los supercontinentes (Cordani *et al.*, 2009); durante Columbia y Rodinia numerosos eventos colisionales y extensionales modificaron la posición y geometría del cratón dando origen a grandes orógenos y estructuras tipo rift, fundamentales en la composición actual de la Amazonía; su estructura se subdivide en dos núcleos arcaicos y 5 provincias tectónicas proterozoicas definidas por Cordani *et al.* (2009) como: 1). Central Maroni-Itacaiunas (MI), 2). Venturi-Tapajós (VT), 3). Río Negro-Juruena (RNJ), 4). Rondonian- San Ignacio (RO) y 5). Sunsas (SU); recalcando que la provincia de Río Negro Juruena o provincia Rionegro (Teixeira *et al.*, 1989; Tassinari y Macambira, 1999; Santos *et al.*, 2000) se correlaciona al Complejo Migmatítico de Mitú (CMM) definido como el basamento metamórfico del área de investigación (Restrepo y Toussaint, 2020). Con respecto a su génesis, el cratón amazónico se ha asociado a la acreción sucesiva de terrenos y cinturones jóvenes a partir de un núcleo antiguo, donde la provincia Rio Negro-Juruena que contiene el Complejo Migmatítico de Mitú debe su génesis específica a granitoides provenientes de magmas juveniles desde 1,8 hasta 1,4 Ga (Tassinari y Macambira, 1999; Moyano y Prieto, 2021).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Por su parte, la disposición del Cratón Amazónico durante la formación de Gondwana se ha sustentado a partir de dos escenarios temporales diferentes asociados al periodo Ediacaran y Cámbrico temprano, ocurridos antes y después a la apertura del Océano Iapetus, respectivamente. Este último evento mencionado, debido a la separación entre Amazonia y Laurentia (Cordani *et al.*, 2009) impulsó la formación de unidades tectónicas extensionales (Cordani *et al.*, 2009) que constituyen la pieza fundamental para el entendimiento del modelo genético de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.

El complejo Migmatítico de Mitú (Galvis *et al.*, 1979), Complejo Guayanés (Pinheiro *et al.*, 1976) o Complejo Mitú (Celada, 2006; López y Cramer, 2014) fue formado a partir de granitoides de edad proterozoica, por amalgamación de arcos magmáticos, principalmente intra-oceánicos derivados del manto, los cuales se vieron afectados por contaminación cortical a finales de la orogenia Transamazonica (Cordani *et al.*, 2009; Lopez y Crammer, 2014; Rodríguez *et al.*, 2011; Priem *et al.*, 1982; Dall’Agnol y Macambira, 1992). Sin embargo, debido a la diversidad de edades comprendidas entre 1,99-1,38 Ga, la variedad de litologías y procesos relacionados algunos autores sugieren la definición de una nomenclatura más adecuada para esta unidad (Ibañez & Cordani, 2020). Este complejo ha sido denominado por algunos autores como parte del basamento cristalino del escudo de Guyana, comprendiendo dentro de sus unidades a la Sienita nefelínica de San José del Guaviare (Arango *et al.*, 2012).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Sin embargo, en estudios más recientes, se ha acuñado el termino de Complejo Guaviare a las rocas ígneas y metamórficas de edad proterozoica ubicadas en las planchas 372 y 371 del servicio geológico; Amaya *et al* (2018), describe al complejo Guaviare como el basamento del área de estudio, el cual se encuentra constituido por neises, anfibolitas y cuarcitas, los cuales debido a la intrusión del cuerpo de sienita presentan metamorfismo de contacto sobreimpuesto (Maya *et al.*, 2018; Amaya *et al.*, 2021). No obstante, en este mismo estudio no correlacionan a las rocas metamórficas del complejo Guaviare (1,3-0,6 Ga) con las del Complejo Migmatítico de Mitú (1,99-1,38 Ga) debido a diferencias geocronológicas (Maya *et al.*, 2018; Ibañez & Cordani, 2020). Cabe resaltar que, aunque el Complejo Guaviare no comprende la Sienita nefelínica de San José del Guaviare dentro de sus unidades, está si se incluye dentro del basamento cristalino del área de estudio.

Posterior al magmatismo anorogénico de intraplaca, ocurrió un emplazamiento de granitos tipo A, de composición intermedia a ácida y de edad Mesoproterozoica, seguido de un episodio metamórfico Nickeriense de bajo grado (Lopez & Crammer, 2014; Rodríguez *et al.*, 2011; Priem *et al.*, 1982; Restrepo y Toussaint, 2020).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

La Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, aunque se localiza en las áreas menos exploradas del territorio colombiano ha sido objeto de estudio por parte de varios autores, que han realizado importantes aportes a su caracterización litológica y evolutiva a lo largo de los años (Arango et al., 2012; Bautista et al., 2017; Maya et al., 2018).

Según Arango *et al.* (2011), la sienita representa la última actividad ígnea que se produce en la parte occidental del cratón con la disminución progresiva en la fusión parcial de la corteza (Toussaint, 1993). Se distinguen dos áreas, denominadas Las Delicias (2km) y La Pizarra (10km) con presencia de granofels, monzosienita nefelínica y sienita nefelínica, en donde las texturas heredadas (relicticas) sugieren procesos de anatexia de rocas metamórficas sometidas a ultrametamorfismo (Arango *et al.*, 2012). Los análisis geoquímicos concluyeron que las rocas se caracterizan por ser peralcalinas, de la serie potásica, enriquecidas LREE originados en ambiente intraplaca anorogénico, además las dataciones arrojaron edades de cristalización y enfriamiento de 577 Ma (Ediacaran) y 494 Ma (Furoginiano), respectivamente.

Dataciones de K-Ar, Rb-Sr y Ar^{40}/Ar^{39} (Pinson, 1972; Arango *et al.*, 2011) en biotitas, realizadas en localidades de San José del Guaviare y el río Guaviare, consideradas rocas del basamento cristalino, revelaron edades entre 1100-1200 Ma para el río Guaviare y 445-495 Ma en San José del Guaviare, donde estas últimas edades se relacionan con los eventos de exhumación (enfriamiento), que a su vez indican varios periodos de intrusión.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE Nb, U Y Ta DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Vesga y Castillo (1972) definen el nombre de Sienita Nefelínica de San José del Guaviare por primera vez, describiendo un cuerpo de origen magmático perteneciente al basamento cristalino y destacando el carácter intrusivo debido a la ausencia de conglomerado basal y de feldespatos en las areniscas.

Posteriormente el grupo de investigación y exploración de recursos minerales energéticos del SGC realizó una campaña de prospección en el área, incluyendo varios cuerpos que no habían sido reportados anteriormente en la literatura; estos intrusivos sieníticos se sitúan en inmediaciones al municipio de San José del Guaviare, en las veredas La Pizarra, Las Delicias, El Capricho y Cerritos. Los mayores enriquecimientos de Nb, U, Ta y Zr fueron registrados en los Pirocloros y Zirrones del sector Monserrate debido a procesos netamente magmáticos, donde la mineralización se formó posterior a la cristalización de feldespatos y feldespatoides (Bautista *et al.*, 2017).

En las últimas dataciones realizadas a los zirrones de esta unidad se obtuvo una edad aproximada de 577 Ma (*Neoproterozoico-Cámbrico*), concordante con el evento regional intraplaca ocasionado por la *orogenia Pan-Africana* (Franco *et al.*, 2018). Por otra parte, las edades obtenidas de los zirrones provenientes de la Sienita Nefelínica en la localidad de Jordán corresponden a la edad de cristalización aproximada de 605,4 Ma durante el Ediacárico Temprano (Muñoz *et al.*, 2019), evidenciando temporalidades considerablemente anteriores a las reportadas en la localidad de La Pizarra, determinadas por estudios previos (Arango *et al.*, 2011).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Basados en los estudios más recientes (Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018), la SNSJG se caracteriza por ser un cuerpo ígneo intrusivo (Vesga y Castillo 1972) de color grisáceo a rosado, leucocrático, holocristalino de tamaño de grano medio a grueso, con variaciones locales texturales que alcanzan tamaños pegmatíticos, presentando una mineralogía de feldespato alcalino, plagioclasa, nefelina, biotita y arfvedsonita, junto a fluorita, zircón, esfena, apatito, epidota, calcitas y granates (ferro-magnesianos) como minerales accesorios (Arango *et al.*, 2012; Maya *et al.*, 2018), de donde los pirocloros y zircones contienen los mayores enriquecimientos de Nb, U, Ta y Zr (Arango *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2017; Maya *et al.*, 2018); es importante recalcar que el contenido de estos elementos en los minerales accesorios ha sido ampliamente notado en Sienitas Nefelínicas alrededor del mundo como en los depósitos de Ilimaussaq (Groenlandia), Motzfeldt (Groenlandia), Lovozero (Rusia) y Baerzhe (China) (Dostal, 2016).

5 MARCO TEÓRICO

Los trabajos de cartografía y reconocimiento geológico llevados a cabo sobre el Municipio de San José del Guaviare y sus alrededores han sido realizados por el SGC e INGEOMINAS (Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018), a pesar de los riesgos que conlleva realizar exploración en estas localidades. Los proyectos ejecutados a lo largo de los años han logrado caracterizar las litologías aflorantes y la geología estructural del área, descubriendo oportunidades interesantes para el desarrollo minero y económico del país (Arango *et al.*, 2011; Bautista *et al.*, 2017; Maya *et al.*, 2018).

5.1 Estratigrafía

La principal unidad de estudio corresponde a la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, en contacto con la Formación Caja y el miembro basal superior Ciudad de Piedra, perteneciente a la Formación Areniscas de San José, descritas a continuación con base en sus rasgos geológicos, geomorfológicos y estructurales (Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

La sienita Nefelínica de San José del Guaviare se compone de sienita nefelínica (NPsnsjg-sn), sienita de feldespatos alcalinos con nefelina (NPsnsjg-scn), sienogranito (NPsnsjg-sg) y sienita (NPsnsjg-s) (Maya *et al.*, 2018) distinguida por su relieve ondulado o colinado suave característico, es descrita como una roca ígnea intrusiva holocristalina, fanerítica, equigranular a inequigranular con tamaño de grano de medio a grueso y variaciones texturales a pegmatitas, principalmente leucocrático con variación de tonalidad de blanco/gris hasta rosado (Vesga y Castillo, 1972; Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018). Los minerales principales corresponden a feldespatos alcalinos, nefelina y plagioclasa con biotita y arfvedsonita como minerales menores; presenta además minerales accesorios como magnetita-ilmenita pirocloro, zircón, fluorita, esfena, apatito, epidota, calcita y granate.

La unidad está representada por cuatro cuerpos principales localizados en las planchas 350 San José del Guaviare y 372 El Retorno del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), caracterizados por estudios recientes del SGC (Arango *et al.*, 2011; Arango *et al.*, 2012; Maya *et al.*, 2018) como se observa en la **Figura 2** (Ver **Figura 2**).

El cuerpo principal está localizado hacia el sureste de la plancha 350IVC y el noreste de la plancha 372IIA cubriendo un área de 16 Km², destacando su textura predominante hipidiomórfica granular y localmente zonas con orientación mineral y bandeamiento predominando la textura granoblástica (Bautista *et al.*, 2017), conformado por sienita nefelínica (NPsnsjg-sn) y en menor proporción sienita de feldespatos alcalinos con nefelina (NPsnsjg-scn).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Un segundo cuerpo, denominado Las Delicias localizado hacia el SWW del municipio, en la vereda de la cual toma su nombre, cubre un área de 2 Km², como reportó Arango *et al.* (2012) por primera vez. Se compone principalmente de granofels de feldespato y nefelina (Arango *et al.*, 2011).

El Capricho, se encuentra hacia el SW de la plancha 372-I-B sobre las Veredas Capricho, El Dorado, Las Orquídeas y Triunfo Dos, cubriendo un área de 8 km² (Maya *et al.*, 2018) compuesto por sienitas nefelínicas (NPsnsgj-sn), sienogranitos (NPsnsgj-sg) y sienitas de feldespato alcalino con nefelina (NPsnsgj-scn).

Por su parte el cuarto cuerpo, Cerritos, se ubica más hacia el sur que los cuerpos anteriormente descritos, en alrededores de las veredas Cerritos y Jordán. Se caracteriza por la heterogeneidad composicional y textural de su extensión (Maya *et al.*, 2018), debido a la presencia de sienitas nefelínicas (NPsnsgj-sn), sienitas de feldespato alcalino con nefelina (NPsnsgj-scn), sienitas (NPsnsgj-s), sienogranitos (NPsnsgj-sg), monzosienitas nefelínica, cuarzosienitas y cuarzosienitas de feldespato alcalino.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

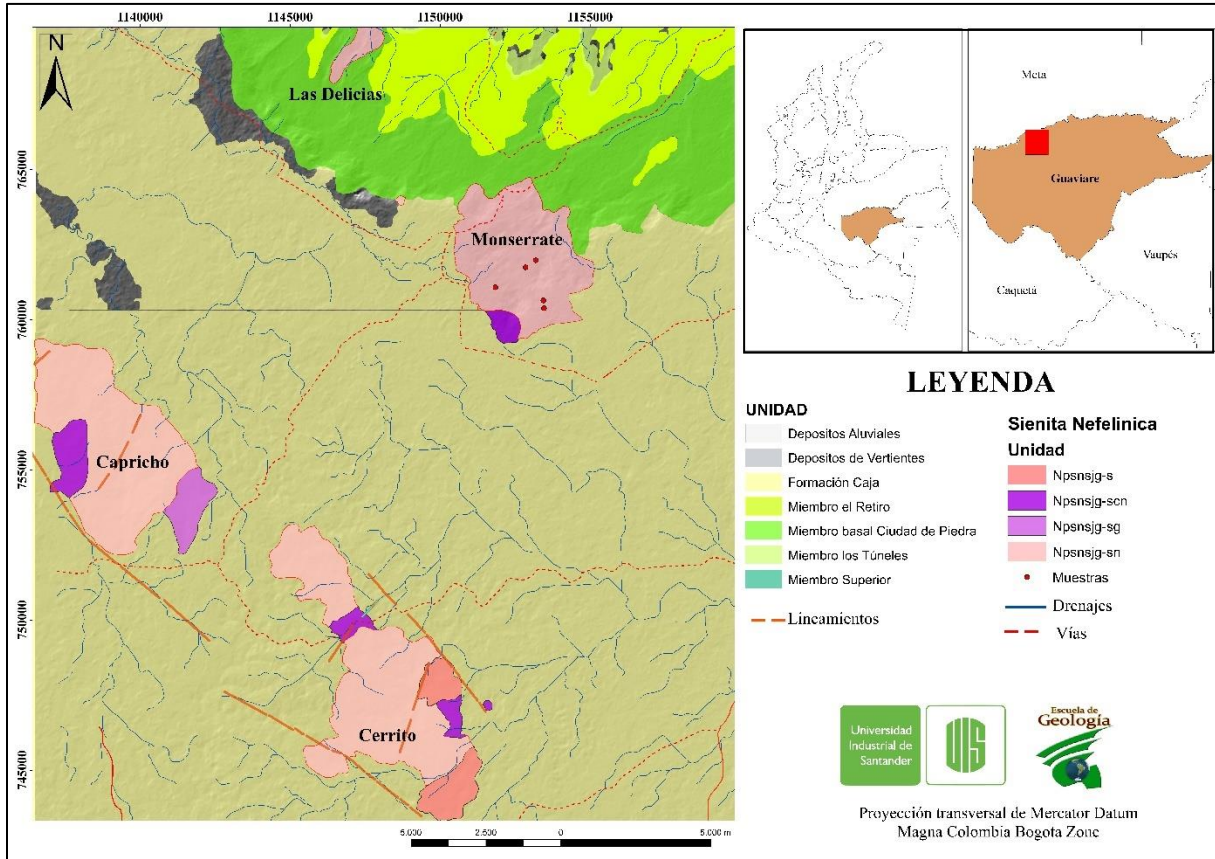


Figura 2 Localización en el área de estudio de los diferentes cuerpos de Sienitas Nefelínicas en San José del Guaviare, Colombia. En base a las planchas 350 y 372 del SGC, cartografía básica por parte del IGAC y DEM por VERTEX NASA.

Según Maya *et al.* (2018) las variaciones composicionales de los cuerpos que constituyen la Sienita Nefelínica se deben a procesos de contaminación cortical asociados a los intrusivos de diferente temporalidad ocurridos.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

La Formación San José de edad Paleozoica (Trumpy, 1945; Gansser, 1954; Hubach, 1955; Vesga y Castillo, 1972) a Cretácica (Paba & Van Der Hammen, 1958; Arango *et al.*, 2011), suprayace la Sienita Nefelínica de San José e infrayace en discordancia angular la Formación Caja. En trabajos iniciales había sido subdividida en dos miembros (Vesga y Castillo, 1972) sin embargo una nueva caracterización, incluye de base a techo: Miembro Basal Ciudad de Piedra, Miembro Caño El Retiro, Miembro los Túneles y Miembro superior (Arango *et al.*, 2011), siendo de especial interés el Miembro basal Ciudad de Piedra, al estar en contacto con la SNSJG. Esta litología se caracteriza por presentar intercalación de capas delgadas a gruesas de cuarzo arenita de grano medio a grueso hasta conglomerática, depositadas en ambientes de plataforma somera a supralitoral (Arango *et al.*, 2011).

La formación Caja de edad Miocena (Galvis *et al.*, 1979; Bayona, 2008) a Neógena (Patarroyo, 1990) se encuentra en contacto inconforme con la Sienita Nefelínica y suprayaciendo en discordancia angular a la Formación San José, en el sur de la plancha 350 y el noreste de la plancha 372, mostrando relieves ondulados. Está constituida por lodolitas-arcillolitas, areniscas lodosas, areniscas negras y algunas áreas con ferricretas (Maya *et al.*, 2018), en donde los niveles de lodolitas-arcillolitas son los de mayor interés al estar en contacto directo con la SNSJG, en esta localidad se observan intercalaciones de capas delgadas discontinuas de arcillas plásticas con colores que varían de blanco a gris, mostrándose moteadas y abigarradas (Arango *et al.*, 2011).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

5.2 Geología estructural

De acuerdo con Maya *et al* 2018, en el área de estudio se puede identificar un estilo estructural asociado con fallamiento normal, producto de dos fases de rifting durante el Proterozoico y Mesozoico, respectivamente. El proceso de rifting a finales del Neoproterozoico, explica el origen anorogénico de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare y la presencia de esfuerzos extensivos que afectaron a las rocas del basamento. (García-González *et al.*, 2013; Maya *et al.*, 2018). Pese a estos esfuerzos, el área de interés no presenta estructuras geológicas que demuestren actividad tectónica reciente (Maya *et al.*, 2018), debido a que no hay evidencia de que la exhumación de cuerpos haya afectado estructuralmente la zona. Así mismo, algunos autores consideran que un conjunto de rift formados a finales del Precámbrico (900 Ma) permitió la formación de depocentros limitados por fallas sin expresión superficial (García-González *et al.*, 2013).

Por su parte Martin (1972) establece que la parte noroccidental del cratón está caracterizada por la presencia de valles tipo rift producto de zonas de cizallamiento generadas durante el evento transamazónico y nickeriense conocidas como: Takutu hacia el ENE y Casiquiare, Suapure-Mavaca, Ventuari-Labarejuri y Apaporis en dirección NW.

En los cuerpos ígneos que se encuentran ubicados en dirección sur occidente del Municipio de San José del Guaviare, se evidencian dos lineamientos con tendencia NW-SE, los cuales rodean los cuerpos de Cerrito y Capricho y podrían corresponder a fallas a profundidad que afectan a la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, sin embargo, no se han encontrado pruebas en campo que puedan definir la existencia de este fallamiento (Arango *et al.*, 2011;

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Maya *et al.*, 2018). De acuerdo con estudios previos realizados por Galvis *et al.* (1979) y Boorder (1980); el lineamiento NW es concordante con el lineamiento regional de Carurú, cuya estructura está relacionada con un magmatismo híper-alkalino (Maya *et al.*, 2018).

6 RESULTADOS

6.1 Petrografía

6.1.1.1 Petrografía *macroscópica*

A nivel macroscópico las muestras corresponden a rocas ígneas leucocráticas principalmente de coloración crema con algunas zonas en tonalidades grises y rosa claro debido a la presencia de feldespato alcalino, junto con otras zonas de tonalidades oscuras por la concentración de minerales máficos. En las muestras correspondientes a LL-001, LL-002, LL-003 y LL-005 se observan características de roca holocristalina, fanerítica de grano medio a grueso con textura hipidiomórfica inequiangular, y tamaños de grano que varían de fino a grueso.

En términos generales se encuentran compuestas por feldespato alcalino (microclina), plagioclasa, nefelina, biotita, magnetita-ilmenita, pirocloro, zircón (**Figura 3. A, B**), y fluorita. Algunas de las muestras, presentan orientación mineral local de los minerales máficos, posiblemente por las texturas heredadas de rocas metamórficas o la cristalización lenta que sufrió el sistema.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Algunas de las muestras de mano, presentan tamaño de grano muy grueso, alcanzando textura pegmatítica, con características holocristalina e hipidiomórfica granular con cristales idiomorfos de feldespato alcalino y, biotitas de hasta 2 cm, junto con minerales accesorios de gran tamaño como magnetita y zircón en formas subidiomórficas; estos tamaños indican un largo periodo de cristalización. (**Figura 4B**). Además de las anteriores características, la muestra LL-004 presenta una textura fanerítica de grano fino, equigranular con un índice de color mesocrático debido a la acumulación de minerales máficos hacia ciertas zonas (**Figura 4A**).

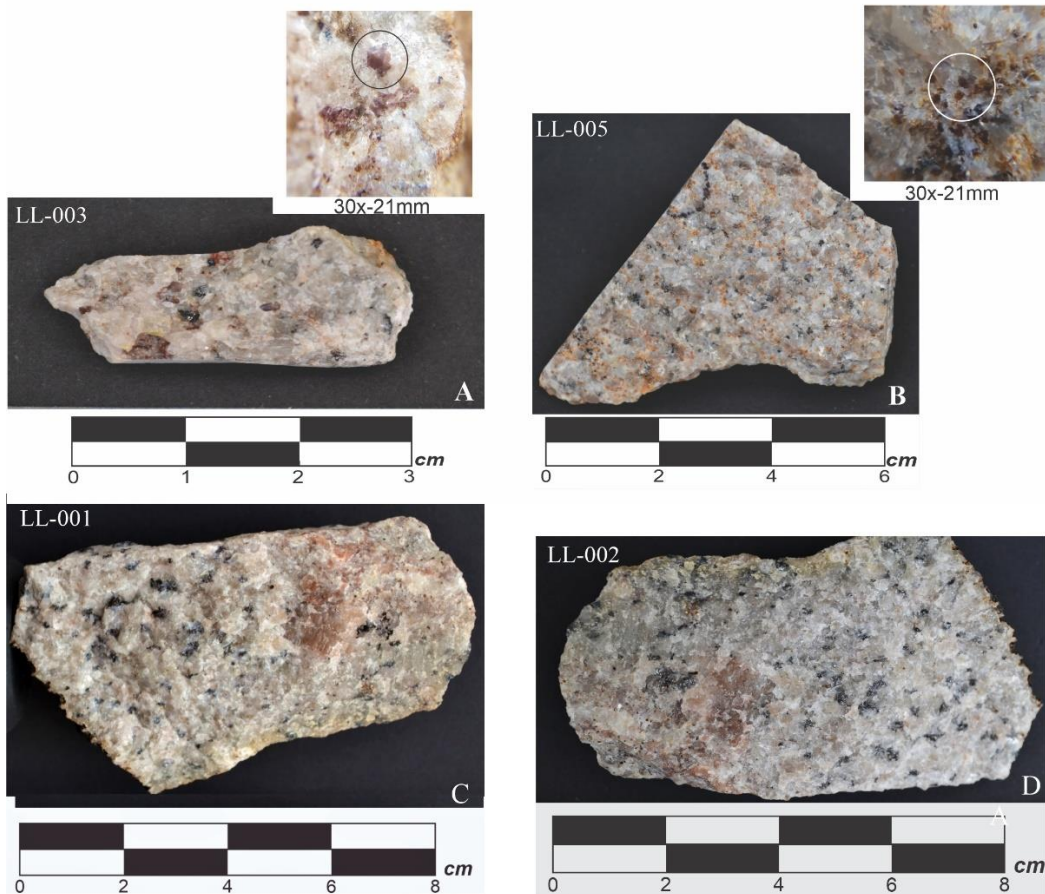


Figura 3 Macrofotografías de las muestras LL-003 - LL-005. A. Aspecto de una muestra de mano de Sienita Nefelínica donde se observan fenocristales de zircón en tonalidades pardo-rojizas. B. Aspecto de una muestra de sienita nefelínica en la cual se observan pirocloros como agregados de coloración caramelo. Macrofotografía de las muestras LL-002 - LL-001. C-D. Aspecto de muestra de mano de la Sienita Nefelínica, donde se observan fenocristales de microclina en tonalidades rosa crema, nefelina y opacos.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

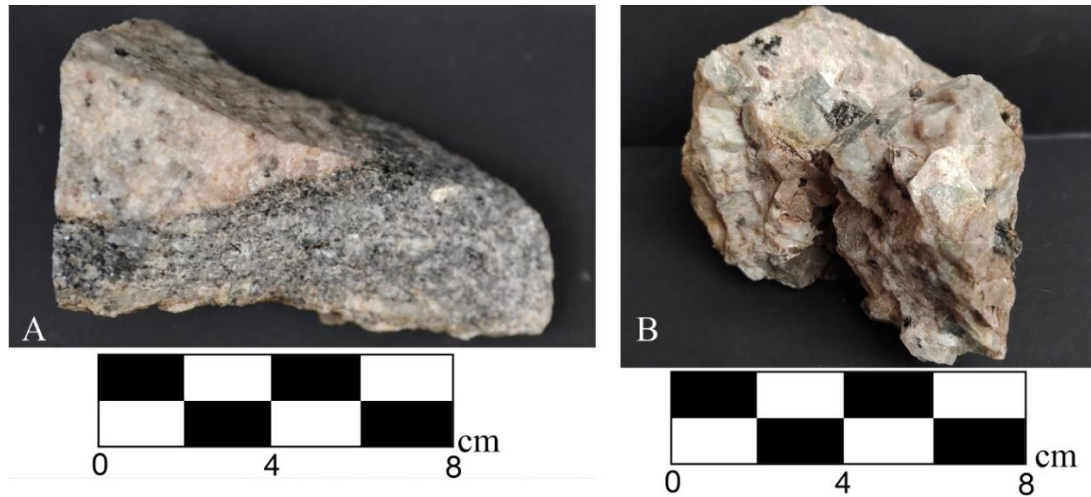


Figura 4 Macrofotografías de la muestra LL-004-LL003. A. Aspecto de muestra de mano de la sienita nefelínica, donde se observa cambio de coloración por alteración y concentración de minerales máficos. B. Aspecto de muestra de la sienita nefelínica con textura tipo pegmatítica.

6.2 Microscopía óptica

Las secciones analizadas corresponden a sienita nefelínica (**Figura 5**) holocristalina, con variaciones en su tamaño de grano de medio a grueso. Presenta una textura general hipidiomórfica inequigranular además del desarrollo de texturas peritéticas producto de la desmezcla de plagioclasa en cristales de microclina.

Los cristales corresponden principalmente a microclina, nefelina y plagioclasa como minerales primarios, junto con biotita, pirocloros y opacos como minerales secundarios. Además, como fases accesorio se encuentra zircón, fluorita, titanita, apatito, calcita, junto con cancrinita y minerales arcillosos como productos de alteración de cristales de nefelina y feldespatos. (**Tabla 1**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

El feldespató alcalino (microclina) de hábito subhedral a anhedral, se encuentra en un rango de 48% a 68% en las secciones analizadas, con una variación de tamaño entre 0.25 a 5 mm. Se evidencia maclado tipo Carlsbad y de enrejado al igual que el desarrollo de texturas perfiticas debido a la exsolución de lamelas de plagioclasa dentro de la microclina (**Figura 6F**). Los cristales de nefelina se presentan entre un 20% a 42%, en su mayoría anhedrales con una variación de tamaño entre 0.12 a 4.0 mm. Los cristales son incoloros y presentan bajo relieve (**Figura 6A y 6B**). Gran parte de los fenocristales cuentan con un aspecto sucio producto de sericitación; además de tonalidades verdes a naranjas hacia los bordes debido a la alteración a cancrinita y su intercrecimiento gráfico. Contienen microinclusiones de opacos, fluorita, feldespató y biotitas. Las plagioclasas son de tipo albita a andesina, subhedrales, en una proporción del 3% al 7.3% en las secciones, su tamaño vario de 0.4 a 1.5 mm y presenta maclado tipo albita, polisintético.

Tabla 1 Composición mineralógica de las muestras de roca estudiadas.

Muestra	Mc	Nef	Pl	Pcl	Zrn	Bt	Op
LL-001	49.2	42.3	4.17	1.0	-	1.0	2.83
LL-002	61.9	22.3	6.63	<1	1.29	3.40	2.27
LL-003	68.3	20	3.0	1.25	2.5	<1	1.25
LL-004	49.5	34	3.58	-	2.06	7.93	2.93
LL-005-A	55.1	30.2	4.13	5.58	<1	<1	3.51
LL-005-B	52.4	28.1	7.26	6.29	-	<1	1.94

Fuente: Autores.

Abreviaciones: Pl-Plagioclasa, Ne-Nefelina, Zrn-Zircon, Pcl-Pirocloro, Arf-Arfvedsonita, Bt-Biotita, Tnt- Titanita, Mag-Magnetita, Ilm-Ilmenita.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

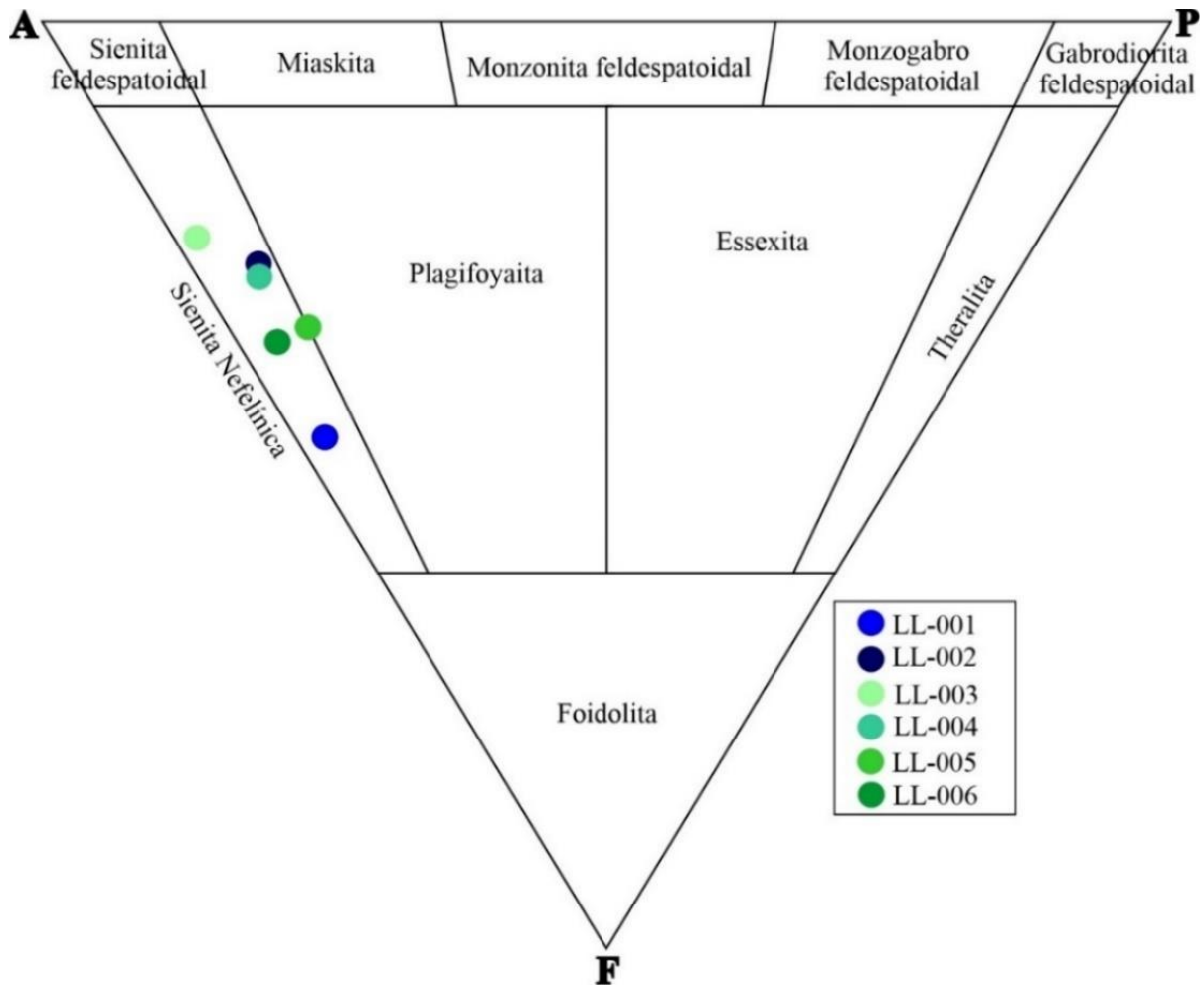


Figura 5 Diagrama de clasificación modal (Streckeisen, 1976) de las muestras de Sienita Nefelínica de San José del Guaviare

Respecto a los minerales máficos, el más representativo corresponde a biotita, que se presenta como cristales de hábito tabular, subhedrales a euhedrales en una proporción que va desde menos del 1% hasta 7.9%. Su tamaño varía desde 0.1 hasta 2.5 mm, presentando pleocroísmo marrón amarillento a verde con una dirección de exfoliación identificable. La biotita se encuentra nucleando en óxidos de hierro (magnetita- ilmenita) (**Figura 8E**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

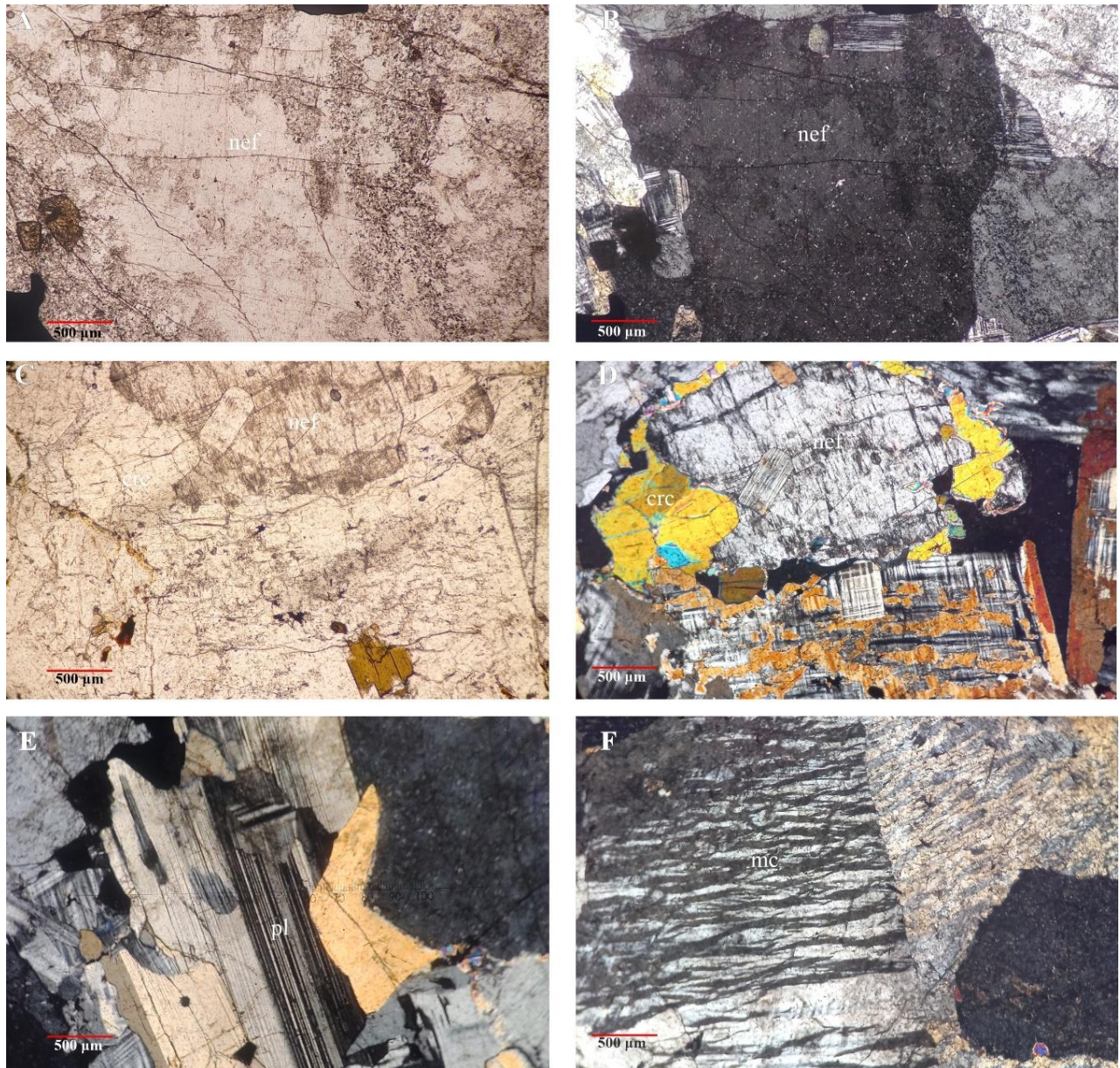


Figura 6 Fotomicrografías de las muestras LL-005(A), LL-002. A-B. Sección LL-005 Fenocristal de nefelina en nicoles paralelos y cruzados, donde se evidencia microfracturas además de sericitación. C-D. Sección LL-002. Glomerocristales de nefelina con corona de cancrinita. E. Sección LL-005. Cristal de plagioclasa en nicoles cruzados con macla de albita. F. Sección LL-002. Fenocristal de microclina que desarrolla textura perthítica. Abreviaciones: nef- Nefelina, mcl- microclina, crc- cancrinita, pl- plagioclasa, N// - nicoles paralelos, Nx- Nicoles cruzados.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Los pirocloros, presentes en todas las secciones a excepción de la muestra LL-004, están en una proporción entre 1% a 6.29%, los cristales euhedrales a subhedrales, marrones y de muy alto relieve presentan un tamaño que varía entre 0.1 mm a 1 mm, cuentan con un hábito prismático y algunas fracturas asociadas que se extienden de manera radial hacia los cristales circundantes, algunos cristales presentan texturas de corrosión a manera de embahiamientos (**Figura 8C y 8D**).

La cantidad de minerales accesorios varía desde valores menores a 0.1% hasta 2.5%, representado por cristales subhedrales a anhedrales de zircón, los cuales presentan fracturamiento e inclusiones de opacos, feldespatos, y pirocloros (**Figura 9C**), algunos de los cristales presentan zonaciones; además cristales de titanita con tamaños que van de 0.1 mm a 1 mm, asociada con biotita; se encuentran también apatitos incoloros automorfos, alargados o en algunos casos redondeados con colores de interferencia grises asociados con microclina y con tamaños menores a 0.6 mm, estos cristales se distinguen por su alto índice de refracción. Los cristales anhedrales de calcita se encuentran en tamaños de 0.095 a 0.34 mm entre los intersticios de nefelina, cancrinita y microclina.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Adicionalmente, se evidencian opacos los cuales corresponden a magnetita/ilmenita, presentándose isotrópicos, algunos con tonalidades rojizas hacia los bordes, sus formas son irregulares y se encuentran relacionados con biotitas, pirocloros y nefelinas, donde sus tamaños varían entre 0.06 a 1 mm. Por medio de SEM y microscopia de luz reflejada se definió la asociación magnetita ilmenita de los cristales opacos, observándose de color gris con parches más oscuros sobre ellos (**Figura 7**).

Por su parte, la fluorita con coloraciones incoloras con tonalidad levemente violeta, sin pleocroísmo y tamaños menores a 3 mm, asociada principalmente con nefelina, se encuentra rellenando fracturas y siguiendo cierta orientación. Los cristales de mayor tamaño se encuentran asociados a pirocloros y con las fracturas que estos generan. Adicionalmente, se presentan pequeños cristales aciculares alargados, con tonalidades verde oscuro, a manera de inclusiones dentro de cristales de nefelina y feldespatos. Debido a las pocas características reconocibles, su identificación se realizará en apartados posteriores.

La cancrinita se presenta en una proporción menor al 3%, como agregados incoloros de relieve medio y bajo índice de refracción con birrefringencia en tonalidades naranja, azul y verde de segundo orden a manera de coronas de reacción e intercrecimientos gráficos asociados con la nefelina (**Figura 6D y 8D**). En algunas secciones, la alteración de feldespatos se presenta como arcillas y carbonatos, con tonalidades incoloras o marrones, alcanzando tamaños de 1 mm.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

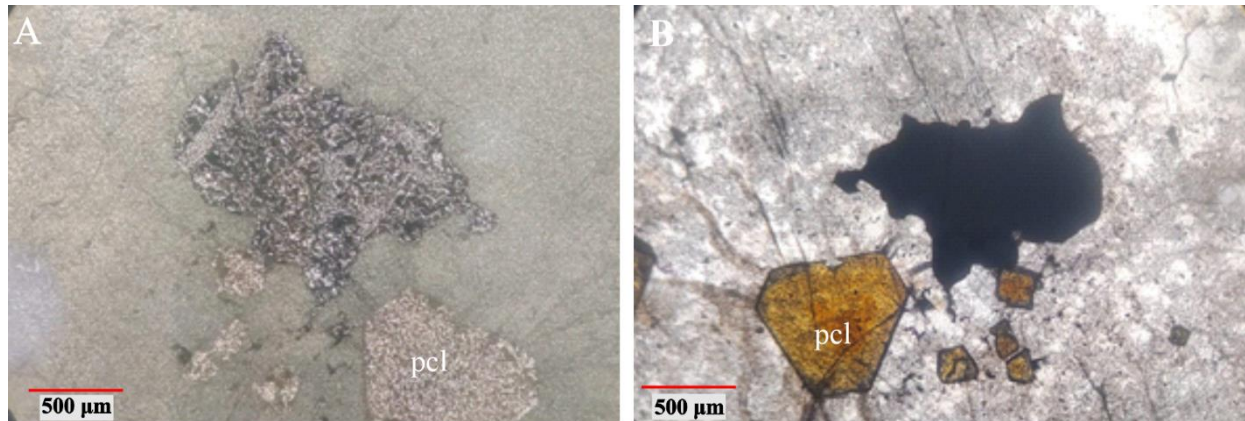


Figura 7 Muestra LL-005 A. Cristal de magnetita-ilmenita en luz reflejada y transmitida respectivamente.

La asociación mineralógica, es propia de rocas alcalinas, donde los porcentajes de microclina, feldespatoideos (nefelina) y plagioclasa clasifican a las secciones en sienita nefelínica. A continuación, se denotan algunas de las características específicas por cada muestra, las cuales están enfocadas principalmente en los minerales accesorios como pirocloro y zircón:

LL-001

En esta muestra no se evidenciaron zircones, pero si cristales de pirocloro de tamaño fino a medio (Winter, 2001), los cuales no presentaban fracturas radiales y su disposición en la sección no evidenciaba aglomeraciones; se encuentran en contacto con cristales de nefelina y microclina. No se evidencia mayor cantidad de minerales de alteración como en otras muestras, pero si venillas de cancrinita hacia los bordes de la nefelina.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

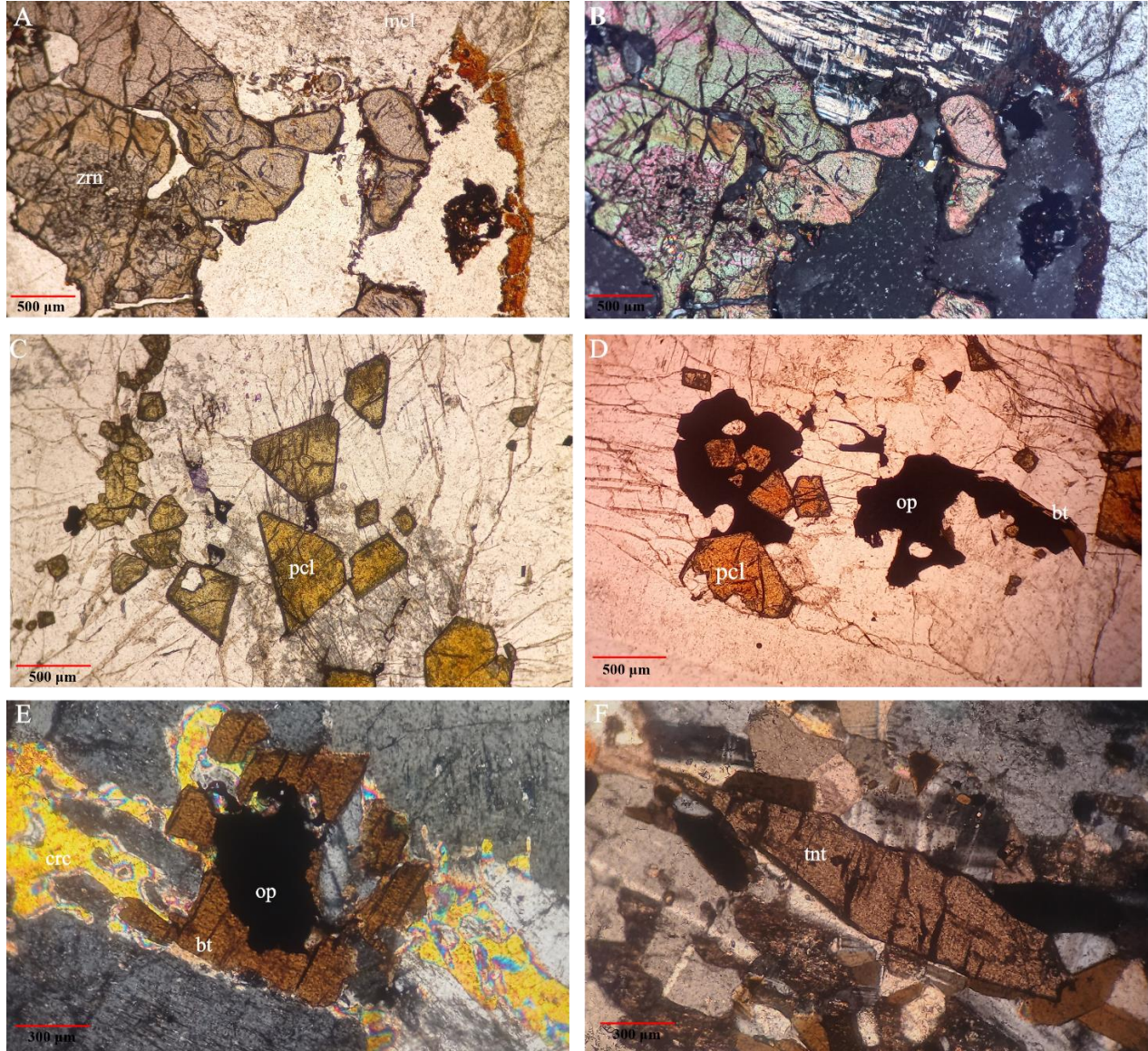


Figura 8 Microfotografías de las muestras LL-005 (A-B), LL-004 y LL-002. A-B. Sección LL-002, en N//, NX. Fenocristales de zircón con embainamiento en contacto con fenocristal de microclina. C-D. Sección LL-005 B, donde se evidencian fenocristales de pirocloro y el fracturamiento radial asociado. D. Relación de opacos (magnetita-ilmenita) con cristal de pirocloro. E. Sección LL-005 A, Fenocristal de biotita nucleando en opacos, relacionado con cristal de nefelina alterando en los bordes a cancrinita. F. Sección LL-004, fenocristal de titanita en contacto con biotita y nefelina, en NX. Abreviaciones: Zrn- zircón, mcl- microclina, pcl- pirocloro, bt- biotita, op-opaco, tnt- titanita. N// - nicoles paralelos, Nx- Nicoles cruzados.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

LL-002

En esta muestra, se evidencian fenocristales de zircón, los cuales presentan fracturamiento hacia el borde inferior de la sección y están asociados con opacos y óxidos, además se encuentran algunos zircons oxidados sin pleocroísmo y forma redondeada. Igualmente, se observan cristales de nefelina, algunos afectados por la alteración deutérica, los cuales contienen inclusiones y cancrinita y sericita que rellenan las fracturas, observándose también coronas de reacción de cancrinita alrededor de estos. La desmezcla de feldespatos a manera de texturas de hipersolvus y pertitas, se encuentra en gran parte de la sección, y en algunas ocasiones asociados con cristales de fluorita y apatito como microinclusiones.

LL-003

En esta muestra se puede observar cristales de zircón de tamaño fino a medio (Winter, 2001) predominantes en toda la extensión. Los cristales presentan altos relieves, pero no tanto como suelen observarse, además presentan colores de interferencia que van desde el segundo orden, más fuertes a como suelen presentarse.

A comparación de otras muestras estudiadas la presencia de pirocloros es mucho más reducida y las fracturas que se desprenden de ellos también tienen una extensión menor. Los cristales de pirocloro tienen tonalidades marrones a rojizas y en algunos individuos las variaciones de tonalidad se asemejan a zonación.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

LL-004

En la presente sección se pueden observar minerales de alteración en mayor proporción, los cuales están dispuestos como arcillas (sericita y caolín) y cancrinita, producto de la alteración deutérica de nefelina y feldespatos. Fue posible identificar cristales de calcita entre los intersticios de nefelina y cancrinita, la cual aportó calcio al sistema permitiendo la formación de cancrinita como mineral de alteración. La muestra no presenta pirocloros, pero sí microcristales de zircón sin fracturamiento, relacionados con cristales de microclina y nefelina. Algunos individuos de biotita se encuentran cloritizando, presentando colores de interferencia de primer orden anómalos.

LL-005 A-B

Se analizaron dos secciones delgadas, de aspectos similares entre ellas. A diferencia de la sección LL-005 B, la sección LL-005 A, presenta cristales de zircones en cercanías a los pirocloros. En las muestras LL-005 A-B se puede observar predominancia de cristales de pirocloro con relieve alto a muy alto y algunas variaciones en su coloración donde algunos se presentan marrón oscuro, rojizo a amarillento. Este mineral se presenta como agregados de cristales de tamaño medio, algunos de ellos aislados. Se evidencia abundancia de fracturas ocasionadas por el decaimiento radiactivo en el mineral, las cuales se disponen de manera radial alrededor de ellos y afectan los cristales de nefelina y microclina que predominan en la sección. Algunos cristales, presentan embahiamientos como texturas de disolución, además de cierta alineación por parte de los pirocloros. Igualmente, se evidencian minerales opacos (ilmenita-magnetita), nucleando en cristales de biotita, indicando una hidratación tardía del sistema magmático.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

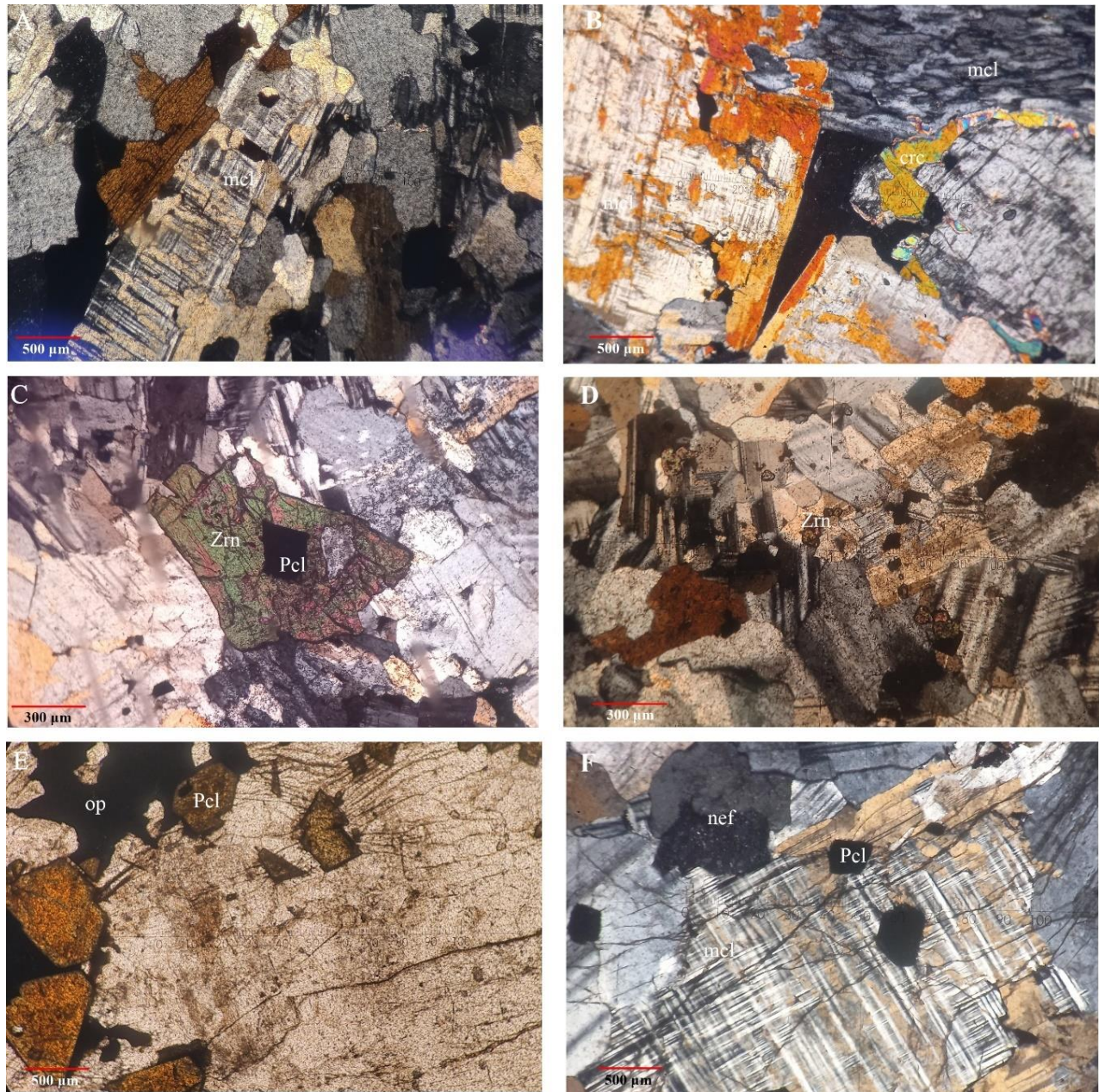


Figura 9 Microfotografías de las secciones analizadas. A. Sección LL- 001, cristal de microclina con desarrollo de perfitas, ligeramente amarillas por el grosor de la sección. B. Sección LL-002. Desmezcla de albita en cristales de microclina, además se observa corona de reacción de cancrinita alrededor de nefelina. C. Sección LL-003. Cristal de zircón con microinclusiones de pirocloro y microclina. D. Sección LL-004. Microcristales de zircons diseminados en cristales de nefelina, plagioclasa y microclina. E-F. Secciones LL-005 A-B, respectivamente. Cristales de pirocloro con fracturamiento radial asociado. Abreviaciones: Zrn- zircón, mcl- microclina, pcl- pirocloro, bt- biotita, op-opaco, tnt- titanita. N// - nicoles paralelos, Nx- Nicles cruzados.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

6.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron análisis por medio de Microscopía electrónica de barrido en tres muestras correspondientes a: LL-005-B, LL-004 y LL-002. Estas muestras se seleccionaron una vez realizado el trabajo petrográfico, en el cual el cual no fue posible identificar algunos de los cristales con claridad. Igualmente, este análisis, permitió proveer más información con respecto a la composición elemental cualitativa de los Pirocloros y Zircones, como elementos de interés económico.

6.3.1 Muestra LL-005-B

PIROCLOROS

En estos resultados se encuentran valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para el Nb, que correlacionado con O y Ca permiten atribuirles la distribución elemental a los cristales de Pirocloro que han sido previamente identificados y caracterizados por medio de análisis petrográfico (**Figura 10**). Es importante mencionar también la presencia de U y Ta dentro de la composición elemental del mineral, ya que es este el que contiene la mineralización característica de la zona (Ver **Tabla 2**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Tabla 2 Tabla de Wt% y At% para Pirocloro para la sección LL-005-B el diagrama elemental. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-005-B -1		LL-005-B -3		LL-005-B -7		LL-005-B -11	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
NbL	42.71	14.23	41.70	14.16	41.06	19.94	40.28	13.59
OK	17.25	33.37	16.42	32.37	16.98	31.07	16.67	32.67
CK	11.10	28.72	11.98	31.46	13.79	33.62	13.70	35.75
CaK	12.33	9.53	11.72	9.23	11.97	8.75	10.28	8.04
NaK	4.87	6.56	5.07	6.96	4.95	6.31	1.89	2.57
UM	3.41	0.44	3.45	0.46	3.12	0.38	4.73	0.62
TaL	3.73	0.64	1.89	0.33	3.48	0.56	4.08	0.71
SiK	1.58	1.74	1.17	1.31	1.61	1.67	2.32	2.59
FeL	-		6.59	3.72	-	-	5.80	3.26
FK	2.96	4.83	-	-	3.04	4.69	-	-
KK	0.04	0.03	-	-	-	-	0.26	-
Matriz	Correction ZAF							

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

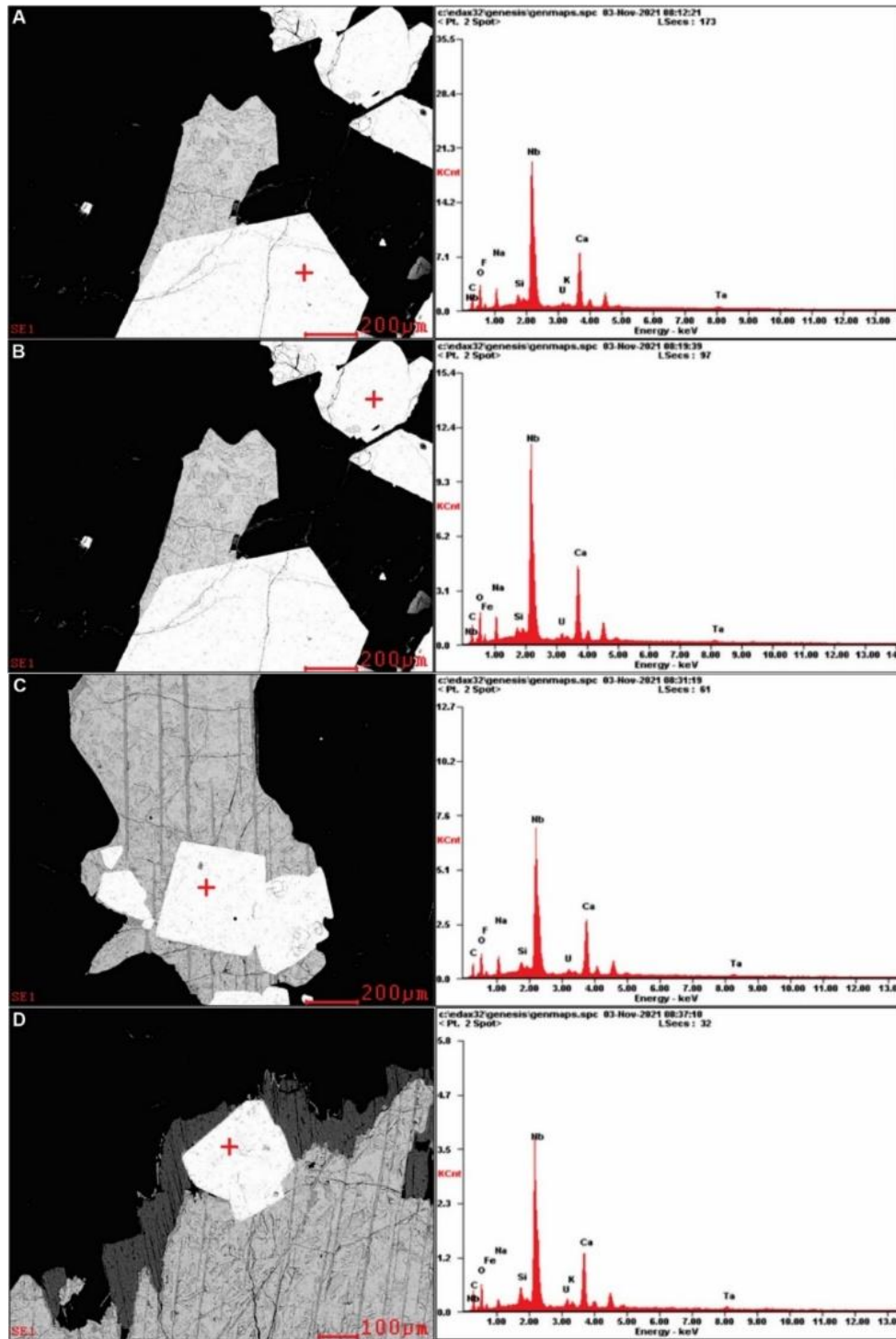


Figura 10 Cristales de Pirocloro y diagrama de elementos. A) LL-005-B -1 B) LL-005-B -3 C) LL-005-B -7 D) LL-005-B -11. Microscopía electrónica de barrido-UIS.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

MAGNETITA-ILMENTITA

Esta asociación elemental representada principalmente por el alto porcentaje en peso (Wt%) de Fe y O permite asociarlo a cristales de Magnetita (Ver **Tabla 3**), que previamente había sido identificada en análisis macroscópico gracias a sus propiedades magnéticas. Además, algunos cristales presentan lamelas de exsolución posiblemente de ilmenita, que, aunque no se identificaron en base a su composición, son una asociación mineral característica de estos sistemas magmáticos (Ver **Figura 11**).

Tabla 3 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de magnetita-ilmenita para la sección LL-005-B. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-005-B -2		LL-005-B -6		LL-005-B -10	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
FeK	74.16	43.43	71.51	39.37	64.12	32.36
OK	16.11	32.92	19.27	37.03	21.38	37.67
CK	1.89	2.30	9.22	23.60	11.38	26.70
AlK	12.33	9.53	-	-	3.13	3.27
Matrix	Correction ZAF					

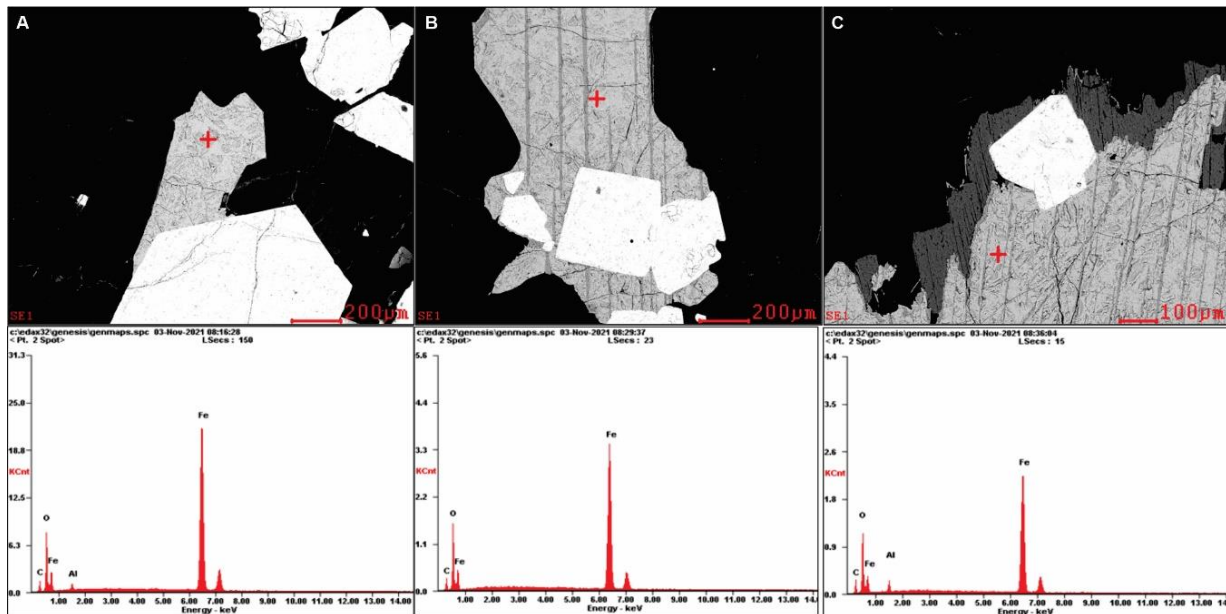


Figura 11 Cristales de Óxidos y diagramas de elementos A) LL-005-B-2 B) LL-005-B-6 C) LL-005-B-10.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

BIOTITA

Teniendo en cuenta la asociación de Fe, O, Si y Ca como los elementos de mayor proporción y considerando la nucleación del cristal a partir de minerales opacos, ya previamente identificado en el análisis petrográfico, se correlaciona la composición elemental con cristales de biotita. Además, la presencia de Al, K, Mn, Zn, Mg y Na en menor proporción respaldan también la identificación mineral (Ver **Tabla 4** y **Figura 12**).

Tabla 4 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Biotita para la sección LL-005-B. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-005-B -9	
	Wt%	At%
FeK	26.08	10.97
OK	22.71	33.35
SiK	16.95	14.18
CK	13.89	27.17
AlK	8.95	7.80
KK	7.59	4.56
MnK	1.64	0.70
ZnK	1.43	0.52
MgK	0.49	0.47
NaK	0.28	0.28
Matrix	Correction ZAF	

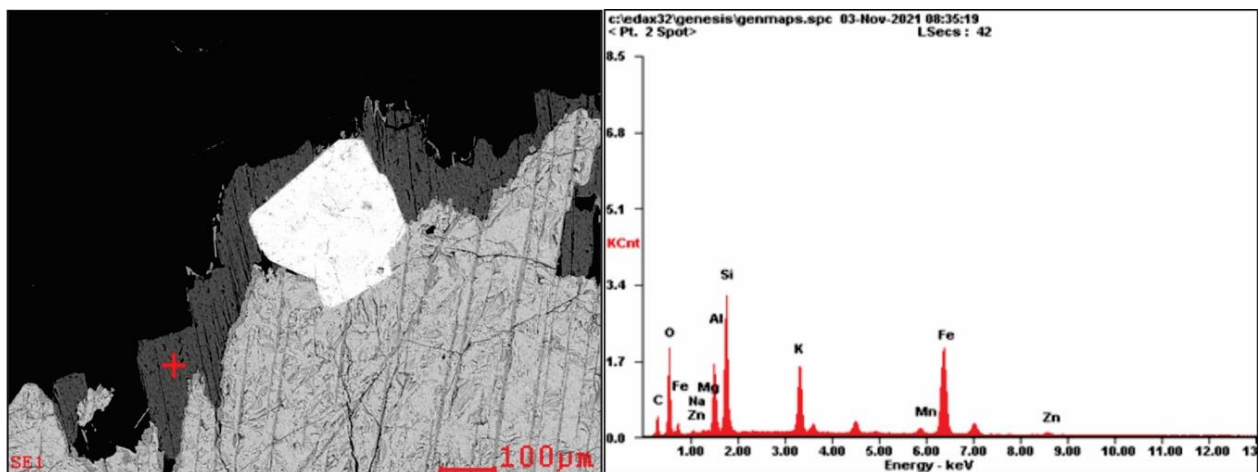


Figura 12 Cristales de Biotita y diagramas de elementos (LL-005-B-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

6.3.2 Muestra LL-004

BIOTITA

Considerando la asociación principal entre Fe, O y Si, junto con los contenidos menores de Al, K, Mg y Mn se correlaciona a Biotita, esta determinación se asocia a la morfología observada y los análisis previamente realizados (Ver **Tabla 5** y **Figura 13**).

Tabla 5 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Biotita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-1	
	Wt%	At%
FeK	23.31	9.22
OK	21.87	30.21
SiK	16.25	12.79
CK	18.36	33.79
AlK	8.11	6.65
KK	7.83	4.43
MgK	2.36	2.15
MnK	1.91	0.77
Matrix	Correction ZAF	

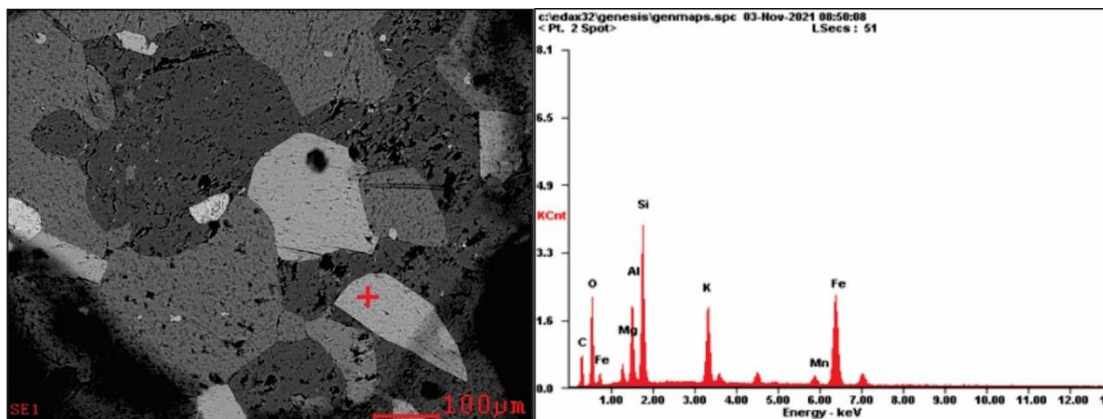


Figura 13 Cristales de biotita y diagrama de elementos (LL-004-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

CALCITA

En base a la asociación de Ca y O como elementos de mayor porcentaje en peso dentro del análisis, este mineral se correlaciona a Calcita con contenidos menores de Sr, lo cual es característico de su composición. (Ver **Tabla 6** y **Figura 14**).

Tabla 6 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Calcita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-2	
	Wt%	At%
CaK	47.21	25.60
OK	32.77	44.52
CK	15.88	28.74
SrL	2.52	0.62
MnK	0.88	0.35
MoL	0.74	0.17
Matrix	Correction ZAF	

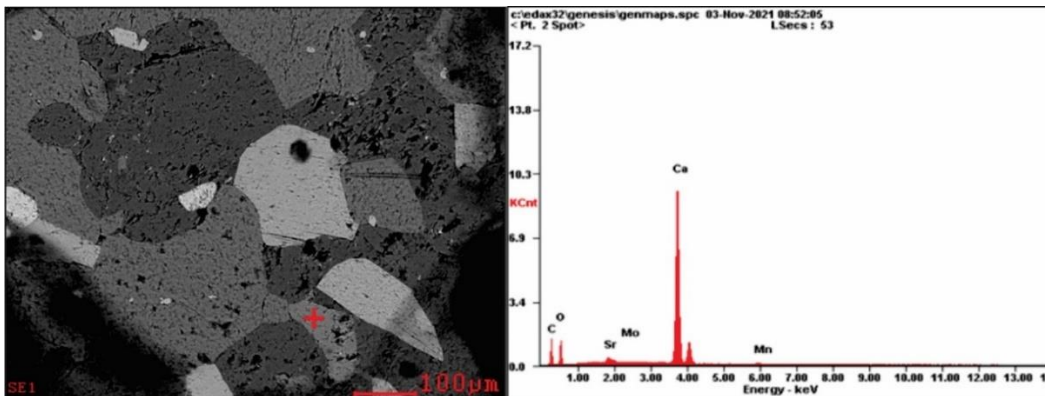


Figura 14 Cristales de calcita y diagrama de elementos (LL-004-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

CANCRINITA

La composición elemental compuesta principalmente por O, Si, Al, Na y Ca junto con el análisis mineralógico permiten asociarlo a cristales de Cancrinita. Este mineral se encuentra típicamente asociado con Calcita y Nefelina, como resultado de alteración. (Ver **Tabla 7** y **Figura 15**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Tabla 7 Tabla de Wa% y At% para el diagrama elemental de Cancrinita para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-5	
	Wt%	At%
OK	31.88	36.22
CK	21.96	33.24
SiK	17.70	11.46
AlK	14.47	9.75
NaK	8.76	6.93
CaK	4.60	2.09
KK	0.36	0.17
SK	0.26	0.15
Matrix	Correction ZAF	

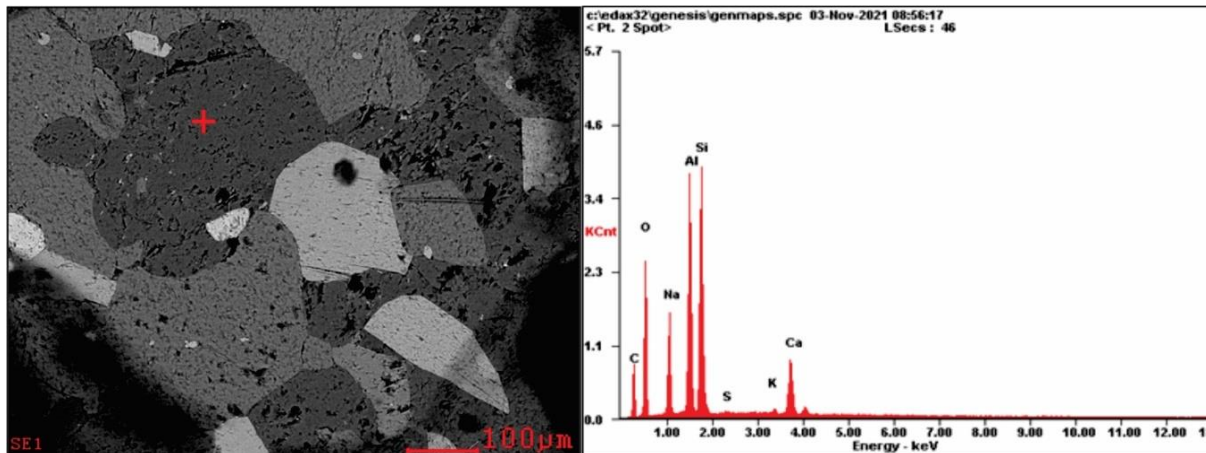


Figura 15 Cristales de Cancrinita y diagrama de elementos (LL-004-5). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

APATITO

Los resultados obtenidos permiten correlacionar la asociación de Ca, O, P y F a cristales de apatito. Además, es importante mencionar una proporción menor de Ce dentro de su composición química, que concuerda con el enriquecimiento de REE en este sistema magmático.

(Ver **Tabla 8** y **Figura 16**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Tabla 8 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Apatito para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-6	
	Wt%	At%
CaK	36.32	20.51
OK	20.72	29.32
PK	16.45	12.02
CK	16.07	30.28
FK	4.96	5.91
CeL	3.81	0.61
SiK	1.67	1.35
Matrix	Correction ZAF	

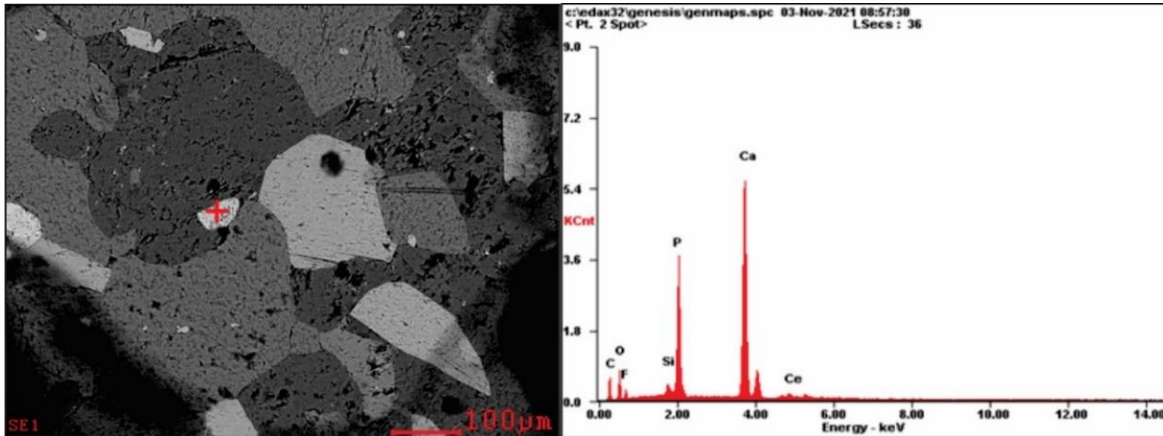


Figura 16 Cristal de Apatito y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

CALCITA

Los mayores porcentajes en peso (Wt%) correspondientes a Ca y O permiten correlacionar la composición química a Calcita, sin embargo, comparado con los resultados de otras mediciones, esta muestra un ligero enriquecimiento en Os (Ver **Tabla 9** y **Figura 17**).

Tabla 9 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Calcita, para la sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-7	
	Wt%	At%
CaK	53.86	30.07

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

OK	29.19	40.82
CK	15.54	28.94
OsM	1.41	0.17
Matrix	Correction ZAF	

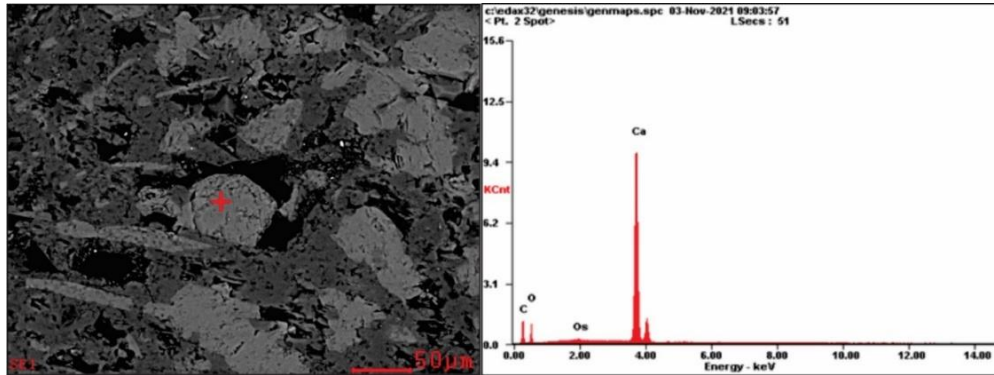


Figura 17 Cristal de Calcita y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

MAGNETITA

Debido a los altos contenidos de Fe y O este mineral se correlaciona con magnetita, sin embargo, a diferencia de otros cristales observados no evidencia lamelas de ilmenita (Ver **Tabla 10** y **Figura 18**).

Tabla 10 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de magnetita, sección LL-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	LL-004-9	
	Wt%	At%
FeK	63.97	31.21
OK	21.82	37.17
CK	13.74	31.16
SiK	0.47	0.46
Matrix	Correction ZAF	

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

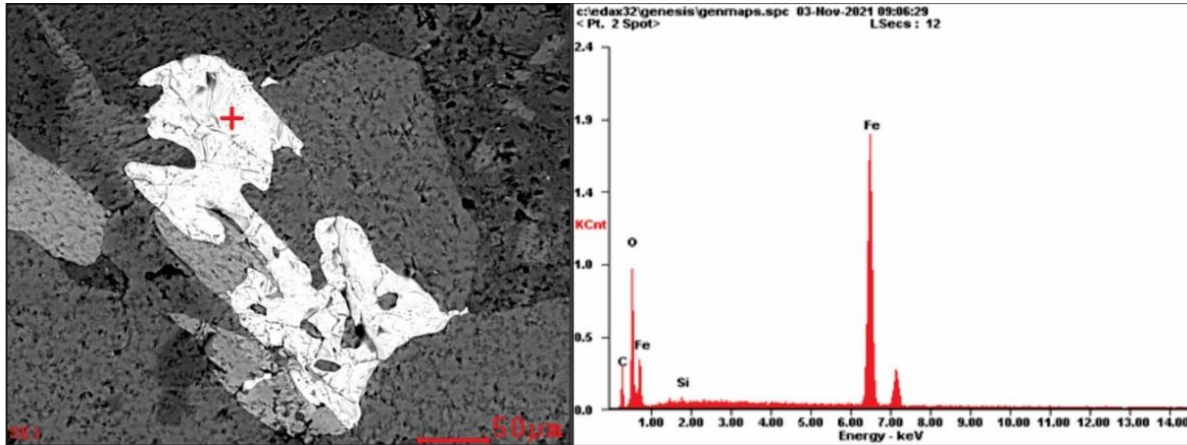


Figura 18 Cristales de óxidos y diagrama de elementos (LL-004-9). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

6.3.3 Muestra LL-002

ZIRCÓN

En esta muestra se observa además un mineral caracterizado por el alto contenido de Zr, Si, O, que respaldado con el análisis petrográfico se correlaciona a cristales de Zircón (Ver **Figura 19 y Tabla 11**).

Tabla 11 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Zircón para la muestra LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	Wt% At%	
	LL-002-1	
ZrK	45.52	13.52
OK	25.75	43.61
SiK	15.37	14.83
CK	11.69	26.37
AlK	1.67	1.68
Matrix	Correction ZAF	

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

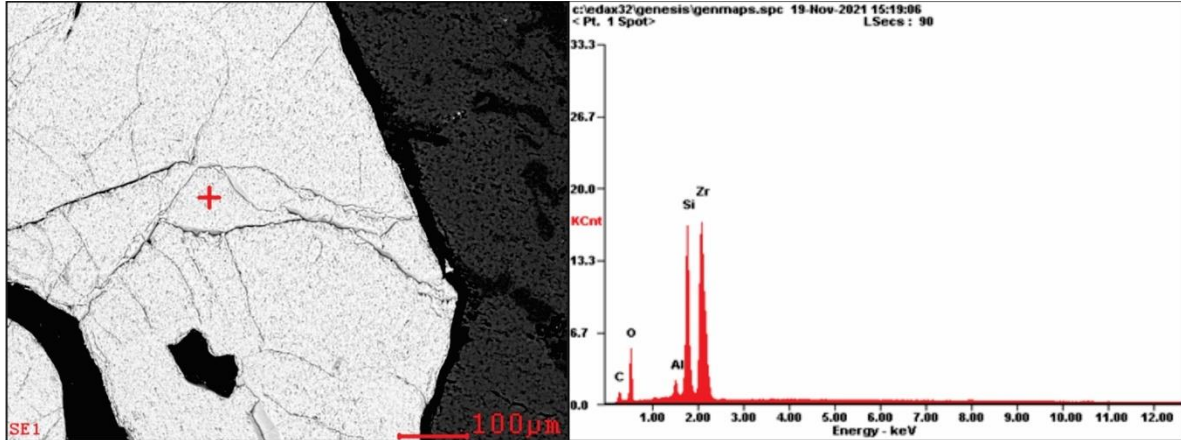


Figura 19 Cristales de Zircón y diagrama de elementos (LL-002-1). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

APATITO

Los elementos de mayor porcentaje en peso (Wt%) en la estructura mineral corresponden a Ca, O y P, por lo que podría correlacionarse con cristales de Apatito (Ver **Figura 17**). Además, el contenido de elementos de tierras raras como Ce, La, Sr, F y Na están relacionados a la facilidad del mineral para incorporar en su estructura REE y halógenos como los detectados (Ver **Tabla 12**).

Tabla 12 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de apatito sección LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	Wt%	At%
	LL-002-8	
CaK	29.84	18.37
OK	22.72	35.05
PK	17.61	14.03
CK	11.55	23.73
CeL	6.10	1.07
LaL	3.56	0.63
SrL	3.52	0.99
FK	2.89	3.75
NaK	2.21	2.37
Matrix	Correction ZAF	

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

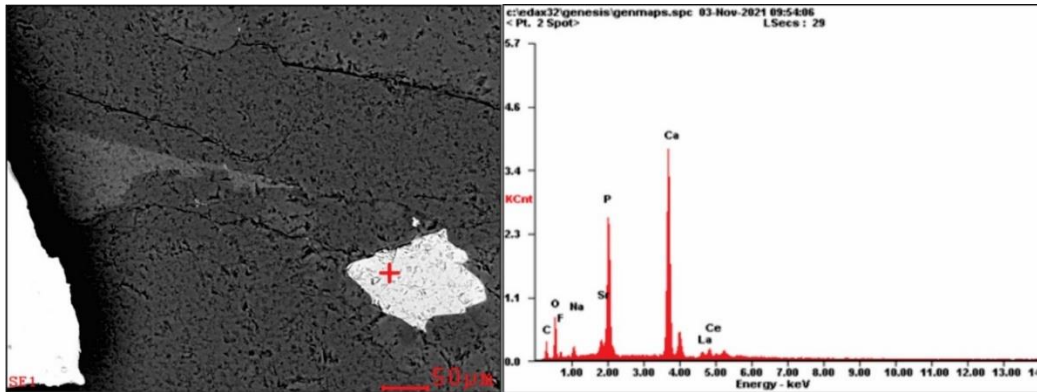


Figura 20 Cristales de Apatito y diagrama de elementos (LL-002-8). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

PERTITAS

Los resultados obtenidos muestran principalmente porcentajes en peso (Wt%) de Si, O y Al correspondientes a cristales de pertitas, en donde se pudo observar que las zonas más claras que están cubriendo la mayor superficie presentan un porcentaje importante de potasio, lo que permite correlacionarlo con microclina (Ver **Figura 18**). Por su parte las zonas más oscuras dispuestas a manera de láminas presentan contenido importante de Na, correlacionándose a exsoluciones de plagioclasa sódica (Ver **Tabla 13**).

Tabla 13 Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental pertitas en sección LL-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

Elemento	Wt%	At%	Wt%	At%
	LL-002-9		LL-002-10	
SiK	35.34	27.09	35.89	25.21
OK	29.32	39.45	34.26	42.26
AlK	11.10	8.86	11.60	8.48
CK	8.93	16	10.75	17.65
KK	14.84	8.17	0.16	0.08
NaK	0.46	0.43	7.35	6.31
Matrix	Correction ZAF		Correction ZAF	

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

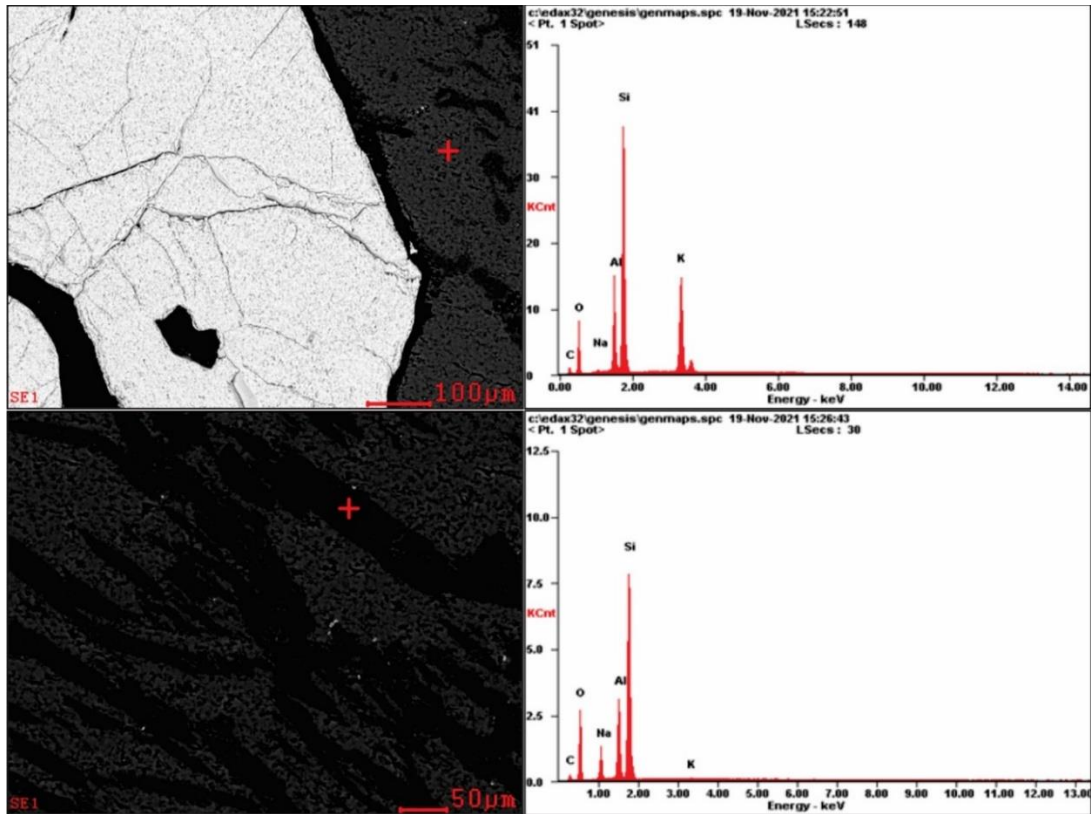


Figura 21 Cristales de perfitas, donde se observan láminas de exsolución de plagioclasa en feldespato potásico y diagrama de elementos (LL-002-9 y LL -002-10). Microscopía electrónica de barrido-UIS.

6.4 Petrografía de inclusiones

La petrografía de inclusiones buscó identificar, inclusiones vítreas y/o inclusiones fluidas para realizar con posterioridad estudios microtermométricos. Con el fin de establecer las diferencias e importancia de estos dos tipos de inclusiones, a continuación, se presenta un breve contexto de la información con el fin de dar un mejor entendimiento de su estudio.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Considerando las relaciones texturales entre las inclusiones vítreas como fluidas y el mineral hospedador se puede realizar una interpretación certera de las inclusiones con el fin de identificar características como temperatura, presión, densidad, composición del magma y/o fluido presente (Robbiano Muñoz, 2017; Roedder, 1984). Por esta razón, el estudio petrográfico representa el primero y uno de los pasos esenciales para el estudio de inclusiones (Van den Kerkhof, & Hein, 2001) que permitan obtener datos confiables de la formación del cuerpo de interés. El estudio petrográfico se realizó con detenimiento para garantizar la identificación de los mejores especímenes considerando sus principales tipos, mostrados en la **Tabla 14**:

Tabla 14 Clasificación de inclusiones según sus fases y origen (Roedder, 1984), Shepherd. Et al., 1985).

FASES (Shepherd <i>et al.</i> , 1985)		ORIGEN (Roedder, 1984)	
I	Líquido	Primaria	Generadas en la superficie mineral durante su crecimiento.
II	Líquido+Vapor		
III	Vapor+Líquido	Secundaria	En fracturas posteriores al crecimiento del cristal hospedador.
IV	Vapor		
V	Líquido+Vapor+Sólido	Pseudosecundaria	En fracturas formadas durante el crecimiento del cristal hospedador.
VI	Líquidos inmiscibles		

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

El estudio de inclusiones se centró en los cristales de nefelina, los cuales según el estudio paragénetico, cristalizó en la etapa inicial del granitoide y por tanto representa las características primarias del sistema. Con esto se busca establecer el fundido y/o fluidos que pudieron intervenir durante la cristalización de la roca y a su vez posibilitaron la mineralización presente.

En las muestras analizadas durante el estudio petrográfico no se lograron identificar inclusiones fluidas de relevancia, a excepción de algunas inclusiones tipo I acuosas monofásicas trans-granulares secundarias muy pequeñas, típicas de infiltración de agua meteórica del cuerpo en superficie (Ver **Figura 19**). Estos fluidos atrapados son representativos de etapas posteriores a la cristalización del cuerpo.

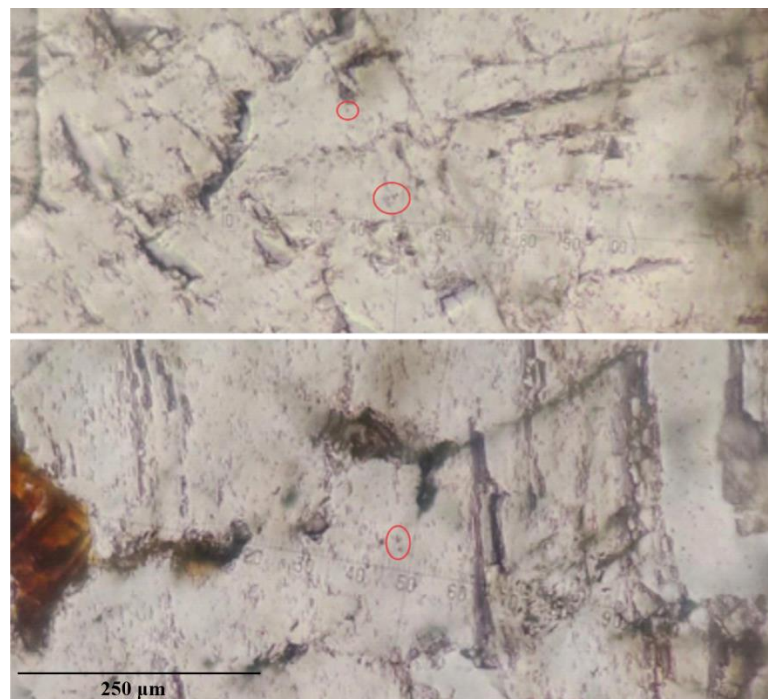


Figura 22 Microfotografía de las secciones LL-005 que muestra pequeñas inclusiones tipo I monofásicas acuosas.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

De esta manera se establece, que, para el objetivo de este estudio, el tipo de inclusiones y su tamaño, no resulta de gran utilidad para realizar estudios microtermométricos. Sin embargo, la poca densidad de inclusiones en el cuerpo si provee información relevante respecto a las características del sistema magmático, siendo analizadas a mayor detalle en apartados posteriores.

6.5 Difracción de rayos X (DRX)

Para la identificación cualitativa de fases minerales a mayor detalle, se realizó difracción de Rayos X sobre tres (3) muestras, correspondientes con: LL-004, LL-005 y LL-002.

Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 y PDF-4 2021 del *International Center for Diffraction Data* (ICDD), tratadas a través del software Diffrac.Eva. El programa contiene bases de datos con bibliografía e información de difracción y cristalografía, a partir de la cual, permite seleccionar al mineral más adecuado de acuerdo con las propiedades más comunes y estandarizadas a la firma espectral.

6.5.1 Muestra LL-004

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

De acuerdo con las firmas del difractograma, se reconocieron minerales como albita, microclina, calcita y cancrinita principalmente (Ver **Tabla 15**). Adicionalmente, se identificó analcima, la cual no había sido previamente reconocida en análisis petrográficos y de microscopía electrónica de barrido. Se evidenciaron algunas reflexiones de baja intensidad correspondientes con siderofilita y annita las cuales hacen parte de los agregados de micas (Ver **Figura 20**).

Tabla 15 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-004 marcada como 21338003 en el laboratorio de rayos X.

<i>Sistema</i>	Fase	Nombre	Nº PDF
<i>Triclínico</i>	NaAlSi ₃ O ₈	Albita	00-009-0466
<i>Triclínico</i>	K(AlSi ₃ O ₈)	Microclina	01-076-0918
<i>Romboédrico</i>	CaCO ₃	Calcita	01-078-4615
<i>Romboédrico</i>	NaO(AlSi ₂ O ₆) (H ₂ O)	Analcima	01-089-6324
<i>Hexagonal</i>	Na ₇ Ca(Si _{6.36} Al ₅ O ₂₄)CO ₃ (H ₂ O) ₂	Cancrinita	01-080-6033

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

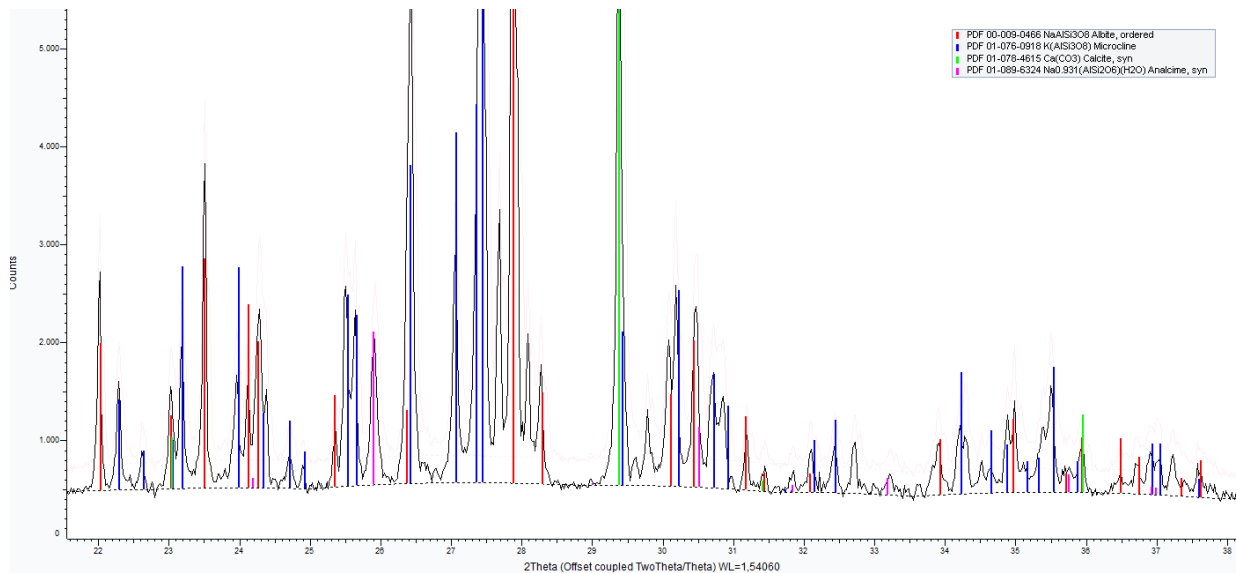


Figura 23 Difractograma de la muestra LL-004 con código interno 21338003 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.

6.5.2 Muestra LL-005

Según las firmas del difractograma, se reconocieron minerales como nefelina, albita, microclina, y pirocloro principalmente. Debido a la desmezcla entre microclina y albita, el comportamiento de estas es similar, tendiendo a tener solapamientos entre sus firmas (Ver **Figura 21**). Adicionalmente, se identificó un anfíbol tipo arfvedsonita, la cual no había sido claramente identificada en análisis petrográficos y de microscopía electrónica de barrido, sin embargo, su firma no era muy clara. (Ver **Tabla 16**).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Se evidenciaron algunas reflexiones de baja intensidad y solapamientos entre las firmas de analcima con minerales de nefelina, donde se selecciona esta última debido a su relación con el sistema y mayor intensidad de firma.

Tabla 16 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-005 marcada con código interno 21338001.

Sistema	Fase	Nombre	Nº PDF
Triclínico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albita	00-009-0466
Triclínico	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Microclina	01-084-0709
Hexagonal	$\text{KNa}_6(\text{AlSiO}_4)_8$	Nefelina	01-078-5176
Monoclínico	$\text{KO}_9(\text{Na}_8\text{CaO})_{19}\text{Mg}_3\text{FeO}_8$	Arfvedsonita	01-080-5287
Cubico	KO_8ZrO_6	Pirocloro	01-075-4715

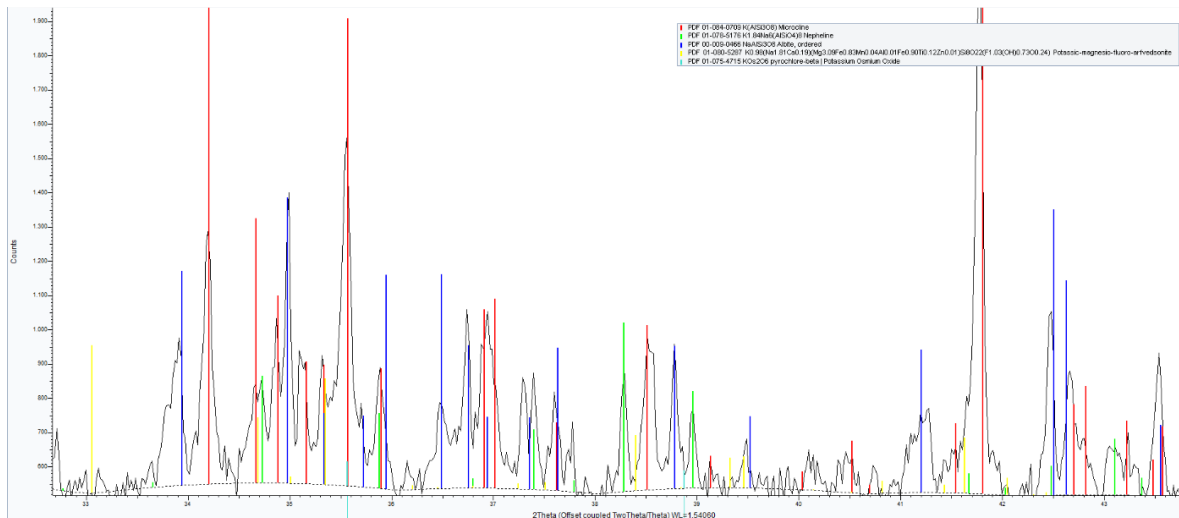


Figura 24 Difractograma de la muestra LL-005 con código interno 21338001 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

6.5.3 LL-002

Se reconocieron minerales como nefelina, microclina, albita, pirocloro y cancrinita, principalmente. Se evidenciaron algunas reflexiones de baja intensidad correspondiente con Sodalita, las cuales concuerdan con las firmas de nefelina, por lo que no pudieron ser asignadas (Ver **Figura 22**).

De manera similar a la muestra LL-005, se identificó el anfíbol arfvedsonita, el cual no fue observado en análisis petrográficos y de microscopía electrónica de barrido (Ver **Tabla 17**).

Tabla 17 Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra LL-002 marcada con código interno de 21338002.

<i>Sistema</i>	Fase	Nombre	Nº PDF
<i>Triclínico</i>	NaAlSi ₃ O ₈	Albita	00-009-0466
<i>Triclínico</i>	K(AlSi ₃ O ₈)	Microclina	01-084-0708
<i>Hexagonal</i>	KNa ₆ (AlSiO ₄) ₈	Nefelina	01-072-7389
<i>Hexagonal</i>	Na ₇ Ca(Si _{6.36} Al ₅ O ₂₄)CO ₃ (H ₂ O) ₂	Cancrinita	01-080-6032
<i>Monoclínico</i>	KO ₉ (Na ₈ CaO) ₁₉ Mg ₃ FeO ₈	Arfvedsonita	01-080-5287
<i>Cubico</i>	KO ₈ 2O ₆	Pirocloro	01-075-4715

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Al ₂ O ₃	22.53
Fe ₂ O ₃	2.45
MnO	0.08
MgO	0.07
CaO	0.48
Na ₂ O	9.17
K ₂ O	5.22
TiO ₂	0.24
P ₂ O ₅	0.02
LOI	1.78

Fuente: Autores

Tabla 19 Resultados de elementos analizados en la muestra LL-005 de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.

	LL-005		LL-005
Ba (ppm)	239	Cd (ppm)	<1
Ga (ppm)	25	Co (ppm)	1
La (ppm)	85.3	Cu (ppm)	4.1
Nb (ppm)	7838	Li (ppm)	8
Sr (ppm)	699	Mo (ppm)	*1
Y (ppm)	18	Ni (ppm)	3
Tl (ppm)	<2	Sc (ppm)	<0.5
Zr (ppm)	1547	Zn (ppm)	60
Pb (ppm)	10	As (ppm)	10
Ti (ppm)	1200	Bi (ppm)	5
Cr (ppm)	32	Be (ppm)	6.6
Sn (ppm)	<10	Sb (ppm)	<5
V (ppm)	25	S (ppm)	<100
W(ppm)	<10	Ca (%)	0.27
Al (%)	10.50	P (%)	<0.01
Na (%)	6.32	Fe (%)	1.67
K (%)	4.33	Mn (%)	523

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Mg (%)	0.04	Ag (%)	0.3
		LOI	1.78

Fuente: Autores

De acuerdo con los diagramas TAS para rocas ígneas plutónicas realizados (Cox *et al.*, 1979) (**Figura 23**), la muestra se clasifica químicamente en el campo de SIENITA NEFELINICA, concordando con los resultados obtenidos por medio de petrografía. Cabe resaltar los altos porcentajes en K₂O (5.22%) y Na₂O (9.17%), que concuerda con un alto contenido de nefelina a nivel petrográfico, el cual es un mineral rico en sodio. Por su parte el porcentaje de SiO₂ sitúa la muestra dentro del campo de rocas de composición intermedia.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

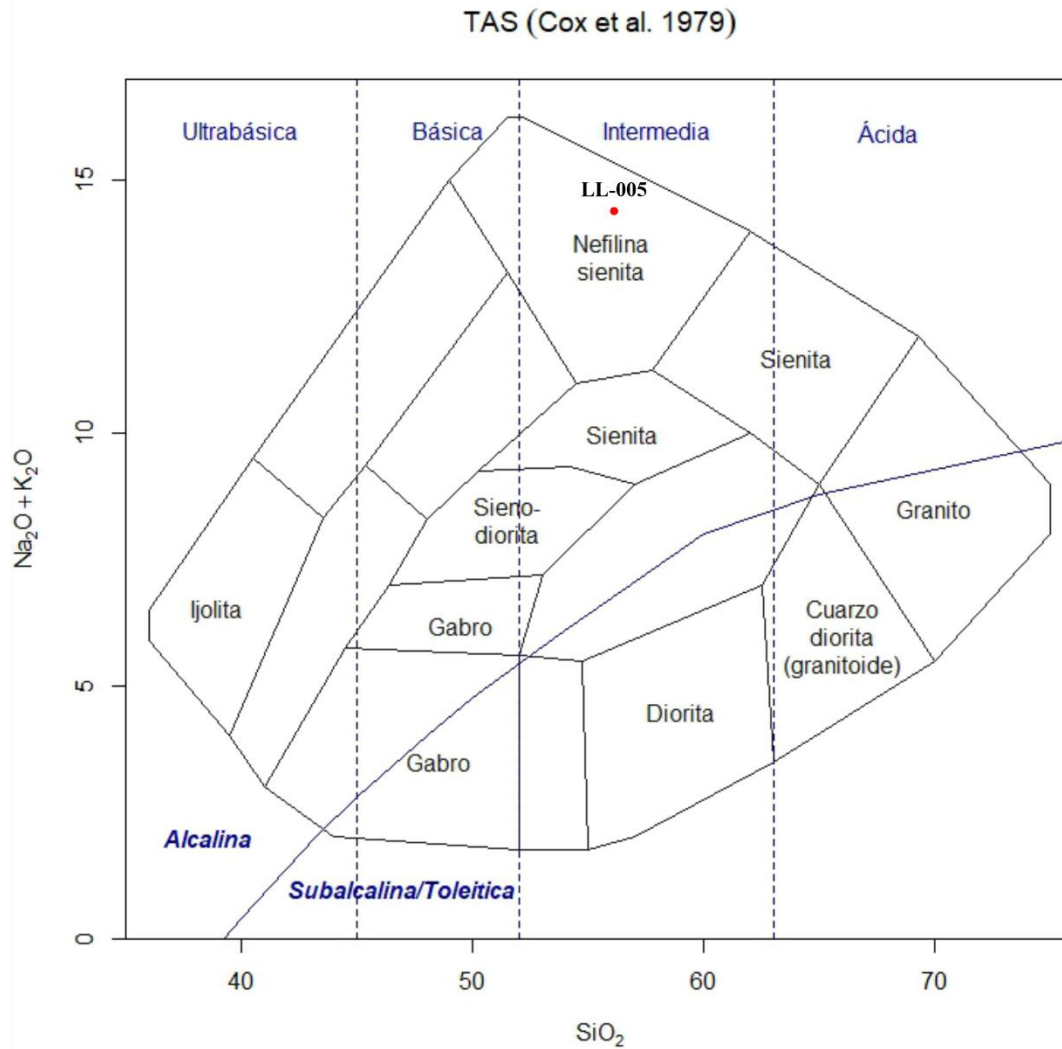


Figura 26 Diagrama TAS- concentración de álcalis vs SiO₂ (Cox et al., 1979) para la muestra LL-005 de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare.

En el diagrama ANK/ANCK (Maniar y Piccoli, 1989) se clasifican las rocas de acuerdo con la relación álcalis total molar vs Contenido de alúmina, situando la muestra sobre el campo de rocas PERALCALINAS. Estas rocas se caracterizadas por presentar valores $Al/(K+Na) > Al/(Na+Ca+K)$. (**Figura 24**). Cabe resaltar que los resultados encontrados corresponden con los porcentajes elementales de Al, K, Na y Ca ploteados y no con los porcentajes de los óxidos mayores Na₂O, CaO, Al₂O₃ y K₂O.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

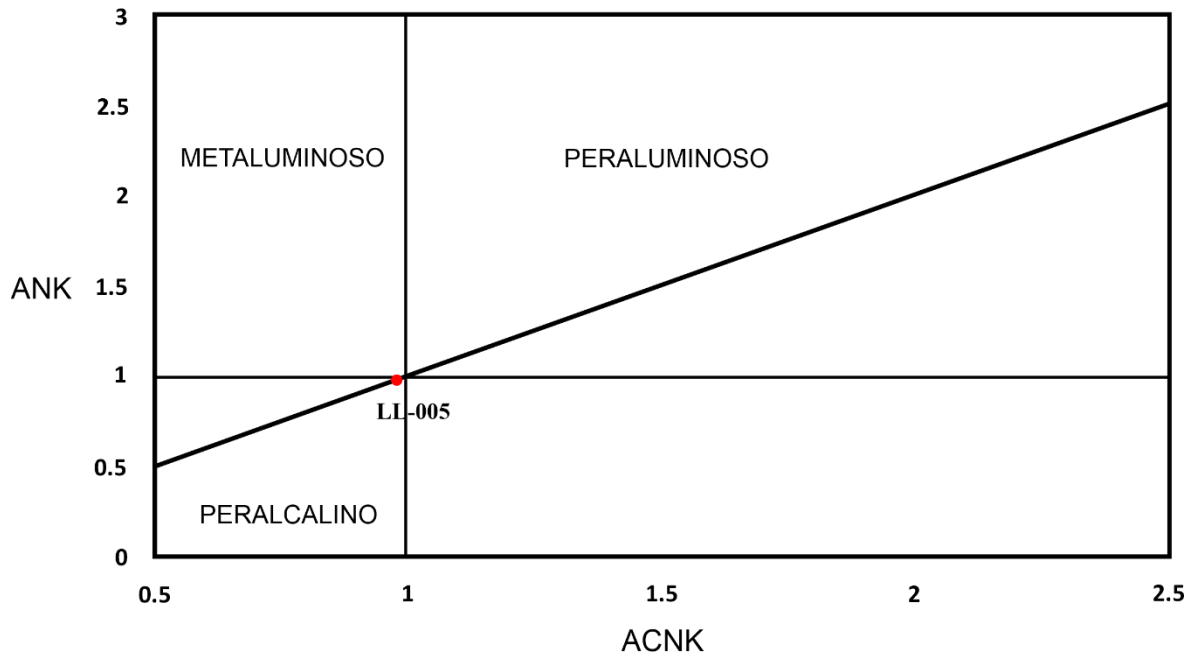


Figura 27 Índice de alcalinidad de la muestra LL-005 para la Sienita Nefelínica de San José de Guaviare, de acuerdo con Maniar y Piccoli (1989).

El diagrama de índice de saturación de aluminosidad (Middlemost, 1975) en el que se grafica la relación entre K_2O (Wt%) Vs Na_2O (Wt%) (**Figura 25**), mostró que la serie alcalina representativa corresponde con la serie potásica, con un comportamiento sódico alto y potásico intermedio, correspondiente con los contenidos de microclina y feldespatoides encontrados en la muestra.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

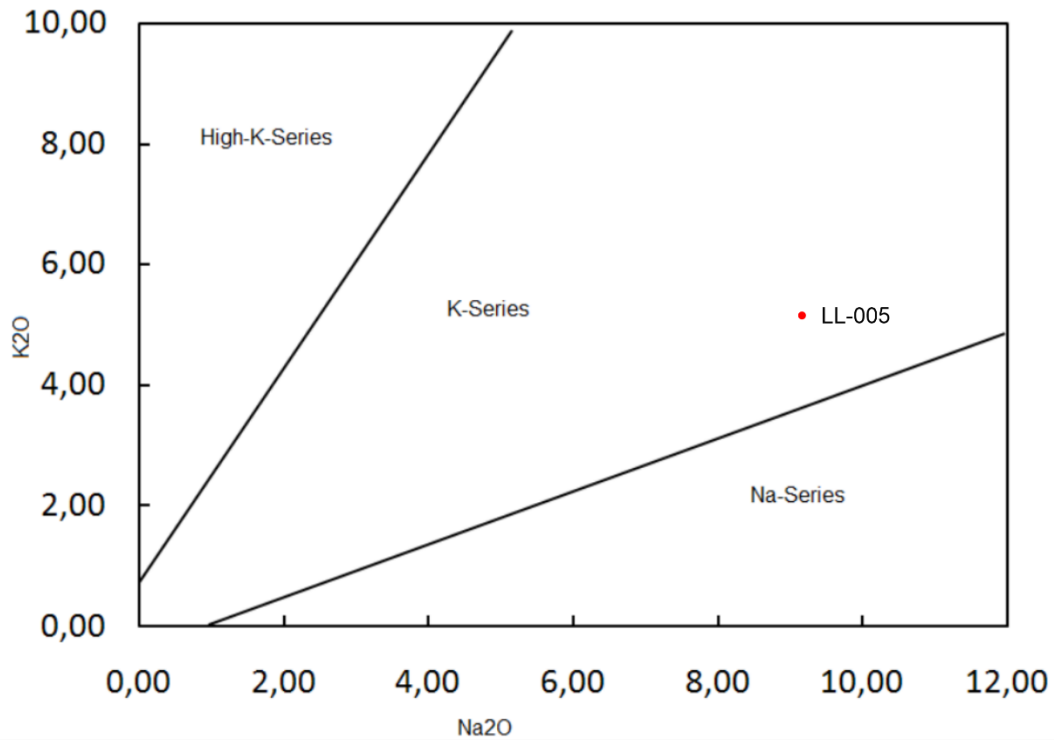


Figura 28 Diagrama K₂O vs Na₂O, Middlemost (1975) para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.

Los diagramas Harker de elementos mayores vs Sílice y elementos traza vs sílice presentados (**Figura 26**) evidencian la relación entre los distintos elementos estudiados. La sienita nefelínica se caracteriza por presentar contenido bajo de SiO₂ (56.16 %), CaO (0.48%), MgO (0.07%), MnO (0.08%), P₂O₅ (0.02%) y TiO₂ (0.24%), contenido intermedio de Fe₂O₃ (2.44%) y K₂O (5.22%) y altos contenidos de Al₂O₃ (22.5%) y Na₂O (9.17%).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

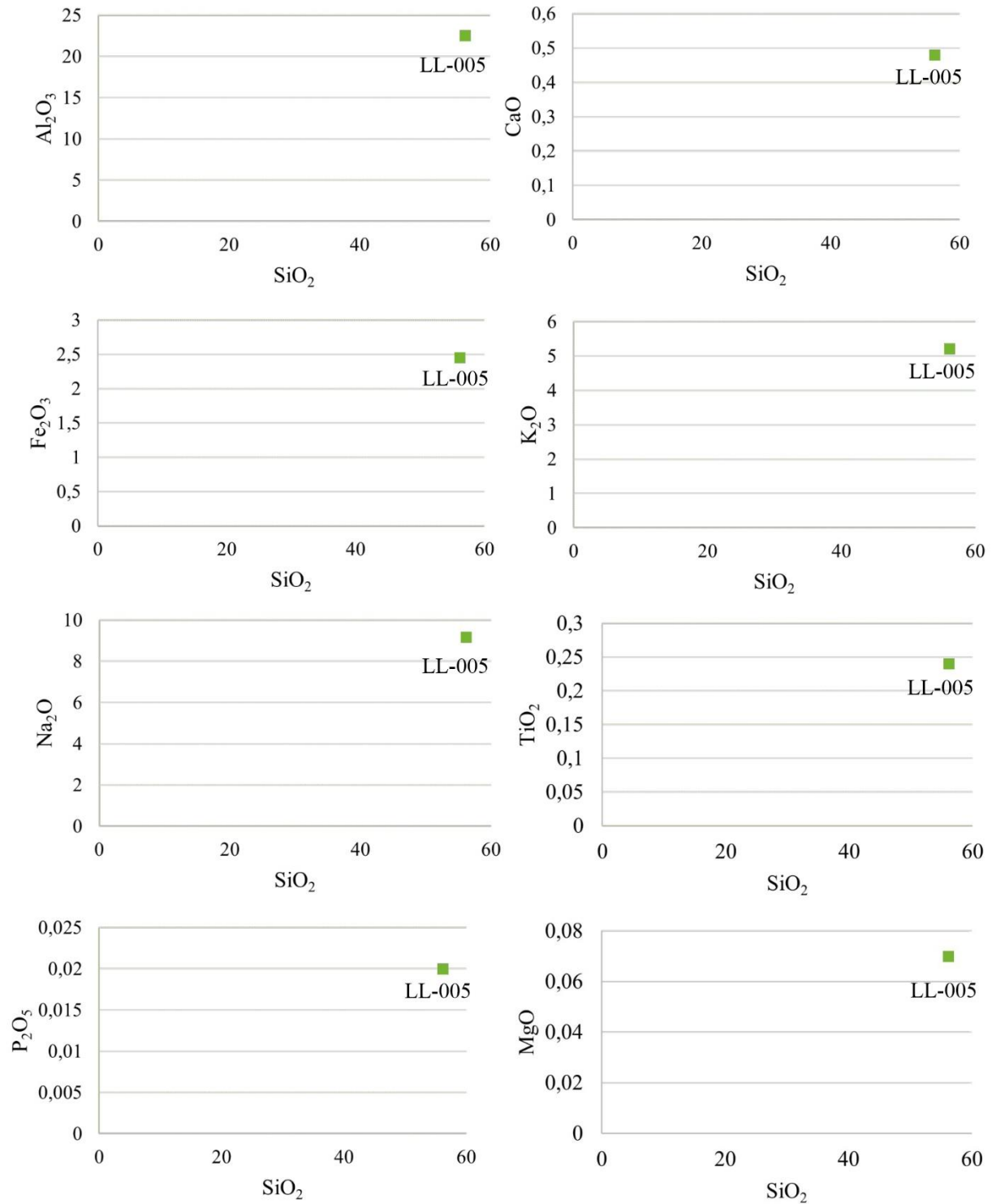


Figura 29 Diagramas binarios de Harker (1909) para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Los porcentajes de SiO_2 (56.16 %) correlacionados con el alto contenido de Al_2O_3 (22.5%) y Na_2O (9.17%) muestran una relación con la cristalización de nefelina y feldespato potásico, en etapas tempranas de la cristalización como pudo evidenciarse en los análisis petrográficos y la interpretación de la secuencia paragenética para la sienita nefelínica. Igualmente, analizando el comportamiento del diagrama SiO_2 vs TiO_2 , se encuentra un empobrecimiento en TiO_2 (0.24%), explicando la baja cristalización de la titanita en la roca y el bajo porcentaje hallado durante los análisis petrográficos (<.1%).

Por su parte, el alto contenido de Zr con respecto a SiO_2 es concordante con la presencia de zircón en la muestra analizada. El contenido de Nb en las muestras alcanza valores anómalamente altos (7838 ppm), que se asocian a la presencia de Pirocloros en la roca (5.58-6.29%) (**Figura 27**).

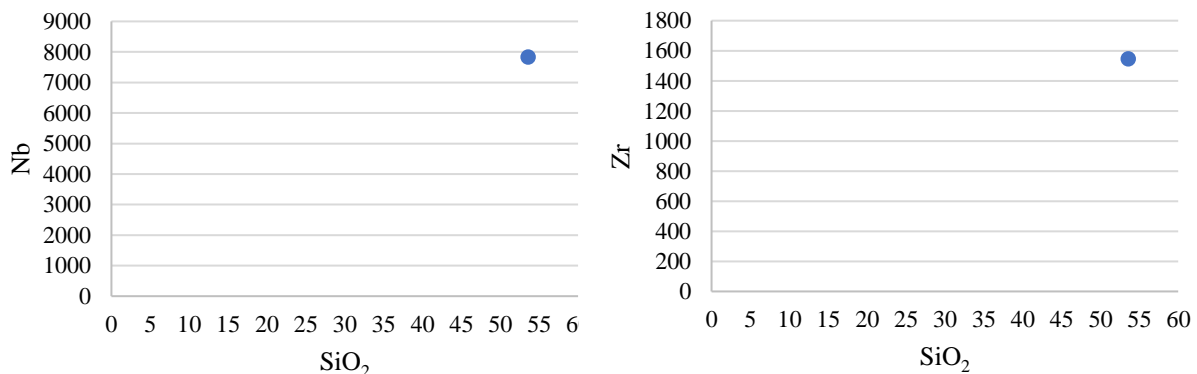


Figura 30 Diagrama de variación de los elementos traza Nb y Zr respecto a SiO_2 . Se usaron los datos de los dos informes enviados por el laboratorio.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE Nb, U Y Ta DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Los elementos traza de Nb e Y fueron graficados de acuerdo con el diagrama de discriminación de granitos de Pearce et al., 1984 (**Figura 28**). Estos elementos son considerados los más apropiados para discriminar entre los diferentes ambientes tectónicos y tipos de granitos. La muestra LL-005, presenta afinidad con el campo WPG (granitos intraplaca).

Comparando los resultados de óxidos mayores en la muestra analizada, con el porcentaje promedio de sienita nefelínica de estudios previos realizados cerca al área (Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018; Barker, 1983), se encuentran valores similares a excepción de los porcentajes de CaO, MnO, P₂O₅, TiO₂ y MgO que son relativamente menores a los anteriormente reportados. (**Tabla 20**).

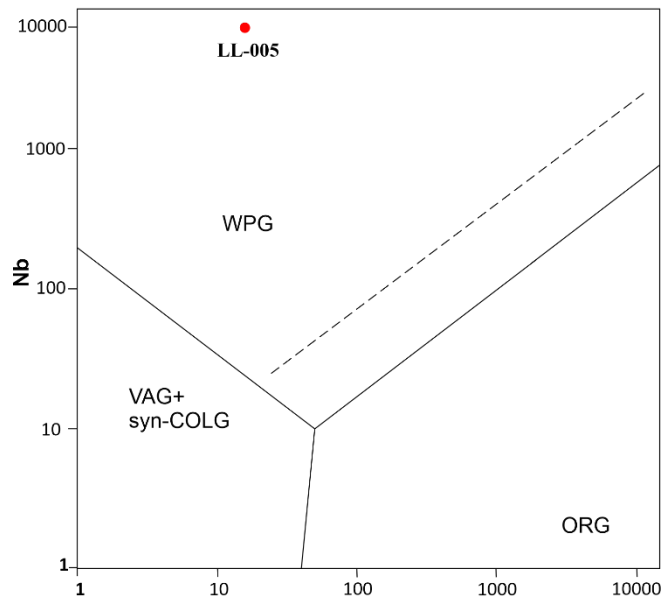


Figura 31 Diagrama de discriminación de granitos por Pearce et al., 1984 para la muestra LL-005 de la sienita nefelínica de San José del Guaviare.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Tabla 20 Comparación entre el promedio de óxidos mayores de la muestra LL-005, el porcentaje promedio de una sienita nefelínica según (Barker, 1983) y porcentaje promedio encontrado en estudios previos.

Óxidos Mayores	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Sienita nefelínica promedio (Barker, 1983)	54.99	20.96	2.25	0.15	0.77	2.31	8.23	5.58	0.60	0.13
Arango <i>et al</i> (2011)	56.24	21.25	3.85	0.14	0.2	1.26	7.84	7.13	0.36	0.06
Maya <i>et al</i> (2018)	55.03	22.08	3.43	0.1	0.34	0.5	8.93	6.15	0.71	0.04
LL-005	56.16	22.53	2.45	0.08	0.07	0.48	9.17	5.22	0.24	0.02

7 DISCUSIÓN

La caracterización petrográfica y de muestras de mano permitió observar que la mineralogía principal alcanzó tamaños de cristales gruesos (Gillespie & Styles, 1999), incluso pegmatíticos en algunas de las muestras. Esto indica largos tiempos de cristalización favorecidos por la gran presencia de volátiles y halógenos que contribuyeron a su desarrollo junto con un enfriamiento progresivo, alcanzando bajas temperaturas (Su *et al.*, 2021). Además, como explica Altagrassi, (2020), la presencia de halógenos, principalmente flúor y cloro, ocasionan una disminución en la viscosidad del magma, aumento de difusión y solubilidad permitiendo la formación de pocos núcleos de gran tamaño, como se pudo evidenciar en las muestras, principalmente con los cristales de nefelina y feldespatos.

Para determinar la secuencia paragenética se tiene en cuenta, además de los resultados obtenidos por medio de los análisis petrográficos y texturales, que las altas concentraciones de halógenos permiten a los minerales con una estructura cristalina más sencilla formarse en los estadios iniciales del sistema (Dingwell *et al.*, 1985). De esta manera, la arfvedsonita al presentar una estructura de cadena simple, cristaliza primero, permitiendo posteriormente la cristalización de otras fases minerales. Con la pérdida progresiva de halógenos y la cristalización de especies minerales menos complejas, la nucleación de tectosilicatos como feldespatos y nefelina es posible una vez se saturan en el sistema (Hunt *et al.*, 2017).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

De esta manera, la paragénesis mineral queda establecida así: 1) Cristalización inicial de arfvedsonita debido al contenido de volátiles. 2) Cristalización de feldespatos y nefelina como minerales de mayor complejidad cristalina y formas subhedrales a anhedrales. 3) Cristalización de pirocloros, zircones y titanita como especies de mayor complejidad estructural, con formas euhedrales. 4) Cristalización de magnetita-ilmenita anhedral en los intersticios de los minerales ya cristalizados. 5) Nucleación de biotita sobre los minerales opacos. 6) crecimiento de cristales localizados de calcita. 7) Formación de cancrinita a manera de coronas de reacción y rellenando fracturas por la interacción entre calcita y nefelina. 8) Aparición de analcima, sericita y otras arcillas como resultado de alteración de feldespatos y feldespatoides. 9) Cristalización de fluorita principalmente en contactos minerales y sobre fracturas. (**Tabla 21**).

En las muestras donde hay presencia de pirocloros y zircones, como los minerales refractarios portadores de elementos de tierras raras y otros incompatibles (Nb, U, Ta, Zr), se presenta un muy bajo porcentaje de arfvedsonita, indicando como se ha observado en otros cuerpos de sienita nefelínica alrededor del mundo, que este mineral debe cristalizar en los primeros estadios dentro del sistema magmático para permitir la concentración de elementos incompatibles y posterior cristalización de minerales enriquecidos en ellos (Hunt *et al.*, 2017).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

La arfvedsonita fue identificada en análisis de DRX, donde mostro reflexiones de baja intensidad, y se asoció posteriormente con cristales de tonalidad verde tabulares de tamaño de grano fino encontrados en algunas de las secciones. Considerando que su identificación petrográfica no fue clara y los cristales relacionados corresponden a un bajo porcentaje dentro de la muestra, la arfvedsonita se incluye en la paragénesis mineral en un rango corto y con limitada certeza, pero se hace mención de que su cristalización temprana es necesaria para permitir la precipitación de especies minerales ricas en elementos incompatibles.

Tabla 21 Secuencia paragenética de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare a partir de las secciones analizadas.

MINERAL	MAGMÁTICO		ALTERACIÓN DEUTÉRICA
	TEMPRANO	TARDÍO	
Microclina	—————		
Pertita		—————	
Nefelina	—————		
Plagioclasa	—————		
Arfvedsonita	---		
Apatito	...		
Pirocloro		-----	
Zircón		-----	
Magnetita		-----	
Ilmenita		-----	
Biotita			-----
Calcita			-----
Titanita		---	
Sericita			-----
Cancrinita			-----
Fluorita			-----

Fuente: autores.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Por otra parte, los cristales de nefelina se encuentran alterados a cancrinita y otros minerales relacionados. La cancrinita suele presentarse como coronas de reacción de la nefelina y en contacto con cristales de calcita, este tipo de alteración ha sido ampliamente observada en cuerpos peralcalinos específicamente de sienita nefelínica en otros depósitos, donde la interacción de nefelina con calcita favorece su formación (Sirbescu & Jenkins, 1999). Sin embargo, se pudo observar en algunas muestras un gran porcentaje de cancrinita en contacto con nefelina sin relacionarse a calcita, posiblemente por un reemplazamiento total de este mineral. Además, se encontró microclina con alta proporción de pertitas dentro de las muestras analizadas. Estas exsoluciones están relacionadas con bajas temperaturas y lento enfriamiento del sistema, lo que permitió el desarrollo de lámelas y parches intercalados de feldespato potásico y sódico (Mason, 1971).

Adicionalmente, los cristales euhedrales de pirocloro zonados, indican un origen magmático, cristalizando con posterioridad a la nefelina y feldespatos como se observó en base a las relaciones texturales. Los altos contenidos de elementos radiactivos, como uranio favorecen la lixiviación de sodio y calcio (Basu & Bhattacharyya, 2014), lo que podría significar una fuente de aporte para la avanzada alteración encontrada en las rocas, la cual, debido al desarrollo de fracturas tanto en sus bordes como hacia los minerales circundantes, favorecerían el transporte de estos elementos. Los pirocloros se encuentran asociados con minerales de magnetita y apatito; sugiriendo que estos cristales se formaron durante las primeras etapas de fraccionamiento del magma (Mitchell, 2015).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

En las secciones analizadas, se encontraron dos tipos de zircones, correspondientes con zircones magmáticos y metamórficos. Los primeros de ellos zonados y con formas bien definidas, donde su proporción en las muestras no es tan abundante respecto al segundo tipo. Los zircones metamórficos se encontraron en tonalidades café claras a oscuras y de aspecto anubarrado, con una gran cantidad de fracturas las cuales indican procesos de alteración deutérica que está relacionada con procesos de exsolución en el sistema (Yang *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2008; Sheard *et al.*, 2012). Algunos de los cristales contiguos a los zircones y pirocloros presentan fracturamiento producto de la radiación inducida. El decaimiento radiactivo de estos cristales en sistemas ricos en volátiles genera formas amorfas y mayor desarrollo de fracturas que facilitan la infiltración de los fluidos (Yang *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2008; Geisler *et al.*, 2007).

Las rocas tienen una composición mineralógica que varía de un punto a otro, evidenciando que existe una relación inversa entre la cantidad y tamaño de pirocloros y zircones, de esta forma en las secciones donde los zircones se presentan en mayor cantidad y tamaño, la cantidad de pirocloros disminuye, al igual que sus dimensiones y densidad de fracturas. De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de SEM se encontró que los cristales de pirocloro presentan Nb en su estructura, mientras que los zircones presentan contenidos de Zr. De esta manera, la relación de la mineralización en las muestras es observada en la disposición mineral (Sheard *et al.*, 2012).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Adicionalmente, la presencia de biotita nucleando a partir de minerales opacos indica una hidratación tardía del sistema magmático, que localmente permiten el reemplazamiento de magnetita por biotita y biotitización producto de fluidos metasomáticos (Sheard *et al.*, 2012). Igualmente, en algunas secciones, la biotita presenta una incipiente orientación, la cual debido a la ausencia de deformación representaría la dirección de paso de fluidos metasomáticos (Amaya *et al.*, 2021).

La presencia de muestras que presentan variación de una roca con tamaño de grano medio a fino se correlaciona con productos de alteración como resultado del paso de fluidos metasomáticos (Sheard *et al.*, 2012). Esto se establece, considerando el contacto neto de las dos texturas, donde se evidencia una roca sin signos importantes de alteración (grano medio) y otra casi completamente alterada (grano fino) con micas y arcillas que reemplazan en gran proporción los minerales primarios.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Los altos contenidos de fluorita en toda la sección y las alteraciones identificadas indican exsolución de fluidos magmáticos tardíos que afectaron la mineralogía inicial. Los magmas pueden saturarse en volátiles y exsolver fluidos acuosos (Bodnar, R. J., 1995), estos podrían contribuir a la formación de fluoritas en etapas tardías, junto con los demás efectos metasomáticos ya especificados. De esta manera a mayor grado de subenfriamiento se forma un número abundante de núcleos de tamaño pequeño (Altagrassi, G. 2020), lo cual se puede evidenciar en la disposición diseminada de fluorita sobre minerales silicatados. Igualmente, los minerales de fluorita también se pueden encontrar relacionados con zircones y pirocloros, mostrando la importancia del flúor en la concentración y transporte de niobio, además de su relación con procesos metasomáticos (Mitchell, 2015).

Por otra parte, las pegmatitas estudiadas en muestra de mano, donde no se evidenció la presencia de pirocloros, corresponden a los productos finales de la evolución magmática, en donde la concentración de volátiles permite el crecimiento cristalino. Así como proponen algunos autores, las pegmatitas pueden presentarse como cuerpos localizados, producto de la exsolución de una fase fluida magmática rica en volátiles, que asciende y se acumula hacia el tope de la cámara magmática (Yang *et al.*, 2014) o como producto de la transición de un sistema dúctil a frágil durante la fase magmática tardía.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

Para el entendimiento del modelo de depósito en SJG se resaltan algunos resultados de estudios anteriores realizados a la sienita nefelínica en zonas hacia el sur del área de estudio (Arango *et al.*, 2011; Arango *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2017; Mejía *et al.*, 2012). En estas zonas la disminución en la mineralización está acompañada de contenidos importantes de arfvedsonita, lo que resulta concordante con el estilo de mineralización de tierras raras e incompatibles observado en otros depósitos alrededor del mundo. El modelo de acumulación mineral en capas presenta áreas más profundas del plutón caracterizadas por el alto porcentaje de arfvedsonita y áreas mineralizadas en las partes más apicales, con porcentajes del anfíbol notablemente menores (Sheard *et al.*, 2012; Schmitt *et al.*, 2002; Su *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2014), ilustrando una relación similar a la encontrada en la sienita nefelínica de SJG.

Por otra parte, se evidenciaron variaciones en las tonalidades de los cristales de pirocloros, algunos de ellos con presencia de zonación. Los bordes de tonalidades más amarillentas no presentaron porcentaje en peso (W%) de hierro, mientras que el centro de los cristales con tonalidades más anaranjadas si presentaron porcentaje en peso (W%) de hierro detectable, de esta manera se encuentra que las tonalidades más anaranjadas a rojizas en los cristales se deben a enriquecimientos en hierro. Adicionalmente, se presentó una relación inversa entre los contenidos de U y Ta con respecto al porcentaje de Ca y F y una relación directamente proporcional de U y Ta con respecto a Fe. Estas coloraciones rojizas y marrón-oscuros no se relacionan con una transferencia de Fe a partir de los cristales de biotita u opacos, inclusive los cristales que no se encontraban en contacto con biotita u opacos presentaron contenidos de Fe incluso mayores que otros que si se encontraban relacionados.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

De acuerdo con esto, la zonación no refleja necesariamente el crecimiento de los cristales en un entorno dinámicamente cambiante, sino que puede resultar de un fundido que se sobresatura en ciertos elementos precipitando en el centro del cristal y reduciendo así las concentraciones en los bordes del pirocloro (McCreath *et al.*, 2013). Sin embargo, al observar contenidos de Fe que, si se relacionan con biotita y opacos, y considerando la densidad de fracturas que se desprenden de los pirocloros, los minerales ricos en Fe podrían aportar cierto contenido de Fe, además de F y Ca como resultado de la interacción entre los pirocloros magmáticos y las soluciones que emanan del magma álcali-silicatado (Viladkar and Bismayer, 2010; Basu & Bhattacharyya, 2014).

El estudio petrográfico de inclusiones fluidas permitió observar que sobre las muestras analizadas no se evidenciaron inclusiones primarias, que, aunque resulta limitante para conocer las características específicas de temperatura, presión y/o composición del fluido y/o fundido que estuvieron presentes durante la cristalización del magma, si aporta información importante del proceso.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

En primer lugar, la ausencia de inclusiones primarias indica que la mineralización se habría dado únicamente por procesos magmáticos y que procesos hidrotermales o de tipo magmático-hidrotermal no tendrían efecto sobre su ocurrencia al menos en esta zona específica, sin descartar que ocurriera transición a procesos magmático-hidrotermales o hidrotermales en otras zonas de la cámara magmática. En segundo lugar, un sistema magmático de tipo anhidro o muy empobrecido en agua en fases iniciales como se han caracterizado a sienitas en otros estudios (Kogarko & Romanchev, 1973; Kogarko & Romanchev, 1977; Su *et al.*, 2021), soportaría la ausencia de inclusiones fluidas en estas muestras, ya que corresponden a productos de una evolución temprana del sistema magmático.

Por otra parte, las rocas originadas de magmas parentales provenientes de gran profundidad no tienen inclusiones fluidas y/o fundidas fácilmente reconocibles (Kogarko & Romanchev, 1973; Kogarko & Romanchev, 1977; Roedder, 1979; Roedder, 2018); ya sea que no se formen al principio, debido a una cristalización lenta, o que se formen y hayan sido barridas por procesos posteriores; esto se sustenta en que el cuerpo de sienita nefelínica con altos contenidos de elementos incompatibles requiere de procesos de diferenciación prolongados para la formación de la mineralización presente.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

En ese mismo contexto, el ambiente geodinámico establecido para esta área ha sido de gran debate, aunque la mayoría de los autores coinciden en la génesis de estas rocas asociada a ambientes intraplaca anorogénicos, el carácter específico que pudo dar origen a la mineralización no tiene consenso. De acuerdo con Arango (2011-2012) y Toussaint (1993) las rocas fueron originadas por procesos de anatexia de rocas metamórficas migmatíticas, Franco (2018), por su parte, relaciona su génesis a magmatismo intraplaca por acreción de cinturones orogénicos. Sin embargo, Amaya *et al.* (2021) expone que un evento distensivo relacionado a rift fue el causante de la formación de estos magmas alcalinos manto-derivados que sufrieron diferenciación magmática y asimilación cortical. En base a los resultados geoquímicos obtenidos en el presente estudio la muestra corresponde con granitos intraplaca los cuales se caracterizan por altos contenidos de álcalis, $Fe (1.67\%) > Mg (0.04\%)$ y halógenos, representados por la concentración de fluorita identificada petrográficamente (Arango *et al.*, 2011). No se abunda mucho mas en el ambiente geodinamico de las rocas debido a la limitacion de datos y resultados geoquímicos.

Los análisis geoquímicos establecen que la roca corresponde a una sienita nefelínica dentro del campo de rocas peralcalinas perteneciente a la serie potásica, caracterizada por la presencia de nefelina y feldespatos. Los óxidos de aluminio y sodio representan un porcentaje importante de su composición acompañados de contenidos menores de óxidos de hierro, potasio, sílice, calcio, magnesio, manganeso, fosforo y titanio, que resultan similares a los valores encontrados en sienitas de estudios anteriores (Barker, 1983; Arango *et al.*, 2011; Maya *et al.*, 2018). Por su parte, los altos valores de Nb y Zr encontrados se asocian a la presencia de minerales accesorios como pirocloros y zircones, hospedadores de la mineralización.

8 IMPORTANCIA ECONÓMICA DE NIOBIO, URANIO Y TANTALIO EN EL MERCADO INTERNACIONAL

La importancia de los metales raros como recursos de interés económico y estratégico radica en la necesidad de estos para el desarrollo de nuevas tecnologías, revolución energética, seguridad y nuevos sectores de producción, que condicionan el mercado global (Alvares & Trujillo, 2020; Piltron & Península, 2019) generando especial interés en la exploración geológica de sus yacimientos.

Elementos como Niobio, Tantalio, Zirconio y tierras raras (REE), que tienen una gran importancia económica y alto riesgo de suministro, son considerados como materias primas críticas, especialmente al ser requeridos en sectores estratégicos de la industria aeroespacial, defensa y energías renovables (EU Comission, 2014; Ladenberger *et al.*, 2018; EU Comission, 2020; Lewicka *et al.*, 2021) Se estima que su demanda ha incrementado y continuará incrementándose hasta al punto de multiplicarse por diez de aquí al 2050, en el caso de las tierras raras (Lluch Fruns, 2015; Weber, 2021)

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

8.1. Niobio

El Niobio es un elemento pesado y blando con alto punto de fusión y ebullición, denominado como mineral refractario debido a su resistencia a altas temperaturas (2468°C) (Polonio, D. F. G., 2015). Características como ductilidad, conducción de calor-electricidad y resistencia a la corrosión lo convierten en un material esencial para la fabricación de productos de alta tecnología, cerámicas y aleaciones super-resistentes para la industria automovilística, oil&gas y construcción, además de un fuerte incremento en la demanda para el campo de la energía nuclear y aeroespacial a futuro (Mackay & Simandl, 2014; Marín, 2017).

Comparte numerosas características y aplicaciones con el Tantalio, sin embargo, su utilidad en la fabricación de aceros inoxidables con alta eficiencia a menor costo, generan inexistencia de sustitutos, incrementando progresivamente el poder de mercado de niobio y sus productos asociados (Silveira & Resende, 2017).

Aunque las reservas globales y su abundancia geológica son grandes, la falta de proveedores y la dependencia de Brasil, como principal y casi único productor, suponen un alto riesgo en su disponibilidad y suministro (Lluch, 2015). En consecuencia, la búsqueda de nuevos depósitos fuera de Brasil es necesaria para mejorar la cadena de suministro de este metal y con ello alcanzar ventajas estratégicas (Mackay & Simandl, 2014).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE Nb, U Y Ta DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

8.2. Tantalio

El tantalio es un metal refractario con muy elevado punto de fusión y ebullición, el cual presenta una de las resistencias térmicas más altas en la naturaleza (2.648°C). Se caracteriza por una excelente conductividad térmica y eléctrica, además de ser muy resistente a la corrosión (Valdés & Bustamante, 2010; Polonio, 2015).

La superconductividad como una de sus principales propiedades genera que cerca del 60% de la producción de tantalio sea usado en dispositivos electrónicos. Debido a su fiabilidad permite fabricar aparatos más pequeños y eficientes, que almacenan carga eléctrica y la liberan cuando se necesita (Marín, 2017). Adicionalmente, su resistencia química ha impulsado a la industria biomédica para la fabricación de prótesis e implantes médicos. (Ginzburg, 1972, Valdés & Bustamante, 2010; Polonio, 2015; Llunch., 2015).

Su tasa anual de crecimiento entre el 5 al 10%, creciente demanda, altos precios y limitada disponibilidad, han impulsado a la industria a la búsqueda de fuentes secundarias de tantalio, como aquellas que vienen a partir de reciclaje. Cerca del 50% de Ta, es recuperado principalmente por procesos de reciclaje electrónico (Llunch., 2015), a través de métodos como pirolisis que han mostrado mayor efectividad y viabilidad económica (Agrawal *et al.*, 2021; Nikishina *et al.*, 2014).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

8.3. Uranio

El uranio natural con determinada concentración en la corteza terrestre consiste en dos isotopos, ^{238}U (99.3%) y ^{235}U (0.7%) (Lehmann, 2008). Este elemento incompatible en sistemas fundidos silicatados presenta gran tamaño iónico y carga, por lo que no es incorporado en minerales silicatados mayores y más bien, se enriquece en los fundidos residuales.

Su principal uso se da en la industria energética, donde sirve como combustible en reactores nucleares y permite mantener bajo costo en la producción de energía, comparado con el carbón (78%) y gas natural (94%) (Lehmann, 2008). Adicionalmente, su importancia en la reducción de emisiones de carbono y la ventaja que ofrece para alcanzar la autosuficiencia de las fuentes de generación de electricidad, lo hace competitivo en el mercado (UPME, 2018). A pesar de las múltiples ventajas presentadas aquí, las limitaciones político-ambientales y la diversificación de las fuentes de energía, frenan su aprovechamiento y uso en la actualidad.

Aunque en algún momento el Uranio era único como combustible en reactores nucleares, nuevos estudios han posicionado al Torio como principal competidor, debido a su capacidad de generación nucleoelectrica a más bajo costo, mayor disponibilidad en la corteza terrestre, menor radioactividad y la posibilidad de destrucción de los productos gastados (Okrostsvaridze, 2014; Okrostsvaridze *et al.*, 2017).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

El desarrollo de nuevas tecnologías nucleoelectricas que optimizan la utilización del Uranio no implica un aumento de su demanda, sin embargo, se espera un crecimiento a futuro (Mayhew, 2018).

8.4. Zirconio

El zirconio es un metal duro, brillante y dúctil, resistente a la corrosión, al calor y a los ácidos (Nielsen *et al.*, 2007; Ghosh *et al.*, 1992). Su gran punto de fusión (1855°C) y radio iónico (0.72°), permiten el uso en la industria electrónica, aunque su principal utilidad se da en el área médica, donde debido a su baja toxicidad biológica y relativa inactividad, le permite formar complejos estables en tejidos a partir de implantes óseos o musculares (Ghosh *et al.*, 1992; Paitampoma, 2019). Adicionalmente, tiene aplicaciones importantes en la industria cerámica y química, fundición, productos ópticos, pigmentos y superaleaciones (EU Comission, 2020).

La gran disponibilidad de recursos, fuerte demanda, irremplazabilidad y su utilidad como proveedor de co-productos (REE y Hafnio) se ven enfrentados a desafíos como su potencial de explotación y la idoneidad de los productos finales (Perks & Mudd, 2019).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

8.5. Minerales estratégicos en Colombia

A partir de la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012, en Colombia se incluyeron dentro de la lista de minerales estratégicos, al coltán (niobio y tantalio) y al uranio, eje central dentro del presente proyecto. Aunque dentro del territorio se han identificado áreas de interés para la exploración y explotación minera de estos minerales, el gobierno nacional no ha autorizado a la agencia nacional minera para otorgar títulos relacionados con estos, en su lugar ha optado, por establecer áreas de reserva estratégica del estado. Estas zonas son prioritarias para el estudio geológico, con el fin de determinar su potencial en futuros proyectos que habrán de ser otorgados a aquellos titulares que puedan aprovechar al máximo las oportunidades económicas y tecnológicas que brindan estos minerales (Portafolio, 2014; UPME *et al.*, 2019)

Estas áreas se localizan principalmente al sureste del territorio colombiano, en los departamentos de Guainía, Vichada, Vaupés y Guaviare, que son especialmente asediados por grupos al margen de la ley, los cuales suelen extraer y comercializar estos minerales de manera ilegal (Portafolio; 2021).

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

9. CONCLUSIONES

- Las muestras son clasificadas como sienitas nefelínicas con índice de color leucocrático y textura hipidiomórfica inequigranular. Su mineralogía corresponde con feldespatos, feldespatoides y biotita principalmente; minerales accesorios como calcita, fluorita, ilmenita-magnetita. Como minerales de alteración se encuentra cancrinita, arcillas y sericita, además de presencia de pirocloros y zircones en proporción variable.
- Los elementos de interés económico correspondientes a Niobio, Uranio, Zirconio y Tantalio se encuentran hospedados en cristales de pirocloro y zircón.
- Las muestras que evidencian alta proporción de pirocloros tienen contenidos menores de zircones, mientras que las muestras con mayor cantidad de zircones tienen contenidos más reducidos de pirocloros.
- La presencia de nefelina y feldespatos con tamaños de grano gruesos hasta pegmatíticos indican largos periodos de cristalización, favorecidos por la presencia de halógenos e incompatibles, ya que se debe alcanzar una concentración importante de estos elementos en el sistema para que especies minerales como los pirocloros puedan cristalizar.
- Debido a la escasez de cristales de arfvedsonita, se sugiere que el área de análisis corresponde con zonas apicales, ya que en sistemas peralcalinos la presencia de arfvedsonita, se relaciona con etapas de cristalización iniciales dentro de la cámara magmática.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Las variaciones texturales en algunas de las secciones evidencian reemplazamiento de la mineralogía primaria por cristales de tamaño de grano fino conformados por micas y arcillas, como resultado de alteración deutérica, además del contenido de flúor por exsolución de fluidos magmáticos tardíos que afectaron la mineralogía inicial.
- La mineralogía característica de las muestras estudiadas correspondería al resultado de proceso de una extrema cristalización fraccionada.
- Las variaciones de tonalidad en los cristales de pirocloro se generan como posible resultado de un fundido que se sobresatura en ciertos elementos, junto con la interacción entre los pirocloros magmáticos y las soluciones magmático-tardías.
- Debido a que no hay densidad importante de inclusiones fluidas en las muestras analizadas, no se evidencia una transición del sistema magmático a un sistema magmático-hidrotermal, lo cual está relacionado con su ubicación dentro de la cámara magmática. Las muestras analizadas corresponderían a los productos de una evolución temprana del sistema.
- A pesar de que el estudio de inclusiones fluidas indica fenómenos netamente magmáticos en áreas específicas, la presencia de pegmatitas, los cambios texturales encontrados en las rocas y la abundante alteración y fracturamiento en cristales de pirocloro y zircón, podrían sugerir procesos de exsolución en el sistema.
- La sienita nefelínica de San José del Guaviare corresponde con una roca peralcalina de la serie potásica, originada en ambientes intraplaca con altos contenidos de Niobio, Uranio, Tantalio y Zirconio, alojados en minerales accesorios como pirocloros y circones.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios de isótopos de azufre debido a su utilidad como trazadores de fuentes mantélicas para dar un mejor entendimiento de la génesis del depósito.

Se sugiere también realizar estudios de microtermometría de inclusiones fundidas en pegmatitas para encontrar datos geoquímicos relevantes de la mineralización.

Debido a las alteraciones identificadas, se sugiere realizar mayores estudios sobre el área con el fin de identificar y caracterizar un complejo peralcalinos completo donde se identifique o no, la presencia de carbonatitas y enriquecimientos en tierras raras, similar a complejos en otras localidades existentes.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALS. (2020). Schedule of Services & Fees Geochemistry. Elements, 52.

Álvarez Calderón, C., & Trujillo Palacio, J. (2020). Geopolítica de las tierras raras: un recurso natural estratégico para la seguridad multidimensional del Estado. *Revista Científica General José María Córdova*, 18(30), pp. 335-355. <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.587>

Anderson, A.J, Wirth, R., & Thomas, R. (2008). The alteration of metamict zircon and its role in the remobilization of high-field-strength elements in the Georgeville granite, Nova Scotia. *The Canadian Mineralogist*, 46(1), 1-18. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.1.1>

Amaya López, C., Weber Scharff, M., Ibáñez Mejía, M., Cuadros Jiménez, F. A., Restrepo Álvarez, J. J., Botelho, N. F., Maya Sánchez, M., Pérez Parra, O. M., & Ramírez Cárdenas, C. (2021). San José de Guaviare Syenite, Colombia: Repeated Ediacaran intrusions in the northwestern Amazonian Craton. *Boletín Geológico*, 48(1), 49-79. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.48.1.2021.503>

Arango, M., Nivia, A., Zapata, G., Giraldo, M., Bermúdez, J., y Albarracín, H. (2011). Geología y geoquímica de la Plancha 350 - San José del Guaviare. Memoria explicativa. Escala 1: 100.000. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.

Arango Mejia, M. I., Zapata Garcia, G., & Martens, U. (2012). Caracterización petrográfica, geoquímica y edad de la sienita nefelínica de San José del Guaviare. *Boletín de Geología*, 34(1), 15–26.

Basu, S.K., & Bhattacharyya, T. (2014). Petrography and mineral chemistry of alkaline-carbonatite complex in Singhbhum crustal province, Purulia region, eastern India. *Journal of the Geological society of India*, 83(1), 54-70. <https://doi.org/10.1007/s12594-014-0007-4>

Bautista Gómez, S. Y., Cáceres Bottia, A. M., Romero Gonzáles, F. A., Zamora Alvarado, A. del P., & Zappa Figueroa, L. F. (2017). EXPLORACIÓN DE MINERALES ENERGÉTICOS A PARTIR DE MEDICIONES GAMAESPECTROMÉTRICAS PARA POTASIO, URANIO Y TORIO EN EL ÁREA DE SAN JOSÉ DEL GUAVIARE Y ÁREA LA PLATA - YAGUARÁ, DEPARTAMENTO DEL HUILA. SGC.

Bodnar, R.J., 1995. Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: Thompson, J.F.H. (Ed.), *Magma, Fluids and Ore Deposits*. Mineral. Assoc. of Can. Short Course, vol. 23, 139–152.

Bonilla, A., Cramer, T., Poujol, M., Cano, H., Franco, J. A., & Amaya, Z. (2019). Petrografía, geoquímica y geocronología U/Pb en circones de rocas ígneas y metamórficas a lo largo del Río Cuiarí en el sur del Departamento de Guainía, Colombia. *Boletín de geología*, 41(1), 55-84. [10.18273/revbol.v41n1-2019003](https://doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019003)

Castaño Dávila, D. L., Hernández González, J. S., Molano Mendoza, J. C., & Rodríguez Vargas, A. I. (2019). Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza–

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Segovia-Remedios (DMZSR), Colombia. *Revista Boletín de Geología*, 41(3), 107–125. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019005>
- CRU Consulting. (2018a). *Coltán: Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035*. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1333>
- CRU Consulting. (2018b). *Tierras raras: Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035*.
- Cordani, U. G., Teixeira, W., D'Agrella-Filho, M. S., & Trindade, R. I. (2009). The position of the Amazonian Craton in supercontinents. *Gondwana Research*, 15(3-4), 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.12.005>
- Cordani, U. G., Sato, K., Sproessner, W., & Fernandes, F. S. (2016). U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas Territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, 46, 05-35. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150012>
- Cox, K., Bell, J., and Pankhurst, R. 1979. *The interpretation of igneous rocks*. George Allen and Unwin, London, 445p.
- Dall'Agnol, R., and Macambira, M.J.B. 1992. Titanita –Biotita granitos do baixo rio Vuapés, provincia rio negro, Amazonas. Parte I: Geología, petrografía e geocronología. *Revista Brasileira de Geociências* 22 (1): 3–14.
- Dingwell, D.B., Scarfe, C.M., Cronin, D.J., 1985. The effect of fluorine on viscosities in the system Na₂O–Al₂O₃–SiO₂: implications for phonolites, trachytes and rhyolites. *American Mineralogist* 70, 80–87. <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.5978>
- Dostal, J. (2016). Rare Metal Deposits Associated with Alkaline / Peralkaline Igneous Rocks. *Economic Geology*, 18, 33–54. <http://dx.doi.org/10.3390/resources6030034>
- ENTR, D. (2014). Report on critical raw materials for the EU. European Commission. 41p.
- European Commission, Report on Critical Raw Materials in the Circular Economy, 2018. 80p. <http://dx.doi.org/10.2873/167813>
- European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report. (2020). EUROPEAN COMMISSION. 158p. <http://dx.doi.org/10.2873/11619>
- Franco, J., Muñoz, J., Piraquive, A., Bonilla, A., Amaya, Z., Cramer, T., y Campos, H. (2018). Geochronology of the Nepheline Syenite of el Jordán, Guaviare Colombia, evidences of Neoproterozoic-Cambrian intraplate magmatism and its implications during Pan- African tectonics in western Gondwana. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Servicio Geológico Colombiano, GEGEMA. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2010861V>
- Galvis, J., Huguet, A., y Ruge, P. (1979). Geología de la Amazonia Colombiana. Informe No. 1792. *Boletín Geológico INGEOMINAS*, XXII (3), 77-78.
- Gansser, A. (1954). The Guiana Shield (S. America) Geological Observations. *Eclogae Geol. Helv*, 47(1), 77-112.
- García, G. R., Ospina, J. S., Cardona, C. R., Párraga, F. H. O., Carvajal, K. R., Cordero, J. G. B., & Rojas, M. I. S. (2011). Unidades, petrografía y composición química del Complejo Migmatítico de Mitú en los alrededores de Mitú. *Boletín de Geología*, 33(1), 27-42.
- García-González, M., Cruz-Guevara, L. E., y Mier-Umaña, R. (2013). Prospectividad de hidrocarburos en la cuenca Vaupés-Amazonas, Colombia. *Boletín de Geología*, 35(2), 15-29.

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Geisler, T., R., Schaltegger, U., & Tomaschek, F. (2007). Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Elements*, 3(1), 43-50. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.43>
- Ghosh, S., Sharma, A., & Talukder, G. (1992). Zirconium. *Biological trace element research*, 35(3), 247-271. <https://doi.org/10.1007/BF02783770>
- Ginzburg, A. I., Ovchinnikov, L. N., & Solodov, N. A. (1972). Genetic types of tantalum ore deposits and their economic importance. *International Geology Review*, 14(7), 665-673. <https://doi.org/10.1080/00206817209475748>
- H. Nielsen, R., H. Schlewitz, J., Nielsen, H., & Updated by Staff. (2000). Zirconium and zirconium compounds. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.26091803.a01.pub2>
- Harker, A. 1909. The natural history of igneous rocks. Macmillan Publishing, Co. Inc., N.Y 384. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920424>
- Hunt, E. J., Finch, A. A., & Donaldson, C. H. (2017). Layering in peralkaline magmas, Ilímaussaq complex, S Greenland. *Lithos*, 268, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.023>
- Hutchison, W., Finch, A. A., Borst, A. M., Marks, M. A., Upton, B. G., Zerkle, A. L., ... & Boyce, A. J. (2021). Mantle sources and magma evolution in Europe's largest, rare earth element belt (Gardar Province, SW Greenland): New insights from sulfur isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 568, 117034. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117034>
- Ibañez-Mejía, M. & Cordani, U.G. 2020. Zircon U–Pb geochronology and Hf–Nd–O isotope geochemistry of the Paleo– to Mesoproterozoic basement in the westernmost Guiana Shield. *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 65–90. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.04>
- López I., Julián A. & Cramer, Thomas (2014): ambiente geológico del complejo Mitú y perspectivas de ocurrencias minerales de niobio y tantalio en el territorio colombiano. *Geología Colombiana*, 37. <http://dx.doi.org/10.15446/gc>
- Ladenberger, A., Arvanitidis, N., Jonsson, E., Arvidsson, R., Casanovas, S., & Lauri, L. (2018). Identification and quantification of secondary CRM resources in Europe. SCRREEN project deliverable available online: <http://screen.eu/wp-content/uploads/2018/03/SCRREEN-D3>.
- Lewicka, E., Guzik, K., & Galos, K. (2021). On the Possibilities of Critical Raw Materials Production from the EU's Primary Sources. *Resources*, 10(5), 50. <http://dx.doi.org/10.3390/resources10050050>
- Lluch Fruns, N. (2015). Estudio del estado del arte y perspectivas de los metales críticos. <http://hdl.handle.net/2117/77554>
- Maniar, P. and Piccoli, P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geologic Society of American Bulletin*, 101: 635-643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2)
- Marín, C. (2017). Tantalio y niobio: metales refractarios. Desmitificando el coltán. *Revista Metal Actual*, 16, 16-23.
- Martin, C. 1972. Paleotectónica del Escudo de Guayana. Conferencia Geológica Inter Guayanas IX, Ciudad Guayana, Venezuela, Memoria. *Boletín Geológico, Publ.Esp.* 6: 251-305
- Mason, B. (1960). "Principios de Geoquímica". Ed. Omega, Barcelona

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Maya, M., Amaya, C., Restrepo, J. J., Duque, J., Palacio, A. F., Gutiérrez, P. A., Pérez, O., Ríos, C., Arias, E. N., y Bedoya, J. D. (2018). Memoria Explicativa de la Plancha 372 – El Retorno. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. 330p.
- Mayhew, N. (2018). El futuro del uranio como fuente de energía sostenible. *Boletín del OIEA. Uranium: From Exploration to Remediation*, 59(2), 24-25.
- McCreath, J. A., Finch, A. A., Herd, D. A., & Armour-Brown, A. (2013). Geochemistry of pyrochlore minerals from the Motzfeldt Center, South Greenland: The mineralogy of a syenite-hosted Ta, Nb deposit. *American Mineralogist*, 98(2-3), 426-438. <https://doi.org/10.2138/am.2013.4068>
- Middlemost, E.A.K, 1975. The basalt clan. *Earth Science Review*, 11: 337-367. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(75\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(75)90039-2)
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas), Unidad de planeación minero-energética (UPME), Agencia Nacional de Minería (ANM), Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2019. *Minerales Estratégicos: Metodología para actualizar y seleccionar los minerales estratégicos en Colombia*.
- Mitchell, R.H. (2015). Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews*, 64, 626-641. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.010
- Moyano, N.I., & Prieto, G.G. (Junio 2021). «Interpretación de dominios tectónicos en el Noroeste del cratón Amazónico a partir de integración de información geológica y geofísica». En Sociedad Colombiana de Geología. Conferencia sobre geofísica. Llevado a cabo en Colombia.
- Nikishina, E. E., Drobot, D. V., & Lebedeva, E. N. (2014). Niobium and tantalum: State of the world market, application fields, and sources of raw materials. Part 2. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 55(2), 130-140. <http://dx.doi.org/10.3103/S1067821214020126>
- Okrostsvaridze, A. (2014). Thorium-Future Energy of Modern Civilization and its Ore Occurrences in Georgia. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 8(3), 48.
- Okrostsvaridze, A., & Gogoladze, S. (2017). Thorium resources and their energy potential in georgian republic, the caucasus. *Energy Procedia*, 125, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.185>
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonir area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58:63-81. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>
- Perks, C., & Mudd, G. (2019). Titanium, zirconium resources and production: A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*, 107, 629-646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>
- Pitron, G., & Península, E. (2019). La guerra de los metales raros. *La guerra de los metales raros: La cara oculta de la transición energética y digital*. 648p.
- Pinheiro, S.S., Fernández, P.E.C.A., Pereira, E.R., Vasconcelos, E.G., Pinto, A.C., Montalvão, R.M.G., Issler, R.S., Dall’Agnol, R., Teixeira, W. y Fernández, C.A.C. 1976. *Geología*, En: Projeto Radar na Amazônia. Folha NA.19-Pico da Neblina: Levantamento de Recursos Naturais, 11: 19-137.
- Pinson, W.H., et al. 1962. K-Ar and Rb-Sr ages of biotitas from Colombia, South America. *Geological Society of America Bulletin* 73:907-910. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1962\)73\[907:KARAOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1962)73[907:KARAOB]2.0.CO;2)

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Polonio, D. F. G. (2015). El interés económico y estratégico del aprovechamiento de metales raros y minerales industriales asociados, en el marco actual de la minería sostenible: la mina de Penouta (Orense, España) (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Orense, España). <https://oa.upm.es/42895/>
- Portafolio (Julio 30 de 2014). Gobierno no dará títulos mineros para explotación de coltán. Portafolio. <https://www.rds.org.co/es/novedades/gobierno-no-dara-titulos-mineros-para-explotacion-de-coltan>
- Portafolio (Agosto 15 de 2021) Millonaria incautación de coltán en Colombia. Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/millonaria-incautacion-de-coltan-en-colombia-555168>
- Priem, H.; Andriessen, P., Boelrijk, N., De Boorder, H., Hebeda, E., Huguett, A. Verdumen, E. & Verschure, R. 1982: Geochronology of the Precambrian in the Amazonas region of southeastern Colombia (western Guiana Shield). *Geologie en Mijnbouw*, 61(3), 229-242. [14736800](https://doi.org/10.17177/14736800)
- “Resolución 180102 del Ministerio de Minas y Energía del 30 de enero de 2012”
- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, 27 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>
- Robbiano Muñoz, F. (2017). Estudio geoquímico del magma a través de inclusiones vítreas: el caso del cono Navidad, IX Región de La Araucanía, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/149135>
- Roedder, E. (1984). Volume 12: fluid inclusions. *Reviews in mineralogy*, 12. 646p.
- Rocha, J. A. M., Bermudez, A. P., Victoria, J. A. F., Pérez, A. B., Urueña, M. L. P., Cramer, T., ... & Escalante, N. V. (2019). Megacricones ediacáricos de la sienita nefelínica de San José del Guaviare y su potencial como material de referencia para datación U/Pb mediante LA-ICP-MS. *Boletín Geológico*, (45), 5-22. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.484>
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., Mcnaughton, N.J., and Fletcher, I.R. (2000). A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4), 453-488. doi: 10.1016/S1342-937X(05)70755-3.
- Schimitt, A. K., Trumbull, R. B., Dulski, P., & Emmermann, R. (2002). Zr-Nb-REE mineralization in peralkaline granites from the Amis Complex, Brandberg (Namibia): Evidence for magmatic pre-enrichment from melt inclusions. *Economic geology*, 97(2), 399-413. [10.2113/gsecongeo.97.2.399](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.2.399)
- SGS. (06 de Enero de 2022). Absorciones de multiácidos (4 ácidos). SGS. <https://www.sgs.pe/es-es/mining/analytical-services/geochemistry/digestion-and-fusion/multi-acid-4acid-digestions>
- Sheard, E.R., Williams-Jones, A. E., Heiligmann, M., Pederson, C., & Trueman, D. L. (2012). Controls on the concentration of zirconium, niobium, and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, 107(1), 81-104 [https://10.2113/econgeo.107.1.81](https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.81)
- Shepherd, T.J. et al. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie Glasgow. 1985. <https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32>

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE NB, U Y TA DE LA SIENITA NEFELÍNICA EN SAN JOSÉ DEL GUAVIARE

- Silveira, Jailison W. and Resende, Marcelo, Competition in the International Niobium Market: An Econometric Study (November 06, 2017). CESifo Working Paper Series No. 6715, Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3082075>
- Sirbescu, M., & Jenkins, D. M. (1999). Experiments on the stability of cancrinite in the system Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-H₂O. *American Mineralogist*, 84(11-12), 1850-1860.
- Sirbescu, M., & Jenkins, D. M. (1999). Experiments on the stability of cancrinite in the system Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-H₂O. *American Mineralogist*, 84(11-12), 1850-1860. <https://doi.org/10.2138/am-1999-11-1212>
- Su, H. M., Jiang, S. Y., Zhu, X. Y., Duan, Z. P., Huang, X. K., & Zou, T. (2021). Magmatic-hydrothermal processes and controls on rare-metal enrichment of the Baerzhe peralkaline granitic pluton, inner Mongolia, northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 131, 103984. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.103984>
- Tassinari, C.C.G., and Macambira, M.J.B. (1999). Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22, 174-182. Doi: 10.18814/epiiugs/1999/v22i3/004
- Teixeira, W., Tassinari, C. C. G., Cordani, U. G., & Kawashita, K. (1989). A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, 42(3-4), 213-227. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90012-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90012-0)
- Teixeira, W., Tassinari, C.G., Cordani, U.G., and Kawashita, K. (1989). A review of the geochronology of the Amazonian Craton: Tectonic implications. *Precambrian Research*, 42(3-4), 213-227. doi: 10.1016/0301-9268(89)90012-0.
- Toussaint, J. F. (1993). Evolución geológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Trumpy, D. (1943). Pre-cretaceous of Colombia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 54(9), 1281-1304. <https://doi.org/10.1130/GSAB-54-1281>
- UPME, ANM, SGC, Min Minas y Energía (2019). *Minerales estratégicos: Metodología para actualizar y seleccionar los minerales estratégicos en Colombia*. 2(66p.)
- Valdés Vera, D., & Bustamante Vargas, N. (2010). Análisis descriptivo del coltán en Colombia y sus posibles mercados potenciales (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario).
- Van den Kerkhof, A. M., & Hein, U. F. (2001). Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1-4), 27-47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)
- Vesga, C. J., & Castillo, L. E. (1972). Reconocimiento geológico y geoquímico preliminar del río Guaviare, entre la confluencia con los ríos Ariari e Iteviare. Ministerio de Minas y Petróleo.
- VILADKAR, S.G. and BISMAYER, U. (2010) Compositional variation of pyrochlores of Amba Dongar Carbonatite Complex, Gujarat. *Jour. Geol. Soc. India*, v.75, 495–502. <https://doi.org/10.1007/s12594-010-0048-2>
- Weber, M. D. A. (2021). El impacto geopolítico de las tierras raras en el orden internacional. *Economía industrial*, (420), 47-58.
- Yang, WB., Niu, HC., Shan, Q. *et al.* Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization. *Miner Deposita* 49, 451–470 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0504-1>.
- Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7. <https://doi.org/10.3390/min7110203>