



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LAS ALTERACIONES HIDROTÉRMICAS EN EL ÁREA GEOTÉRMICA DE PAIPA BOYACÁ, COLOMBIA

Angela Valeria García Lara

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2021

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES EN EL ÁREA GEOTÉRMICA DE PAIPA BOYACÁ, COLOMBIA

Angela Valeria García Lara

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias - Geología

Director:

M. Sc., Ph. D. John Jairo Sánchez Aguilar

Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Codirector:

M. Sc., Ph. D. Carlos Augusto Zuluaga Castrillón

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá

Líneas de investigación:

Geotermia, petrología y geoquímica

Grupo de investigación: Vulcanología-GIV

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá, Colombia

2021

“Cuando nuestras actitudes superan nuestras habilidades, aun lo imposible se hace posible”

John Maxwell

Agradecimientos

Gracias a la Gobernación de Boyacá y Minciencias- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por creer en el fortalecimiento del capital humano de alto nivel para Boyacá; gracias por reconocer la geotermia como uno de los sectores estratégicos para el desarrollo de la región; gracias por creer en los profesionales locales y por crear este tipo de programas que buscan el aprovechamiento de nuestros recursos en beneficio de la comunidad

Gracias al profesor John Jairo Sánchez por adoptarme académicamente, aceptar la dirección de este trabajo, por sus enseñanzas, ser un profesor excepcional, por transmitir tranquilidad y confianza, por aportar desde el ser, gracias por estar dispuesto a contestar con claridad cualquier pregunta por básica que fuera, gracias por toda la dedicación y tiempo invertido en mí y en este trabajo

Gracias a los profesores y geólogos Carlos Augusto Zuluaga Natalia Pardo, Timoleón Garzón, Andrés Rodríguez, Andrea Linares y Jhon Álvaro Forero por su asesoría desde los inicios de esta investigación.

Gracias a la profesora Elizabeth Henríquez Torio, de la empresa de energía geotérmica de El Salvador, LaGeo, por su asesoría, amistad y confianza brindada durante y después del Diplomado en Geotermia para América Latina 2018, gracias por ser la tutora de investigación del proyecto del diplomado que hoy se consolida en parte de esta tesis de maestría.

Gracias a mis asesores. Expreso un sentimiento de gratitud hacia el grupo técnico de geotermia del Servicio Geológico Colombiano (SGC) por su disposición y tiempo en ayudarme a resolver preguntas específicas del modelo geotérmico conceptual de Paipa, gracias a Claudia Alfaro, Jesús Rueda Gutiérrez, Gina Rodríguez, Gilbert Rodríguez y Camilo Matiz.

Gracias a German Bonilla y el profesor Sergio Gaviria por la asesoría en el tema de difracción de rayos X. A Carolina Jiménez y Juan David por su apoyo en los análisis de microsonda electrónica. Al profesor Juan Carlos Molano y a Rubén Gaitán por colaboración con el escaneo de las secciones delgadas.

Gracias a las mujeres valientes de mi vida. Gracias mami gloria, Ginna, Auris, María José, tía Paty, abuelita Aura, amigos y demás familiares que apoyaron durante este proceso.

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo aportar al conocimiento de las características petrográficas, composicionales y de minerales de alteración de las rocas volcánicas félsicas y cuerpos ígneos del Área Geotérmica de Paipa. Para esto se realizaron análisis de microscopía óptica, geoquímica mineral y difracción de rayos X (DRX). Se encuentra que las rocas de los sectores Matarredonda (cantera ALFAGRES) y Alto de los Godos corresponden a feno-traquitas y feno-latitas con un predominio de anortoclasa sobre albita. En la fracción arcilla se encontraron las asociaciones mineralógicas halloisita, caolinita, illita y montomorillonita, formadas en ambientes con un pH neutro-ácido y temperaturas relativamente bajas por las alteraciones de tipo argílico y argílico intermedio. Por último, al integrar todos los resultados de análisis realizados en la fracción arcilla, se determinó que cuenta con una buena cristalización relacionada con la neoformación de minerales arcillosos, producto del aporte calórico de los fluidos hidrotermales.

Palabras clave: Geotermia, alteraciones hidrotermales, fluidos hidrotermales, minerales arcillosos, área geotérmica de Paipa.

Abstract

This research contributes to the knowledge of the petrographic, compositional, and alteration mineral characteristics of the felsic volcanic rocks and igneous bodies of the Paipa Geothermal Area. The investigation is carried out by means of optical microscopy analysis, mineral geochemistry, and X-ray diffraction (XRD) analysis. The analyzed rocks in Matarredonda (ALFAGRES quarry), and Alto de los Godos sector, are classified in the range trachyte - latite, with predominance of anorthoclase over albite. In the clay fraction, the mineralogical associations halloysite, kaolinite, illite and montmorillonite were found, that are recognized as alteration products of the argillic and intermediate argillic types, formed in environments with acid-neutral pH and relatively low temperatures. By integrating the analysis carried out in the clay fraction, the properties consistent with good crystallization were found, related to the neoformation of clay minerals, inferred to be the products of caloric contribution by hydrothermal fluids.

Keywords: Geothermal, hydrothermal alterations, hydrothermal fluids, clay minerals, Paipa Geothermal Area.

Contenido

Pág.

1. Generalidades.....	23
1.1 Objetivos	23
1.1.1 Objetivo general	23
1.1.2 Objetivos específicos	23
1.2 Localización del área de estudio	24
2. Marco geológico regional	26
2.1 Geología estructural	28
2.2 Estratigrafía	31
2.3 Vulcanología	32
3. Marco teórico	37
3.1 Energía geotérmica.....	37
3.2 Tipos de recursos geotérmicos	38
3.3 Sistemas geotérmicos	39
3.4 Sistema geotérmico de Paipa.....	40
3.5 Fluidos y alteraciones hidrotermales	42
3.6 Estilos y tipos de alteración hidrotermal	44
4. Antecedentes.....	46
5. Datos y métodos	52
5.1 Revisión bibliográfica	52
5.2 Elaboración de mapas de reconocimiento	53
5.3 Selección de sitios de muestreo.....	54
5.4 Selección de muestras	54
5.5 Elaboración de secciones delgadas	55
5.6 Análisis petrográficos.....	56
5.7 Catodoluminiscencia	56
5.8 Cálculo de índices de meteorización	57
5.9 Difracción por rayos x.....	58
5.9.1 Análisis en polvo desorientado.....	58
5.9.2 Análisis en polvo orientado	59
5.9.3 Análisis de difractogramas	59
5.10 Microsonda electrónica-análisis de química mineral	60

5.11	Geotermometría.....	61
5.12	Caracterización geomecánica.....	62
6.	Resultados.....	65
6.1	Petrografía	65
6.1.1	Minerales esenciales.....	70
6.1.2	Minerales accesorios.....	72
6.1.3	Minerales de alteración.....	73
6.1.4	Clasificación petrográfica.....	74
6.2	Catodoluminiscencia	76
6.3	Química mineral.....	77
6.4	Geotermometría.....	90
6.5	Difracción de rayos X	91
6.5.1	Identificación de minerales arcillosos en lámina orientada (N, EG y C-500 °C) 105	
6.6	Clasificación geoquímica de las rocas y cálculo de los índices de meteorización química (CWI).....	108
6.7	Análisis semicuantitativo de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos	110
6.7.1	Sección 1.....	110
6.7.2	Sección 2.....	112
6.7.3	Sección 3.....	113
7.	Discusión.....	115
7.1	Petrografía	115
7.2	Química mineral.....	116
7.3	Difracción de rayos	117
7.3.1	Depósitos piroclásticos frente Guarrúz sector CEMEX.....	117
7.3.2	Depósitos piroclásticos sector ALFAGRES.....	118
7.3.3	Rocas porfíricas provenientes del sector ALFAGRES	119
7.3.4	Rocas porfíricas domo SE-Alto de los Godos.....	120
7.3.5	Depósitos piroclásticos sector el Durazno.....	120
7.4	Caracterización geomecánica de macizos rocosos.....	121
7.5	Alteración hidrotermal	121
8.	Conclusiones.....	125
9.	Recomendaciones.....	127
10.	Referencias	128
Anexos		141

Lista de figuras

Figura 1-1: Mapas de localización del área de estudio.....	25
Figura 2-1: Mapa geológico regional	26
Figura 2-2: Mapa geológico del AGP.....	27
Figura 2-3: Principales sistemas de fracturamiento del AGP.....	29
Figura 2-4: Detalle del área donde afloran los cuerpos intrusivos del AGP.	34
Figura 2-5: Etapas principales de la actividad volcánica del complejo Paipa.....	35
Figura 3-1: Modelo geológico-geofísico del SGP en 3D.....	42
Figura 4-1: Porcentajes de los elementos mayores en los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes	50
Figura 6-1: Muestra VGP-01 cantera ALFAGRES.....	66
Figura 6-2: Muestra VGP-02 cantera ALFAGRES.....	66
Figura 6-3: Muestra VGP-03 cantera ALFAGRES.....	67
Figura 6-4: Muestra VGP-04 cantera ALFAGRES.....	67
Figura 6-5: Muestra VGP-05 al este del domo Central - Alto de los Godos.....	68
Figura 6-6: Muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos	68
Figura 6-7: Muestra VGP-07 domo Central - Alto de los Godos.....	69
Figura 6-8: Muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos.....	69
Figura 6-9: Muestra VGP-09 domo SE - Alto de los Godos.....	69
Figura 6-10: Microfotografías de feldespatos y plagioclasas muestra VGP-0 domo NW - Alto de los Godos.....	70
Figura 6-11: Fenocristal muestra VGP-07 domo Central - Alto de los Godos	71
Figura 6-12: Microfotografías de fenocristales muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos.	71
Figura 6-13: Fenocristal de feldespato zonado muestra VGP-09 domo SW – Alto de los Godos.	72
Figura 6-14: Mapa composicional de fenocristal de feldespato alcalino con textura de reabsorción muestra VGP-08 domo SW – Alto de los Godos.....	72
Figura 6-15: Diagrama de clasificación rocas sectores ALFAGRES y Alto de los Godos.....	76
Figura 6-16: Catodoluminiscencia muestra VGP-06 domo SW - Alto de los Godos	77
Figura 6-17: Catodoluminiscencia muestra VGP-08 – Alto de los Godos.....	77
Figura 6-18: Catodoluminiscencia muestra VGP-09 – Alto de los Godos.....	77

Figura 6-19: Diagrama de clasificación de feldespatos de Marshall (1996) de las muestras VGP-03, VGP-04, VGP-05, VGP-06, VGP-07 y VGP-09.....	78
Figura 6-20: Microfotografías de anfíboles de la muestra VGP-09 domo SE – Alto de los Godos	79
Figura 6-21: Imagen de electrones retrodispersados para el anfíbol de la muestra VGP-09 domo SE – Alto de los Godos.....	79
Figura 6-22: Diagrama de clasificación de anfíboles de composición Na-Ca de cristales muestras VGP-03, VGP-09, VGP-06 y VGP-07	80
Figura 6-23: Química mineral de fenocristal de la muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos	81
Figura 6-24: Mapa composicional fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos.....	82
Figura 6-25: Química mineral muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos	83
Figura 6-26: Mapa composicional fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos.....	84
Figura 6-27: Mapas composicionales de fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos.....	85
Figura 6-28: Imagen composicional cristal de feldespato muestra VGP-09 domo SE - Alto de los Godos.....	86
Figura 6-29: Imagen composicional cristal de feldespato de la muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos	87
Figura 6-30: Imagen composicional cristal de feldespato de la muestra VGP-07 domo Centro - Alto de los Godos.	88
Figura 6-31: Imagen composicional cristal de feldespato de la muestra VGP-01 ALFAGRES.....	89
Figura 6-32: Microfotografías de plagioclasa y anfíbol muestra VGP-06 domo NW – Alto de los Godos.....	91
Figura 6-33: Localización de las muestras de DRX	92
Figura 6-34: Localización de las muestras de DRX sector ALFAGRES	93
Figura 6-35: Fotografía de la cantera en explotación ALFAGRES	94
Figura 6-36: Difractograma de análisis en polvo desorientado de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES	95
Figura 6-37: Difractograma de análisis en lamina orientada de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES	95
Figura 6-38: Difractograma de análisis en polvo desorientado de la muestra AFG-12 cantera ALFAGRES	96
Figura 6-39: Difractograma de análisis en lámina orientada de la muestra AFG-12 cantera ALFAGRES	96
Figura 6-40: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector ALFAGRES	99

Figura 6-41: Porcentajes de minerales y minerales arcillosos obtenidos en el sector ALFAGRES	99
Figura 6-42: Localización de las muestras de DRX sector CEMEX	100
Figura 6-43: Porcentajes de las principales fases cristalinas obtenidas en el sector CEMEX	101
Figura 6-44: Detalle del material arcilloso relleno de fracturas en el domo SE - Alto de los Godos	101
Figura 6-45: Difractograma en agregado desorientado y porcentajes de los minerales obtenidos en la muestra VGP-032 domo SE - Alto de los Godos	102
Figura 6-46: Localización de las muestras de DRX sector Alto de los Godos	103
Figura 6-47: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector Alto de los Godos.....	104
Figura 6-48: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector El Durazno	104
Figura 6-49: Difractograma de análisis en polvo desorientado y lámina orientada de la muestra DRZ-02 sector El Durazno.....	105
Figura 6-50: Difractograma en lámina orientada de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES	106
Figura 6-51: Deconvolución matemática de la señal del difractograma AFG-08 cantera ALFAGRES.....	107
Figura 6-52: Difractograma con análisis de parámetros de picos muestra AFG-8 cantera ALFAGRES en lamina orientada (etilenglicol).....	107
Figura 6-53: Diagrama de clasificación según el Al_2O_3 , K_2O y $CaO+Na_2O$ con cuantificación del CIA de los sectores Alto de los Volcanes, Quebrada Honda y Alto de los Godos	109
Figura 6-54: Diagrama de clasificación según el A-CN-K y AK-C-N. A: Al_2O_3 , CN: $CaO^+ + Na_2O$; K: K_2O (proporción molar).....	109
Figura 6-55: Localización de secciones caracterizadas geomecánicamente del domo SE sector Alto de los Godos	110
Figura 6-56: Fotografías de una sección de afloramiento del domo SE - Alto de los Godos	111
Figura 6-57: Detalle en zonas de alteración alrededor de fracturas, venas rellenas de material arcilloso color blanco del domo SE - Alto de los Godos.....	112
Figura 6-58: Fotografía de la sección 2 para descripción geomecánica del domo SE - Alto de los Godos.....	112
Figura 6-59: Detalle de las fracturas en enrejado y zonas de alteración de la sección 2 del domo SE - Alto de los Godos	113
Figura 6-60: Sección 3 para descripción geomecánica en el sector domo SE - Alto de los Godos	113

Lista de tablas

Tabla 2-1: Fallas geológicas del AGP.....	30
Tabla 2-2: Unidades estratigráficas del AGP	31
Tabla 2-3: Edades de los cuerpos intrusivos del SGP	36
Tabla 3-1: Tipos de recursos y aplicación	39
Tabla 3-2: Componentes del SGP.....	41
Tabla 3-3: Terminología de alteración aplicada a sistemas minerales seleccionados	45
Tabla 4-1: Minerales de alteración en el sector Alto de los Godos	48
Tabla 4-2: Minerales de alteración del AGP.....	49
Tabla 4-3: Valores promedio de los elementos mayores de los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes.....	51
Tabla 5-1: Insumos y preparación de los mapas de reconocimiento	53
Tabla 5-2: Registro del lugar de muestreo, identificación utilizada para cada sector, tipo de análisis y número de muestras	55
Tabla 5-3: Parámetros para la clasificación de un macizo rocoso (RMR) y valores.....	62
Tabla 6-1: Secuencia paragenética de las rocas del sector Alto de los Godos	74
Tabla 6-2: Mineralogía y clasificación modal según el conteo de puntos de las muestras sectores Alto de los Godos y Quebrada Honda	74
Tabla 6-3: Clasificación de las rocas según Streckeisen (1979) sectores ALFAGRES y Alto de los Godos.....	75
Tabla 6-4: Características texturales de las rocas sectores ALFAGRES y Alto de los Godos	75
Tabla 6-5: Mediciones de química mineral realizadas en cristales de feldespatos y anfíboles	78
Tabla 6-6: Resultados geotermométricos muestra VGP-06 domo NW - Altos de los Godos	91
Tabla 6-7: Muestras analizadas mediante DRX	92
Tabla 6-8: Cuantificación de minerales por DRX de las muestras del sector cantera ALFAGRES.....	98
Tabla 6-9: Cuantificación de minerales por DRX del sector CEMEX	98
Tabla 6-10: Cuantificación de minerales por DRX sector Alto de los Godos.....	102

Tabla 6-11: Datos obtenidos a partir del proceso de deconvolución matemática de los difractogramas de la muestra AFG-08 en natural y etilenglicol	108
Tabla 6-12: Valoraciones extraídas del sistema de clasificación de un RMR según las características de cada sección	114
Tabla 6-13: Valores de m y s para las secciones de estudio	114
Tabla 6-14: Resistencia compresiva y tensional del macizo rocoso de las secciones analizadas	114

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
T	Temperatura	°C	
pH	Potencial de hidrógeno	-	
cm	Centímetros	cm	
m	Metros	m	
MV	Megavatios		
wt	Weight	-	
m	Hoek-Brown parameter	-	$m = m_i \exp[(RMR - 100)/28]$
s	Hoek-Brown parameter	s	$s = \exp[(RMR - 100)/9]$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
μm	Micrómetros	-	
μA	Microamperios	-	
σ_{cm}	Rock mass compressive strength	-	$\sigma_{cm} = (\sigma_c^2 c)^{1/2}$
σ_{tm}	Rock mass tensile strength	-	$\sigma_{tm} = \sigma_c / 2 [m - (m^2 + 4s)^{1/2}]$

Abreviaturas

Abreviatura	Término
DEM	Digital elevation model
SIG	Sistemas de información geográfica
CIA	Chemical index of alteration
PIA	Plagioclase index of alteration
SA	Sílice-alúmina

Abreviatura	Término
RMR	Rock mass rating
DRX	Difracción de rayos X
RQD	Rock quality designation

Introducción

Los modelos energéticos de coexistencia y transición de fuentes fósiles a fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) contribuyen a la reducción de emisiones de gases de invernadero y diversifican las matrices energéticas. Además, como lo afirma la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) (2018), su incorporación puede extender el horizonte temporal de los recursos fósiles, facilitándole a la industria petrolera migrar transitoriamente a un sector energético más amplio, eficiente y seguro.

En el caso de Colombia la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional (SIN) en el año 2019 fue de 17,462 MV, compuesta en un 30.75 % por fuentes de energía no renovable (combustibles fósiles como el carbón y gas) y 69.25 % por fuentes renovables como la energía hidráulica (68.24 %), eólica (0.11 %), solar (0.1 %) y de biomasa (0.8 %) (XM, 2019). Esta limitada diversificación de la matriz energética, la baja capacidad de generación durante las épocas de sequía y la poca participación de FNCER como la solar y eólica provocan una alta volatilidad en los precios y ponen en riesgo la confiabilidad del sistema ante la posibilidad de un desabastecimiento (Departamento Nacional de Planeación-DNP, 2019).

Por lo anterior, el Gobierno Nacional se comprometió a incorporar 1500 MV de FNCER para el 2022, con el fin de que tengan una participación del 13 % al 18 % en el 2031 y que en ese año se cumpla con el objetivo del Acuerdo de París, ratificado durante la reunión COP21, de reducir un 20% las emisiones de CO₂. Esto a través de incentivos para el desarrollo de proyectos renovables, reglamentados en la ley 1715 de 2014 y el decreto 348 de 2017 (Ministerio de Minas y Energía-MinMinas, 2015; 2017), y las subastas de adjudicación de contratos a largo plazo.

Ahora bien, una de las FNCER que puede aportar integralmente a la diversificación, descarbonización y descentralización de la matriz energética colombiana es la geotermia,

pues este recurso tiene la ventaja de ser manejable, flexible y continuo a largo del tiempo. Al mismo tiempo que su uso, de manera directa, en sectores de alto consumo como el industrial (fabricación de textiles y papel, procesamiento de frutas, deshidratación, pasteurización, etc.) y residencial (refrigeración, climatización, calentamiento del agua y cocción) aumentaría la eficiencia energética en el país (SENER, 2018).

Otra de las ventajas es que la energía geotérmica puede desarrollarse en gran parte del territorio nacional. Sin embargo, su aplicación depende de la categoría del recurso respecto al contenido de calor de sus fluidos (entalpía). En los reservorios de alta temperatura ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), donde el vapor de agua se puede transformar directamente en energía eléctrica o los de media temperatura ($90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$), de donde también se puede obtener el recurso eléctrico, pero a partir de un fluido artificial de intercambio. En contraste, los de baja ($30\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$) y muy baja temperatura ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) son útiles para la calefacción de edificios y procesos industriales y agrícolas (Dickson y Fanelli, 2003).

Los recursos geotermales utilizados para generar electricidad están presentes principalmente en reservorios altamente fracturados ubicados en áreas de vulcanismo activo o reciente, generalmente a $500\text{-}1500\text{ m}$ de profundidad. Su temperatura puede estar en el rango $250\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Dickson y Fanelli, 1990) y para identificarlos es indispensable caracterizar los principales elementos de un sistema geotermal (SG): la fuente de calor, el reservorio, el sello y el fluido portador (Moeck, 2014).

El fluido portador (aguas meteóricas o subterráneas) transfiere el calor desde el subsuelo a la superficie penetrando rocas con alta porosidad y permeabilidad, con fallas y fracturas, hasta que desciende y obtiene calor de forma directa o indirecta (convección o conducción) de un volumen de rocas calientes (reservorio), el cual está conectado a una o varias fuentes de calor y a zonas de recarga y descarga de fluidos acuosos. Este calor es almacenado por la presencia de rocas poco permeables que constituyen el sello del sistema (Dickson y Fanelli, 2003).

En estos ambientes ocurren cambios en la textura y mineralogía de las rocas, debido a su interacción con los fluidos acuosos químicamente activos y sus condiciones de presión, temperatura y composición, cambios que se conocen como alteraciones hidrotermales; que

pueden implicar el reemplazo de vidrio y minerales primarios con minerales de alteración estables a temperaturas de 50-400 °C. Este proceso de alteración hidrotermal en ocasiones es conocido como metamorfismo o metasomatismo de bajo grado y es una característica común de los sistemas geotérmicos. Las texturas de alteración van desde la alteración débil de solo algunos minerales o la masa fundamental hasta el reemplazo completo de los minerales primarios (Stefánsson y Kleine, 2018). Por lo anterior, la caracterización de minerales de alteración hidrotermal es un elemento clave en el reconocimiento de un recurso geotermal, ya que el análisis de las características texturales, mineralógicas y de paragénesis mineral permite estimar las condiciones fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos en el subsuelo y la evolución temporal del sistema (Fulignati, 2020).

Los SG pueden encontrarse en regiones con gradientes termales normales (de 2.5 a 3 °C/100 m) o ligeramente anómalos, especialmente alrededor de márgenes de placas donde los valores pueden ser más altos (Moeck, 2014). En los sistemas geotérmicos se encuentran manifestaciones superficiales como volcanes de lodo, fumarolas, géiseres, manantiales hidrotermales, zonas alteradas o suelos calientes, entre otros (OLADE, 1994), como es el caso del municipio de Paipa, Boyacá, reconocido por sus manantiales termales (Navia y Barriga, 1929), donde se planteó la existencia del Sistema geotérmico de Paipa (SGP) (Velandia y Cepeda, 2004, en Alfaro, Matiz, Rueda-Gutiérrez, Rodríguez, González, Beltrán, Rodríguez y Malo, 2017), ya que la zona cuenta con una fuente definida de calor magmático, zona de recarga y rocas sedimentarias con edades del cretácico y paleógeno así como rocas de basamento que podrían constituir el reservorio del fluido geotérmico (Alfaro et al., 2017).

Por consiguiente, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha venido elaborando el modelo conceptual del SGP que busca aclarar las características de los elementos principales que componen el sistema y que incluye una representación geológica-geofísica en tres dimensiones de un espacio de 130 km² delimitado y nombrado área geotérmica de Paipa (AGP) (Velandia, 2003). Además, integra datos de geología, geoquímica de roca, geocronología (Bennett et al. 2016), densidad, susceptibilidad magnética, magnetotelúrica, e información complementaria de geoquímica de fluidos y alteración hidrotermal.

Según las características del modelo conceptual del AGP sumadas a la localización estratégica de Paipa y las actividades industriales en la región, los usos del calor geotérmico de mayor impacto y significado para las comunidades en el área de influencia serían las aplicaciones directas tales como calefacción de espacios, refrigeración, deshidratación de frutas, agricultura, acuicultura, invernaderos y otros procesos industriales como la pasteurización de lácteos (Martínez, 2013; Robles y Romero, 2019; Aviña et al., 2018; Torres, 2015).

Esta tesis, financiada por la Convocatoria 733 de 2015 de la Gobernación de Boyacá y administrada por COLCIENCIAS (reestructurado posteriormente a Minciencias-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación) busca contribuir al conocimiento del Modelo Geotérmico de Paipa, específicamente, en la caracterización de minerales de alteración hidrotermal relacionados con la actividad del SGP en domos y depósitos volcánicos expuestos en superficie para el mejor entendimiento de los procesos de interacción agua-roca que han tenido lugar; consolidando una propuesta integrada de la mineralogía de alteración en el área de estudio.

En este documento se presentarán los resultados de la caracterización de los minerales de alteración en rocas y depósitos de las unidades volcánicas en varios sectores del AGP, realizada mediante análisis de petrografía, difracción de rayos X (DRX) y química mineral con la microsonda electrónica EPMA-JEOL JXA-8230; los antecedentes de esta investigación; el marco geológico de la región; los datos y la metodología empleada; los resultados obtenidos; una discusión respecto al tema y las conclusiones derivadas de la investigación.

1. Generalidades

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Caracterizar los minerales de alteración en zonas de domos y depósitos piroclásticos del área geotérmica de Paipa como aporte al entendimiento de las condiciones fisicoquímicas de la actividad hidrotermal.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir la composición mineralógica de las rocas mediante análisis petrográficos, de química mineral y difracción de rayos X (DRX).
- Caracterizar geomecánicamente los afloramientos de litologías volcánicas con alteraciones hidrotermales en secciones del sector Alto de los Godos.
- Definir la mineralogía de alteración de las rocas volcánicas en superficie en algunos puntos del área geotérmica de Paipa.

1.2 Localización del área de estudio

El área geotérmica de Paipa (AGP) está ubicada en la parte central de la cordillera Oriental, en el departamento de Boyacá, al sur del municipio que la denomina y a 180 km de la capital del país. Está definida dentro de un polígono con las siguientes coordenadas del sistema WGS84: latitud: 5.804886°; longitud: -73.194577°; y latitud: 5.549358°, longitud: -72.907433°) y se encuentra en un rango de alturas de 2500 a 2700 m s. n. m. en el piso térmico frío, con temperaturas que varían entre 7 °C y 20 °C (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, 2005). Algunos rasgos geológicos y fisiográficos que la delimitan son: el anticlinal de Tibasosa-Toledo al SE, el Lago de Sochagota al N y el Pantano de Vargas y el Alto de los Volcanes al NW (Velandia y Cepeda, 2004) (Figura 1-1). Comprende las zonas del Alto de los Godos, Quebrada Honda, Venta del Llano-Matarredonda, Rincón de Vargas y El Durazno, y en ella se observan manantiales termales con aguas sulfatadas de elevada salinidad con beneficios terapéuticos, utilizadas en una floreciente industria turística.

Esta investigación se enfoca en las zonas Alto de Los Godos, Venta del Llano-Matarredonda (cantera de ALFAGRES), Rincón de Vargas (cantera CEMEX) y El Durazno, donde se han cartografiado domos, y depósitos piroclásticos y en cuyos afloramientos se encontraron las mejores características para el muestreo. El acceso a estas zonas de interés geotérmico desde la ciudad de Bogotá es fácil, ya que la conexión vial Bogotá-Paipa se encuentra en óptimas condiciones y pese a que las carreteras del municipio están destapadas, permiten la movilidad entre la cabecera municipal y los lugares mencionados.

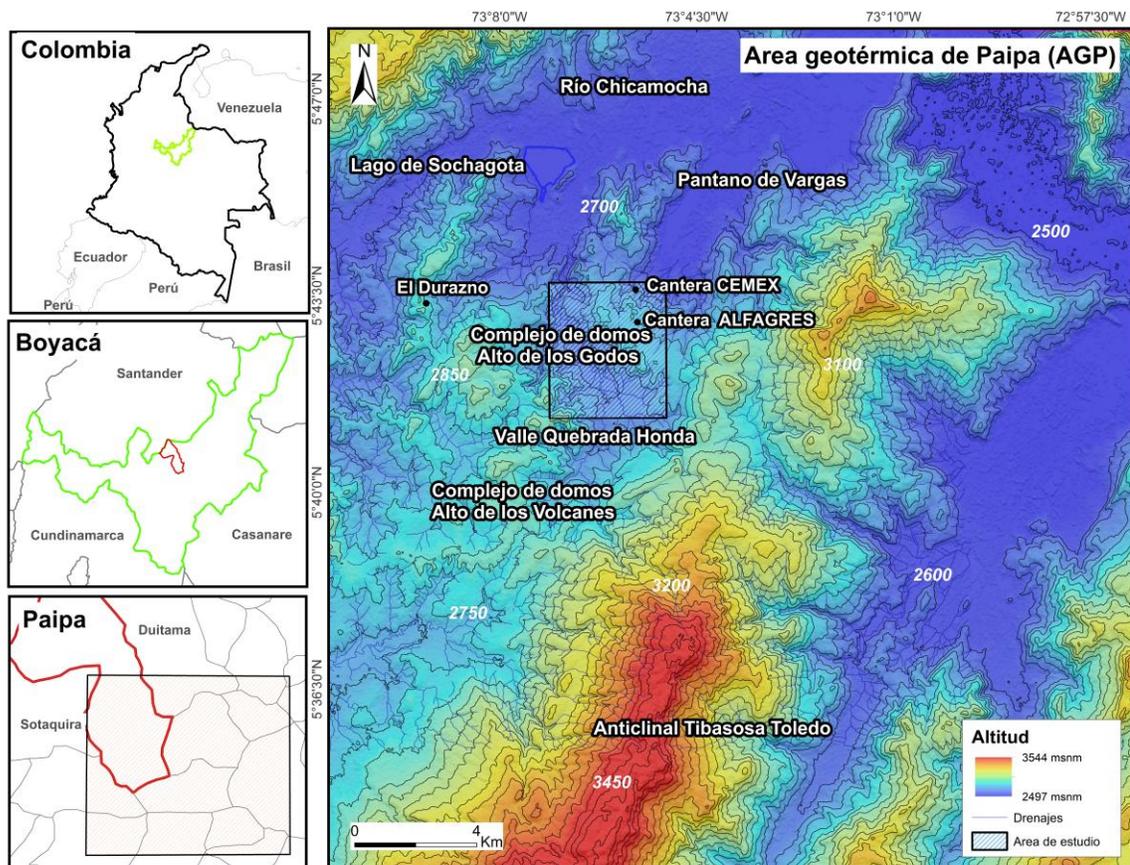


Figura 1-1: Mapas de localización del área de estudio.

Mapa 1: localización de Boyacá en Colombia. Mapa 2: localización del municipio de Paipa en Boyacá. Mapa 3: localización del área de estudio con respecto a Paipa y Mapa 4: geografía del área de estudio. Elaborado a partir de los datos de las planchas 171IVC y 171IVD (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y Velandia (2003).

2. Marco geológico regional

El AGP se encuentra en el ambiente compresivo de la cordillera Oriental entre las fallas Boyacá y Soápaga, donde el basamento está compuesto por rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico; ígneas intrusivas y extrusivas del Jurásico, que forman el macizo de Floresta al NE de Paipa (Velandia, 2003); sedimentarias jurásicas que afloran en estructuras regionales como el anticlinal de Arcabuco; y sobre él secuencias sedimentarias de edades cretácicas, paleógenas y neógenas (Velandia, 2003) (Figura 2-1).

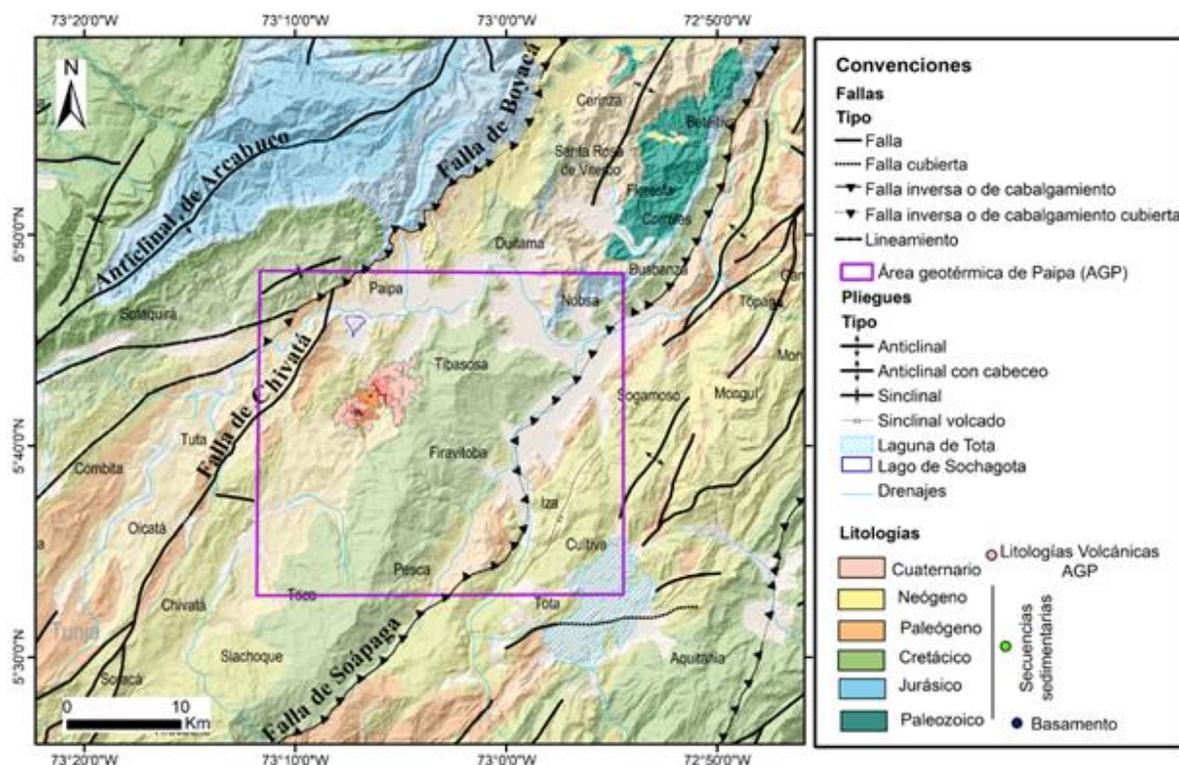


Figura 2-1: Mapa geológico regional Modificado de Gómez et al. (2015).

En los sectores del Alto de los Godos, Alto de los Volcanes y Quebrada Honda hay rocas volcánicas félsicas (riolitas alcalinas y traquitas) (Cepeda y Pardo, 2004), cuerpos ígneos con textura porfirítica y geoformas dómicas (Rueda-Gutiérrez, 2017) (Figura 2-2). En la zona de cruce de las fallas Paipa-Iza y Canocas, sector El Durazno, hay depósitos descritos como una brecha hidrotermal (Velandia, 2003; Alfaro et al., 2017) caracterizada por intensas alteraciones hidrotermales (argílica y argílica avanzada) y un contenido relativamente elevado de elementos radiactivos, medidos en núcleos de perforaciones de 50 y 100 m de profundidad (Rodríguez y Alfaro, 2015).

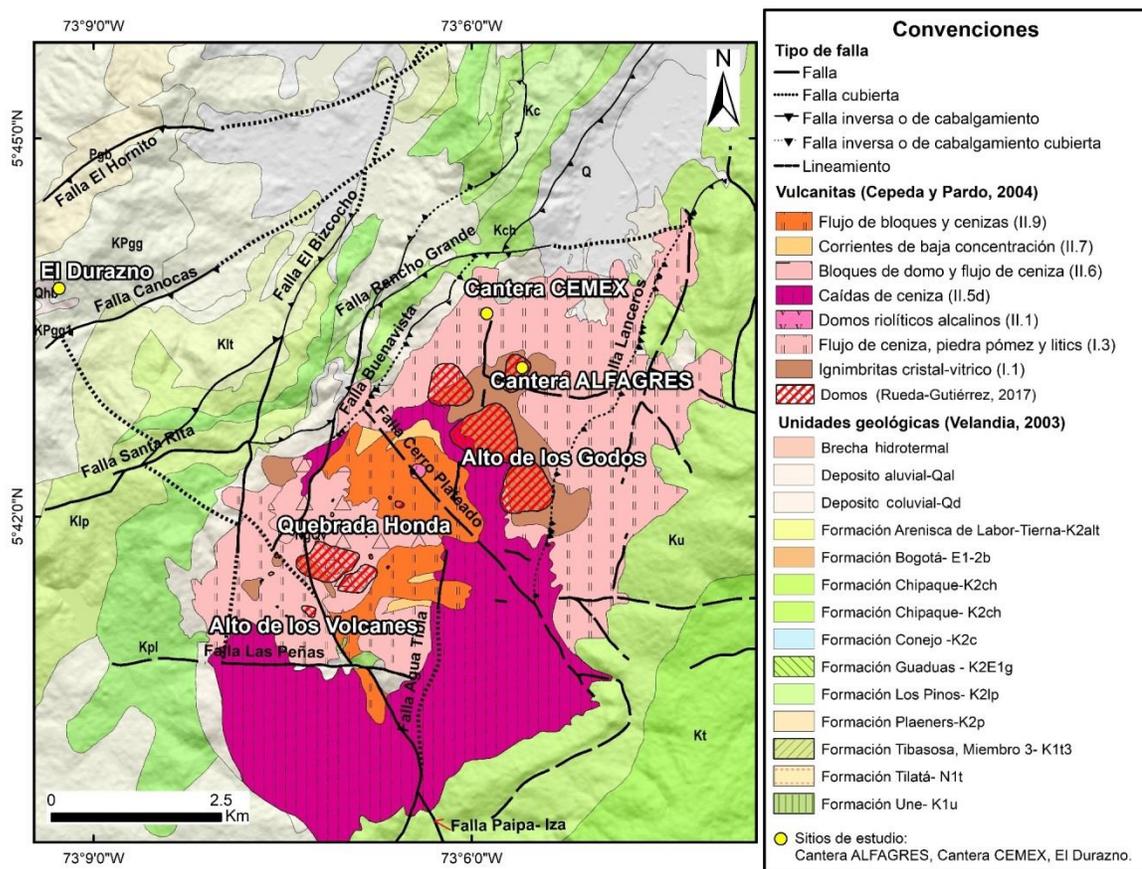


Figura 2-2: Mapa geológico del AGP

Modificado de Rueda-Gutiérrez (2017), Gómez et al. (2015), Cepeda y Pardo (2004) y Velandia (2003).

2.1 Geología estructural

Los lineamientos estructurales del área están relacionados a fallas de edades de actividad variable (Velandia, 2003, en Alfaro et al., 2017), como las fallas Soápaga y Boyacá que controlan la actividad del área dentro de tres sistemas de fracturamiento (Figura 2-3). El primero, con dirección NNE, está trazado por las fallas El Bizcocho, El Batán, Rancho Grande, Buenavista, Agua Tibia y Lanceros, y tiene dos estilos estructurales: uno que afecta tanto el basamento como la cobertera sedimentaria y otro que se restringe a la cobertera (Velandia, 2003).

El segundo sistema con dirección NW y en el que sobresalen las fallas Cerro Plateado y Paipa-Iza, fallas de basamento de carácter normal relacionadas a una fase distensiva y reactivadas durante la orogenia Andina, que parecen facilitar el paso de los fluidos hidrotermales e incluso, han favorecido el ascenso de magmas (Velandia, 2003). Finalmente, el tercer sistema con dirección NE comprende las fallas el Hornito, Canocas y Santa Rita (Velandia, 2003). En la Tabla 2-1 se presenta un resumen de la descripción e interpretación realizada por Velandia (2003) de las principales fallas de estos tres sistemas de fracturamiento.

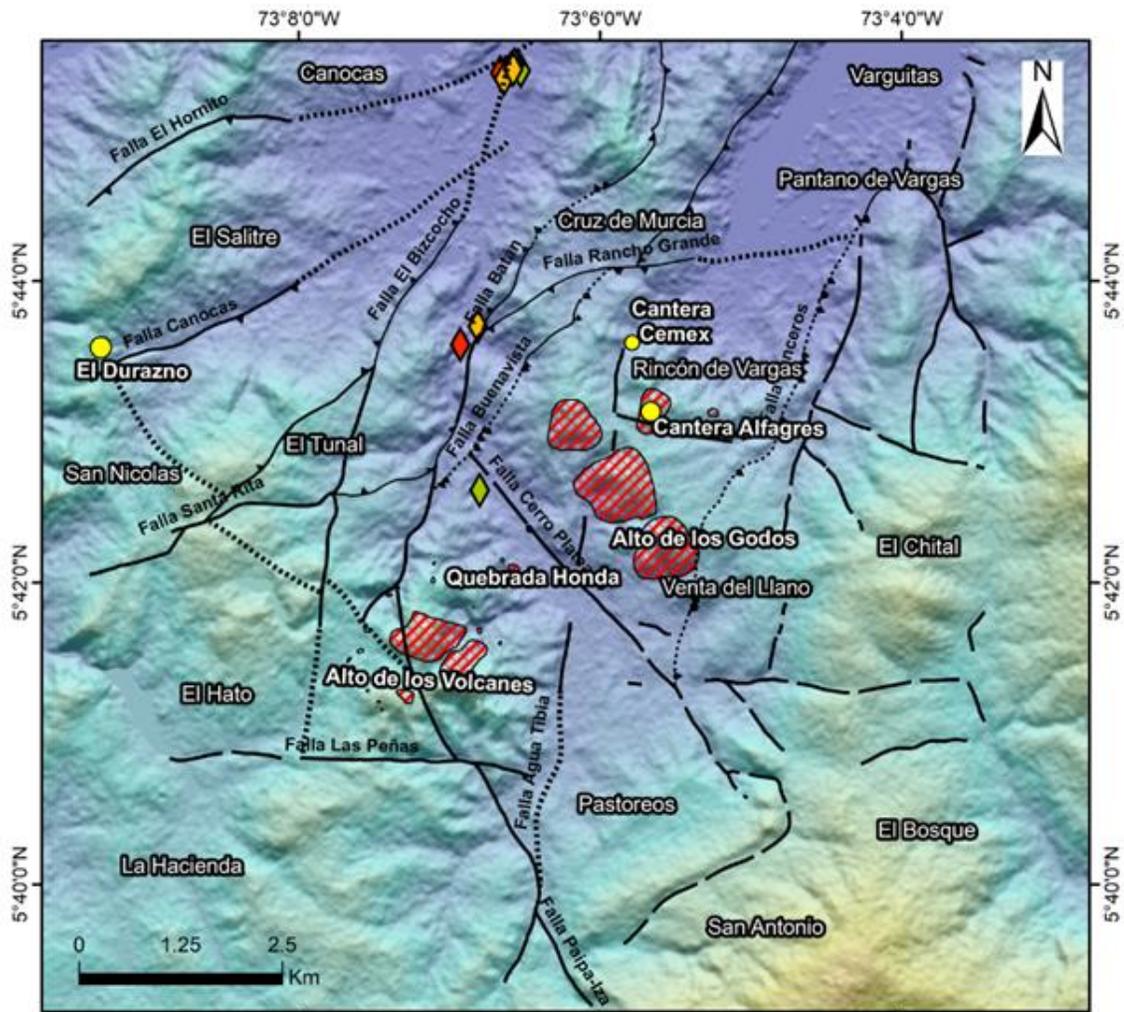


Figura 2-3: Principales sistemas de fracturamiento del AGP

Nota. Los polígonos con achurado rojo representan las áreas donde se han cartografiado varios domos, las líneas negras las principales fallas y los rombos marcan la ubicación de los manantiales termales. Se pueden observar los tres sistemas de fracturamiento: el primero representado por las fallas el Bizcocho, El Batán, Agua Tibia y Lanceros en dirección NE; el segundo con lineamientos en dirección NW e integrado por las fallas Cerro Plateado y Paipa-Iza; y el tercero en dirección NE integrado por las fallas el Hornito, Canocas y Santa Rita. Se incluyen los nombres de veredas y localidades relevantes. Modificado de Velandia (2003) y Rueda-Gutiérrez (2017).

Tabla 2-1: Fallas geológicas del AGP

Primer sistema de fracturamiento		
Falla	Descripción	Interpretación
El Bizcocho	Falla de cabalgamiento con rumbo NNE inclinada hacia el este.	Estas fallas tienen dos estilos estructurales: 1) <i>thick skin</i> , asociado a las fallas de Lanceros y Agua Tibia, que en el basamento paleozoico se comportaron como fallas de retrocabalgamiento asociadas a la falla Soápaga. La zona limitada entre estas dos fallas genera un bloque hundido en sentido longitudinal, con continuidad en el actual Pantano de Vargas que al sur está parcialmente lleno por depósitos volcánicos del Plio-Pleistoceno. 2) Estilo <i>thin skin</i> , asociado a las fallas El Bizcocho y El Batán. Esta última es la más distal de un abanico imbricado de cabalgamientos que tienen despegue en la base de la formación Plaeners y se desprenden de la falla de Boyacá.
El Batán	Falla de tipo cabalgamiento con orientación NNE, muy paralela a la falla el Bizcocho, e inclinación hacia el E. Su segmento norte tiene rumbo N-S. A lo largo de esta estructura y de la falla El Bizcocho se encuentran las principales manifestaciones termales (manantiales y la fumarola de la Quebrada Honda) Esta estructura ha presentado desplazamientos neotectónicos. (Alfaro et al., 2005).	
Buenavista	Falla con rumbo NE que se conecta al sur con la falla el Batán y al norte con la falla Rancho Grande. Estructura de cabalgamiento inclinada al NW y trazo desplazado ~200 m por la falla Rancho Grande.	
Agua Tibia	Falla inversa inclinada al W con rumbo ~N-S y trazo rectilíneo discontinuo, interrumpido localmente por fallas transversales. Está mayormente cubierta por depósitos volcánicos.	
Lanceros	Falla con rumbo NE, de tipo inverso que regionalmente actúa como un retrocabalgamiento de la falla de Soápaga que se encuentra al oriente de la falla Lanceros.	
Segundo sistema de fracturamiento		
Cerro Plateado	Tiene rumbo NW, controla el valle de la Quebrada Honda y su trazo intercepta las fallas longitudinales de Buenavista y El Batán.	Estructuras de basamento relacionadas a una fase tectónica previa de tipo distensivo, que se reactivaron localmente durante la orogenia Andina, conservando su carácter de fracturas abiertas, lo que facilitó el paso de fluidos hidrotermales; en especial la falla Paipa-Iza que tendría continuidad por debajo de la secuencia sedimentaria con estilo estructural <i>thin skin</i> hasta interceptar la falla Boyacá
Paipa-Iza	Estructura profunda con rumbo NW que se extiende hasta el cuerpo volcánico de Iza.	
Tercer sistema de fracturamiento		
Falla	Descripción	Interpretación
El Hornito	Estructura de rumbo con orientación NE y movimiento lateral dextral.	Se infiere que son el sistema de fallas más recientes de la zona, ya que afectan a otras fallas como El Bizcocho y El Batán.
Canocas	Falla de rumbo paralela a la falla El Hornito y movimiento dextral.	
Santa Rita	Falla de cabalgamiento con orientación ENE y movimiento lateral dextral.	

Elaborado a partir de Velandia (2003).

2.2 Estratigrafía

La zona axial de la cordillera Oriental cuenta con una predominancia de unidades sedimentarias del Jurásico, Cretácico y Paleógeno, además de litologías volcánicas (Renzoni, Rosas y Etayo, 1998). El basamento está formado por rocas metamórficas (filitas, esquistos y gneises) con intrusiones ígneas paleozoicas (Ulloa, Rodríguez y Rodríguez, 1998) y, posiblemente, rocas sedimentarias del Paleozoico (Devónico-Carbonífero), como las formaciones Tibet (Cediél, 1969), Floresta y Cucho (Botero, 1950).

En cuanto al AGP las rocas de basamento están cubiertas por secuencias sedimentarias del Cretácico y Paleógeno. A continuación, en la Tabla 2-2 se presenta una breve descripción de las principales unidades geológicas aflorantes en esta área, desde la más antigua hasta los depósitos más recientes:

Tabla 2-2: Unidades estratigráficas del AGP

Unidad estratigráfica	Descripción
Formación Tibasosa (K1t)	Al SE de Paipa solo aflora el miembro calcáreo superior (Kmt1); compuesto por lutitas color gris oscuro, calizas y areniscas, ricas en restos fósiles, con un espesor de 132 a 150 m.
Formación Une (K1u)	Se encuentra hacia el oriente del AGP. Consiste en cuarzo arenitas de grano fino a grueso con intercalaciones de lodolitas.
Grupo Churuvita (Kch)	Se localiza hacia el oriente del área en valles de pendientes suaves y la constituyen cuarzo arenitas con intercalaciones de lutitas negras, calizas y limolitas silíceas.
Formación Plaeners (Kpl)	Forma parte del Grupo Guadalupe, está distribuida en el Altiplano Cundiboyacense y la componen limolitas silíceas en capas finas y medias con algunas intercalaciones de fosforitas y lutitas.
Formación Los Pinos (K2lp)	Predominan paquetes blandos de limolitas negras, verdes y grises con intercalaciones de areniscas cuarzosas en capas medias a delgadas en estratificación ondulada paralela y algunos niveles presentan ichnofósiles.

Formación Labor y Tierra (K2t)	Se presenta con una morfología de lomas con capas medias a muy gruesas de arenisca cuarzosa de grano grueso a fino, redondeado a subredondeado; madura y friable.
Formación Guaduas (KPgg)	Está distribuida de regionalmente sobre la cordillera Oriental y aflora en la zona como arcillolitas y limolitas de colores violeta, gris y crema, en capas medias a muy gruesas con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino en capas medias a muy delgadas y con presencia de abundantes mantos de carbón.
Formación Bogotá (Pgb)	Aflora en los cerros al W de Paipa y S de la termoeléctrica. Está constituida por areniscas cuarzosas en capas delgadas a gruesas. Son friables e inmaduras intercaladas con capas medias de limolitas y arcillosas de color gris: presentan abundantes óxidos rojizos.
Formación Tilatá (NgQt)	Aflora en las partes bajas cerca al Lago de Sochagota con una morfología suave hacia E de la Casona (Cruz de Murcia). Se compone de niveles arenosos en capas medias a gruesas, intercalada con limolitas y arcillolitas.
Vulcanitas	Las litologías volcánicas están representadas por rocas de composición ácida (riolitas alcalinas y traquitas) en domos (Rueda-Gutiérrez, 2017) y depósitos volcanoclásticos del Plioceno-Pleistoceno, agrupados por Cepeda y Pardo (2004). En el sector Rincón de Vargas-cantera CEMEX, se encuentran depósitos de corrientes de densidad piroclástica.
Brecha hidrotermal	Se trata de un material anómalo por su exposición en medio de limolitas y carbones de la Formación Guaduas. Es explotado como fuente de puzolanas en la cantera de El Durazno conocida coloquialmente como “el intrusivo de El Durazno” (Rodríguez y Alfaro, 2015).
Cuaternario	Depósitos aluviales, lacustres y fluvio-lacustres. Se encuentran extendidos en la depresión que marca el nacimiento del río Chicamocha, incluyendo zonas bajas como la del Pantano de Vargas, Lago Sochagota y El Salitre al sur de Paipa. Litológicamente corresponden a arenitas, limolitas, arcillolitas y conglomerados.

Elaborado a partir de Ulloa et al. (1998), Renzoni et al. (1998), Botero (1950), Velandia (2003), Cepeda y Pardo (2004), Rodríguez y Alfaro (2015), Suárez (2016) y Rueda-Gutiérrez (2017).

En resumen, el entorno geológico se divide en dos dominios, una secuencia sedimentaria gruesa al oeste y noroeste con edades que van desde el Cretácico al Cuaternario y en el centro y noreste el complejo volcánico que incluye domos riolíticos (Velandia, 2003; Rueda-Gutiérrez, 2017).

2.3 Vulcanología

El vulcanismo en Colombia se desarrolló principalmente en las cordilleras Central y Occidental por la subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramericana, a lo largo de la margen del Pacífico. No obstante, durante el Plioceno-Pleistoceno ocurrió actividad en la cordillera Oriental, posiblemente favorecida por un fallamiento profundo, que dio origen al

campo volcánico de Paipa-Iza (Bernet et al. 2016), cuyas litologías volcánicas se emplazaron sobre aquellas sedimentarias del Cretácico tardío. El vulcanismo de Paipa abarca principalmente productos efusivos asociados a domos de lava, algunos de ellos con depósitos piroclásticos asociados (Cepeda y Pardo, 2004; Suárez 2016), cuyas edades se han estimado a partir de análisis geocronológicos por métodos de datación Ar / Ar, K/Ar, U/Pb y huellas de fisión en circones. El sector Alto de los Volcanes (Olitas) se data del Pleistoceno (2.1-2.4 Ma; Pardo 2004) y según Bernet et al. 2016 a partir del estudio de las dos épocas eruptivas del campo volcánico Paipa-Iza (Cepeda y Pardo, 2004) la actividad volcánica estaría limitada en el rango de 5.9 Ma a 1.8 Ma indicando cuatro millones de años de actividad. Por otro lado, a partir de las dataciones hechas en depósitos piroclásticos mediante huellas de fisión Bernet et al. (2016) encontró componentes de edades entre 2.8 a 3.8 Ma, 9.9 Ma, 231 Ma; y por el método U-Pb en el rango de (2.21- 5.93 Ma).

El AGP esta dividida en tres sectores: Alto de Los Volcanes, Quebrada Honda Grande y el Alto de los Godos (Figura 2-4) de acuerdo con la integración de los estudios de (Ferreira y Hernández, 1988; Hernández y Osorio, 1990; Garzón, 2003; Suárez, 2016 realizada por Rueda-Gutiérrez (2017) quien agrego la unidad de domos en el sector Alto de los Godos.

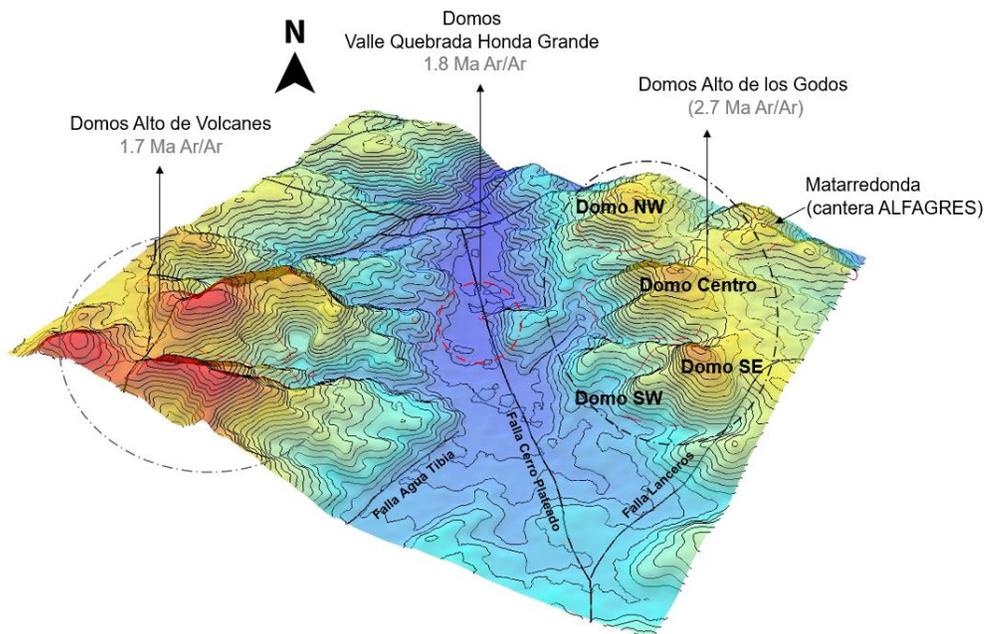


Figura 2-4: Detalle del área donde afloran los cuerpos intrusivos del AGP.
Elaborado a partir de Velandia (2003) y Rueda-Gutiérrez (2017)

Según los estudios geomorfológicos, los datos petrográficos, geoquímicos y la información geocronológica de Rueda Gutiérrez (2017, 2020) el sector Alto de los Volcanes se caracteriza por presentar cuatro elevaciones geomorfológicas con afloramientos de rocas fuertemente meteorizadas con texturas de grandes fenocristales potásicos dentro de una masa fundamental blanca, mientras en sector Quebrada Honda se distingue por presentar una estructura dómica con texturas de rocas con predominio de megacristales sobre la masa fundamental. Por otro lado, el sector del Alto de los Godos interpretado anteriormente como ignimbritas producto del volcanismo del primer episodio de la actividad del volcán de Paipa (Cepeda y Pardo 2004) es caracterizado por Rueda Gutiérrez (2017) por cinco cuerpos dómicos con texturas porfiríticas y cristales de feldestapos, rodeados por ignimbritas que según correlaciones en campo posiblemente fueron intruidas durante el emplazamiento de los domos. En general, los cuerpos dómicos del AGP presentan características petrográficas y químicas similares clasificándolos como riolitas/traquidacitas, con firma química de magmas subcalinos de la serie calcoalcalina rica en potasio típico de arcos volcánicos.

La actividad en este complejo (Figura 2-5) comenzó, posiblemente, en el sector Alto de los Volcanes con erupciones explosivas hace 9.9 y 6.9 Ma (Bernet et al. (2016); Rueda-

Gutiérrez, 2017). Éstas generaron flujos piroclásticos que se distribuyeron y formaron los depósitos en dirección NE hasta el Pantano de Vargas, pues para ese momento la elevación del Alto de los Godos no existía como barrera geográfica. Las erupciones continuaron durante aproximadamente 4 Ma y hace 2.7 Ma los domos del sector Alto de los Godos fueron emplazados —debido al ascenso de magmas favorecido por la reactivación de las fallas profundas Cerro Plateado y Agua Tibia— que cortaron la sucesión de depósitos piroclásticos en algunos sectores (Rueda-Gutiérrez, 2017).

La actividad de las fallas continuó y con ella la actividad volcánica, y hace 1.8-1.7 Ma entre el Alto de los Volcanes y Quebrada Honda, se emplazaron otros domos. Hasta que, finalmente, una nueva erupción en el Alto de los Volcanes generó el colapso de los domos y desencadenó flujos de bloques y cenizas.

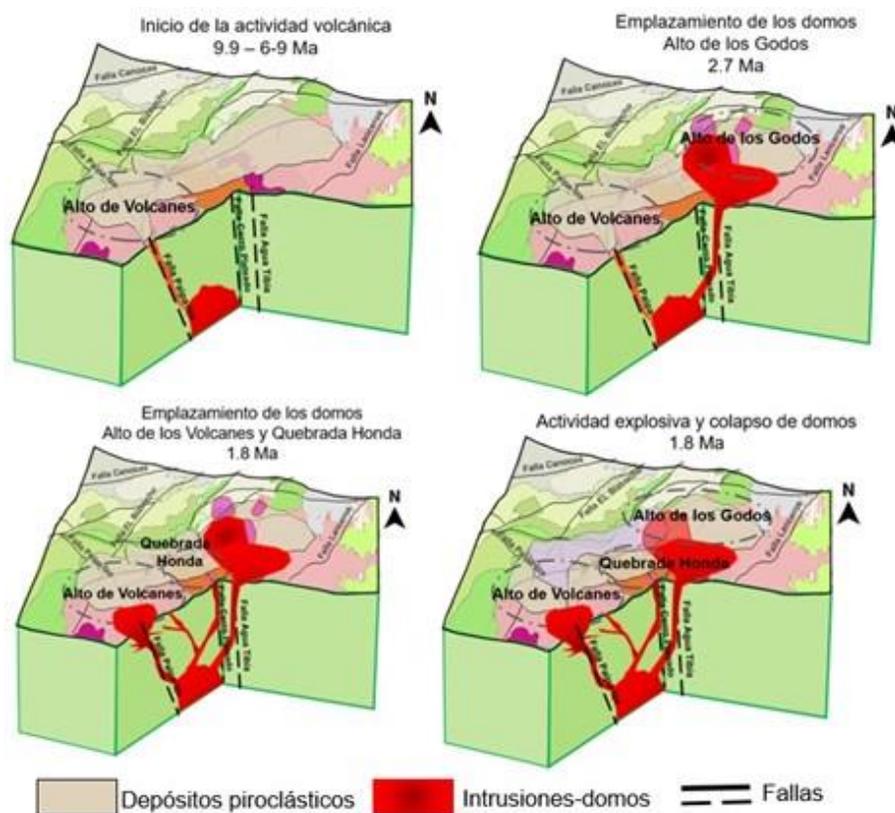


Figura 2-5: Etapas principales de la actividad volcánica del complejo Paipa Adaptado de Rueda-Gutiérrez (2017).

Las dataciones indican que los cuerpos dómicos de estos sectores tienen edades en el rango del Plioceno al Pleistoceno (Tabla 2-3) y comparten características petrográficas. Pues, en su mayoría, presentan megacrystales de feldespato potásico, cristales máficos (biotita-anfíbol) de tamaños pequeños, masa fundamental alterada y espacios vacíos dejados por la remoción de cristales (Rueda-Gutiérrez, 2017).

Tabla 2-3: Edades de los cuerpos intrusivos del SGP

Domo	Edades (Ar/Ar)
Alto de los Volcanes	1 ± 0.25 Ma, y 2.6 ± 0.7 Ma
	1.76 ± 0.002 Ma
Alto de los Godos	2.71 ± 0.0025 , 2.6 ± 0.0021 2.80 ± 0.031
Quebrada Honda	1.81 ± 0.024 Ma

Adaptada de Rueda-Gutiérrez (2017).

Respecto a los depósitos piroclásticos en el área de la cantera CEMEX (Rincón de Vargas) se ha referenciado una datación mediante huellas de fisión (3.8 ± 0.1 y 9.9 ± 0.1) en el sector Guarrúz (Bernet et al, 2016). Según la interpretación de Suárez (2016) los depósitos piroclásticos de CEMEX y ALFAGRES (sector Matarredonda-Venta del Llano) representan eventos eruptivos explosivos a 2.21 Ma relacionados con un vulcanismo monogenético de composición acida intermedia, representada por múltiples etapas eruptivas generando depósitos de corrientes de densidad piroclásticas (CDP). Esto le permitió al autor descartar la existencia de una fuente central (volcán de Paipa) con depósitos piroclásticos asociados a un colapso caldérico, como fue originalmente propuesto por Cepeda y Pardo (2004) y Pardo et al. (2005).

3. Marco teórico

3.1 Energía geotérmica

El calor interno de la Tierra, motor de los procesos del ciclo tectónico y de una parte del ciclo de las rocas, proviene parcialmente del calor primordial almacenado en el núcleo desde las etapas tempranas de formación del planeta y de la descomposición de elementos radiactivos (Fletcher, 2017). El calor geotérmico fluye desde el interior profundo del planeta a tasas extremadamente lentas, favorecidas por las propiedades reológicas del manto y la litósfera que actúan también como barreras aislantes, mediante cuatro procesos de disipación: conducción, convección, advección y radiación. La conducción, muy eficiente en los metales, es la forma dominante de transferencia calórica en el núcleo terrestre. La convección domina en el manto, debido a su naturaleza dúctil que facilita el flujo de material, ya sea unidireccionalmente o en forma de celdas cíclicas. La advección actúa cuando los materiales se mueven de modo diferente, por ejemplo, durante el ascenso o descenso isostático, la exhumación tectónica o el ascenso de magma. Finalmente, la radiación es el principal mecanismo de disipación térmica desde la superficie terrestre hacia el espacio (Winter, 2014).

La variación de la temperatura con la profundidad se conoce como gradiente geotérmico, el cual ha sido calculado, modelado y medido a través de observaciones geológicas, geofísicas, geoquímicas y experimentales. De manera que, a profundidades mayores a 300 km, el flujo convectivo adiabático resulta en un gradiente lineal de aproximadamente 0.3 °C/km (equivalente a 10 °C/Gpa). A niveles más superficiales ($< 300\text{ km}$ de profundidad), el gradiente geotérmico cambia de acuerdo con el tipo de corteza: en las áreas continentales puede variar desde $4\text{-}6\text{ °C/km}$ (base de la corteza en escudos antiguos) hasta $12\text{-}18\text{ °C/km}$ (parte media-superior de la corteza); mientras que en áreas oceánicas el gradiente profundo corresponde a 7 °C/km y acentuándose en zonas superficiales con valores en el rango $17\text{-}20\text{ °C/km}$ (Winter, 2014).

En regiones someras de la corteza, el promedio calculado es de $2.5\text{-}3\text{ °C}/100\text{ m}$. Esto implica que, a una profundidad de 3000 m , la temperatura es de $90\text{-}105\text{ °C}$, mientras que a 2000 m

desciende a 65-75 °C (Geothermal Energy Association-GEA, 2012). Sin embargo, hay regiones con gradientes geotérmicos alejados de estos promedios, como las cuencas sedimentarias jóvenes, donde puede ser menor a 1 °C/100 m, o las llamadas “áreas geotermales” y zonas volcánicas, donde es diez veces mayor (Dickson y Fanelli, 2003).

Debido al tamaño, la temperatura y la dinámica del núcleo terrestre, además de la extraordinaria capacidad de disipación calórica lenta, pero constante en el manto y la litósfera; se puede afirmar que la energía térmica de la Tierra es inmensurable y prácticamente inagotable. Aunque su uso se ha restringido a zonas donde las condiciones geológicas permiten la concentración del calor geotérmico en el agua y su transporte hacia la superficie terrestre (Grant y Bixley, 2011; Dickson y Fanelli, 2003). No obstante, las técnicas de intercambio geotérmico como los circuitos cerrados de agua y las bombas de calor, instalados arriba de perforaciones someras o enterrados a muy poca profundidad, extienden su uso a otros territorios; bien sea para satisfacer necesidades de calefacción, refrigeración, producción de agua caliente sanitaria o para generar electricidad (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía-IDAE, 2008). Esto depende del tipo de recurso geotérmico que se alberga en el ambiente geológico, en otras palabras, de las características del sistema geotérmico.

3.2 Tipos de recursos geotérmicos

Se pueden clasificar como: (1) convectivos, sistemas hidrotermales dominados por líquidos y/o vapor; (2) conductivos, sistemas dominados por roca caliente y magma, que contienen un amplio rango de temperaturas; y (3) de acuíferos profundos, sistemas con fluidos circulantes en medios porosos o zonas de fractura a profundidades de hasta 3 km, para los cuales no se identifica una fuente calor magmática (también llamados sistemas geotérmicos mejorados-EGS por la denominación en inglés *enhanced geothermal systems*) (Goldstein et al., 2011). A continuación (Tabla 3-1), se presentan las principales características de estos recursos en función de su temperatura y aplicación:

Tabla 3-1: Tipos de recursos y aplicación

Tipo de recurso		Temperatura	Uso
Sistemas convectivos (hidrotermal)	Continental	Alta (> 180 °C), Intermedia (180-100 °C) Baja (< 100 °C)	Directo y eléctrico
	Submarino	Alta (> 130 °C)	Tiene potencial eléctrico
Sistemas conductivos	Somero (< 400m)	Baja (< 100 °C)	Directo y GHP*
	Roca seca caliente	Alta (> 130 °C) Intermedia (130-100 °C)	Prototipos, potencial eléctrico y directo
	Cuerpos de magma	Alta (> 180 °C) Baja (< 100 °C)	Eléctrico
Sistemas acuíferos	Acuíferos hidrostáticos y geo-presurizados	Alta (> 130 °C) Intermedia (130-100 °C) Baja (< 100 °C)	Directo y potencial eléctrico

Elaborado a partir de Goldstein et al. (2011)

3.3 Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos se componen de tres elementos principales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido portador de calor (Dickson y Fanelli, 2003). La fuente puede ser una inyección magmática a muy alta temperatura (600 °C) que ha alcanzado profundidades relativamente someras (5 a 10 km), pero el calor también puede provenir de la compresión-enterramiento en cuencas sedimentarias, en cuyo caso el sistema es controlado por el gradiente geotermobarométrico. El reservorio es un volumen de rocas permeables y calientes que puede estar conectado a una o varias áreas de recarga superficial, y el fluido portador es en su mayoría agua meteórica que se infiltra en profundidad a través de fallas, desciende y se calienta directa o indirectamente por la fuente (Dickson y Fanelli, 2003).

Los fluidos acuosos se pueden encontrar en fase líquida (en forma de agua clorurada, clorurada sódica, sulfatada ácida o bicarbonatada) o en fase vapor como gases geotérmicos reactivos (vapor de agua, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, nitrógeno, metano, monóxido de carbono o hidrógeno) y gases inertes o conservativos (Alfaro, 2005). La energía calorífica transportada por los fluidos geotérmicos hacia los niveles superiores de la corteza puede ser almacenada en la roca o en acuíferos localizados a veces a decenas de kilómetros de profundidad (reservorios) cubiertos por un sello superior o *cap rock*, el cual puede estar constituido de rocas, depósitos o materiales no litificados de ambientes sedimentarios y volcánicos. Esta unidad presenta baja permeabilidad o conductividad termal

que permite aislar el calor de los fluidos en cierto nivel litoestratigráfico y concentrar el vapor, los líquidos o los fluidos térmicos en ubicaciones específicas espacialmente restringidas tanto en la vertical como en la horizontal (Moeck, 2014).

A veces los SG se manifiestan en superficie en forma de volcanes de lodo, fumarolas, géiseres, manantiales hidrotermales, zonas alteradas o suelos calientes, entre otros (OLADE, 1994). Estas áreas muestran los efectos de las reacciones químicas en las rocas y en el suelo y dan idea de los procesos que pueden actuar y de los productos que resultan, como las alteraciones hidrotermales. En muchas áreas se pueden observar secciones geológicas que muestran rocas y depósitos alterados (textura y mineralogía cambiadas) y se evidencia el carácter local o extendido de las zonas que han sido afectadas. El estudio de las alteraciones hidrotermales es un elemento clave en el reconocimiento de un recurso geotermal, puesto que el análisis de las características texturales, mineralógicas y de paragénesis mineral permiten estimar las condiciones fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos en el subsuelo y la evolución temporal del sistema (OLADE, 1994).

3.4 Sistema geotérmico de Paipa

El modelo conceptual del SGP (Alfaro et al., 2017; Alfaro et al., 2020) incluye una fuente de calor magmática que podría estar asociada al calor remanente de intrusiones o calor radiogénico, con una fuente de recarga principal a 2800-2900 m s. n. m. en el flanco occidental del anticlinal de Tibasosa y dos posibles reservorios; uno localizado en rocas fracturadas asociadas a fallas de basamento y otro más superficial en rocas de origen sedimentario de alta permeabilidad de la Formación Une. Debido a que el fluido geotérmico está enmascarado por la mezcla de aguas salinas sulfatadas sódicas, generadas por la disolución de evaporitas al contacto con aguas meteóricas, no hay una estimación de la temperatura del reservorio a partir de la composición química e isotópica de los manantiales, y las estimaciones de la temperatura de los fluidos geotermales en profundidad se ha realizado a partir del estudios de minerales alteración hidrotermal (hasta 320 °C) y geoquímica de fluidos (hasta 230 °C) (Alfaro et al., 2017; Alfaro et al. 2020).

Finalmente, la capa sello de este sistema estaría conformada por niveles arcillosos de las formaciones Churuvita y Une y depósitos volcano-sedimentarios meteorizados (Alfaro et al., 2020). En la siguiente Tabla 3-2 se presenta un consolidado de estas características y en la Figura 3-1: Modelo geológico-geofísico del SGP en 3D el modelo conceptual del sistema en vista oblicua.

Tabla 3-2: Componentes del SGP (Alfaro et al., 2020).

Componente del sistema geotérmico	Descripción
Zona de recarga	Anticlinal Tibasosa-Toledo, compuesto por rocas de la formación Une a una altura de 2800 a 2900 m s. n. m.
Zona de descarga	Manantiales termales (<i>hot springs</i>) en el sector ITP-lanceros (30.2-70 °C) y La Playa (53.5-76 °C)
Reservorio	Areniscas de la formación Une entre complejos de domos de alta densidad.
Capa sello	Arcillas impermeables de la formación Churuvita, incluso capas de arcilla de la formación Une, y depósitos piroclásticos erosionados.
Fluidos geotérmicos	La composición química e isotópica de los fluidos calientes es modificada por la mezcla con aguas salinas (disolución de evaporitas) y la entrada de metano termogénico.
Fuente de calor	Se encuentra debajo del complejo de domos volcánicos Alto de los Godos y Alto de los Volcanes, y está asociada con el enfriamiento de magma y/o la producción de calor radiogénico.

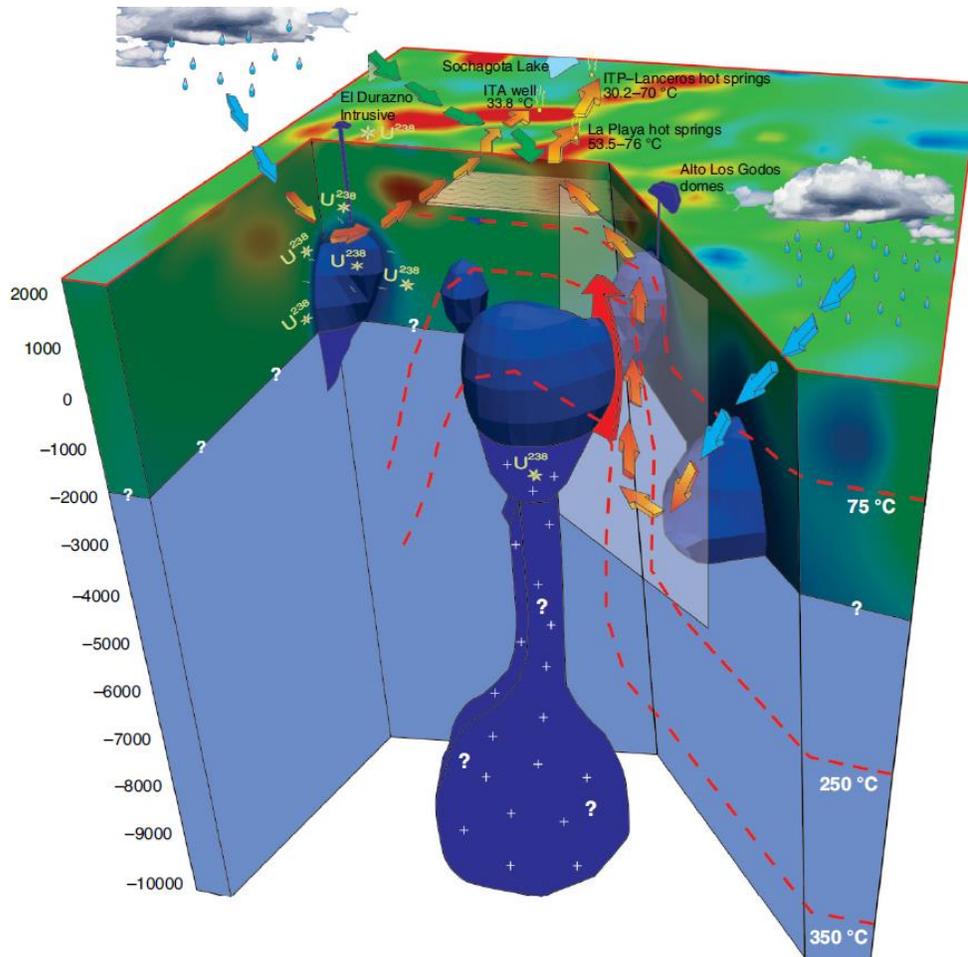


Figura 3-1: Modelo geológico-geofísico del SGP en 3D

Nota. Los cuerpos azules representan las intrusiones magmáticas (fuente de calor); las flechas azules indican el trayecto del agua desde la zona de recarga hasta infiltrarse en las fallas; las rojas aguas ya calientes (enriquecimiento radiactivo y aumento de la temperatura); y las verdes el ingreso de aguas salinas al sistema enmascarando. Tomado de Alfaro et al. (2020).

3.5 Fluidos y alteraciones hidrotermales

Un fluido hidrotermal es una solución acuosa caliente (50-500 °C) con solutos que se precipitan a medida que ésta cambia sus propiedades en el tiempo y el espacio. La mayoría de fluidos tienen un origen mixto con una o más fuentes predominantes, como aguas de mar, meteóricas, connatas, metamórficas o magmáticas. En el caso de las aguas meteóricas, éstas pueden ser subterráneas, de lluvia, lagos y ríos, que han adquirido propiedades de soluciones hidrotermales al penetrar profundamente la corteza, donde se calientan y mineralizan (Pirajno, 2009).

En este proceso también se alteran químicamente los constituyentes minerales de las rocas encajantes (*wall rocks*) que, por su tendencia a reequilibrarse en las nuevas condiciones, forman conjuntos de minerales secundarios productos del metasomatismo o alteración hidrotermal (Pirajno, 2009). La identidad y abundancia de estos nuevos minerales depende de las condiciones físicas y químicas prevalecientes en el sistema como: temperatura, presión, tipo de roca, permeabilidad, composición del fluido y duración de la interacción agua/roca (Brown, 1997). De éstas, la que tiene más influencia es la diferencia de temperatura (ΔT°) entre la roca y el fluido que la invade; pues mientras más caliente sea el fluido, mayor será el efecto sobre la mineralogía original.

En cuanto a la estabilidad de las especies minerales de alteración hidrotermal, estas se hacen progresivamente más deshidratadas como las arcillas de silicatos, que en condiciones de alta temperatura forman la secuencia mineral esmectita > interstratificado esmectita > illita > mica blanca, o las zeolitas y su secuencia clinoptilolita > mordenita > estilbita > laumontita > wairakita (Corbett y Leach, 1989). La temperatura también incide en el grado de orden o cristalinidad de los minerales, como la caolinita desordenada y la halloisita que se forman a temperatura ambiente, o la caolinita más ordenada producida en temperaturas hidrotérmicas elevadas, que cuando aumentan cambia a dickita bien cristalizada (Corbett y Leach, 1989).

Otro factor que tiene un control significativo en las alteraciones es la composición del fluido, específicamente, su pH; en condiciones ácidas a temperaturas inferiores a 120 °C se puede formar caolín mientras que a temperaturas mayores a 250 °C se puede formar pirofilita. En pH neutro, la montmorillonita es estable hasta 140 °C y la illita por encima de 220°C, la formación de interstratificados a partir de montmorillonita e illita es indicativa de temperaturas intermedias en el rango 140-220 °C mientras que la epidota es uno de los minerales guía en condiciones de pH neutro que aparece a partir de 250 °C. Ahora bien, la permeabilidad de estas rocas determina que pueda o no ser invadida por fluidos hidrotermales. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico en las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria (Browne, 1997).

Los efectos de la alteración también tienen relación directa con la duración de los fluidos en el sistema hidrotermal o el periodo durante el cual la permeabilidad ha permanecido abierta,

esto determina si se ha establecido un equilibrio entre el fluido y la roca huésped. Es decir, mientras mayor volumen de aguas calientes circulando por las rocas y mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas (Corbett y Leach, 1998).

Por último, la presión, que generalmente es baja y no excede los 200 bares, es uno de los factores que al cambiar puede afectar la composición del fluido, pero en especial controla procesos físicos secundarios como la profundidad de ebullición de los fluidos, el fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y las erupciones o explosiones hidrotermales (Browne, 1997).

3.6 Estilos y tipos de alteración hidrotermal

Las alteraciones hidrotermales se pueden clasificar de acuerdo con las asociaciones de minerales de alteración presentes en las rocas, dado que una asociación de minerales de alteración refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo requerido para lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido (Corbett y Leach, 1998). Para reconocer las asociaciones de minerales o conjuntos minerales, principalmente, se emplean estudios de secciones delgadas donde es posible identificarlos, después de esto se clasifican en orden de abundancia o mediante términos descriptivos generales que reflejen la mineralogía dominante (ensamblajes) como argílico, potásico, sericítico, entre otros. Los cambios que indican el tipo de química de los fluidos involucrados en el proceso de alteración incluirían metasomatismo de iones de hidrógeno, metasomatismo alcalino, metasomatismo de flúor y boro, entre otros (Pirajno, 2010).

Además, el estilo de alteración tiene en cuenta la intensidad, la forma y el carácter del fenómeno. Aquí la terminología se vuelve un poco confusa, debido a su subjetividad inherente. Los términos como: débil, moderado, fuerte, extenso, generalizado, no generalizado, son bien conocidos y se utilizan con frecuencia. Estos términos se refieren esencialmente al estado de conservación de la roca original, hasta qué punto ha avanzado el proceso de alteración, tanto a escala mineral individual como a escala regional (Pirajno,

2010). En la Tabla 3-3 se describen algunos tipos de alteración con sus sistemas de minerales asociados.

Tabla 3-3: Terminología de alteración aplicada a sistemas minerales seleccionados

Terminología genérica	Conjunto de minerales de alteración
Argílica	<i>Caolinita (halloisita o dickita) + montmorillonita ± sericita ± (o moscovita) ± clorita.</i>
Argílica avanzada	<i>Pirofilita + caolinita (o dickita) ± cuarzo ± sericita ± andalucita ± diáspora ± alunita ± topacio ± zunita ± enargita ± turmalina ± pirita ± calcopirita ± hematita.</i>
Argílica intermedia	<i>Clorita + sericita ± caolinita ± montmorillonita ± illita-esmectita ± calcita ± epidota ± biotita ± pirita.</i>
Fílitica (o sericítica)	<i>Sericita + cuarzo + pirita ± biotita ± clorita ± rutilo ± leucóxeno ± calcopirita ± illita.</i>
Propilítica	<i>Epidota (zoisita o clinozoisita) + clorita + albita carbonato ± sericita ± montmorillonita ± septaclorita apatito ± anhidrita ± ankerita ± hematita ± pirita calcopirita.</i>
Potásica	<i>K-feldespato (ortoclasa) + biotita + cuarzo, magnetita, sericita (o moscovita) albita, clorita, anhidrita, apatito, epidota, rutilo, calcopirita, pirita de bornita.</i>

Nota. Los principales conjuntos se presentan en cursiva. Elaborada a partir de Gifkins, Herrmann y Large (2005 en Pirajno, 2010).

4. Antecedentes

En el modelo conceptual de Alfaro et al. (2005), se propone que la fuente de calor del SGP corresponde a cuerpos plutónicos en enfriamiento y las rocas de su reservorio a areniscas de permeabilidad primaria de la secuencia sedimentaria, cuyo espesor y extensión lateral permitieron el movimiento de los fluidos calientes hacia la zona de descarga en el sector ITP-Lanceros.

Posteriormente, Alfaro et al. (2017) actualizaron el modelo con investigaciones complementarias de geoquímica de rocas y fluidos, geofísica y los resultados preliminares de un estudio magnetoteléxico. Esto les permitió establecer tres fuentes de calor: una residual, producida por eventos magmáticos; radiogénica, correspondiente a la concentración anómala de elementos radioactivos; y una última asociada a un gradiente geotérmico normal.

Respecto a las alteraciones hidrotermales de esta área, Garzón (2003) realizó análisis geoquímicos y de difracción de rayos X a muestras de arcillas de los sectores de las quebradas Calderón y Aguatibia y al sur del Alto de los Godos e identificó minerales de esmectita, illita, caolinita, cristobalita, cuarzo, halloisitas deshidratadas y feldespatos, relacionados con la alteración de cenizas volcánicas en medios acuosos y una alteración hidrotermal incipiente.

Cepeda y Pardo (2004) a partir de análisis petrográficos y químicos elaboraron una estratigrafía volcánica y una cartografía geológica de los productos volcánicos al sur de este municipio, señalaron que la acción hidrotermal está concentrada en las cabeceras de la quebrada Olitas, en el cerro Mirador, donde hay caolinita, y en los depósitos de corrientes de densidad piroclástica del sector el Guarruz, que está atravesado por pseudo-diques o diques clásticos oscuros y por fracturas rellenas de material ferruginoso. Alfaro (2005) estudió la

mineralogía de las alteraciones hidrotermales en los sectores Olitas y Guarruz y estableció dos tipos de alteración: argílica, en depósitos de caolinita en superficie, y propilítica, en líticos accidentales. González et al. (2008) definieron un sistema epitermal de baja sulfuración en el sector El Durazno, que afecta a las rocas de la formación Guaduas e identificaron en áreas con fracturas, zonaciones con silicificación, alunitización y caolinitización, y una alteración argílica avanzada sobrepuesta a una argílica moderada.

Rodríguez y Valero (2015) caracterizaron la mineralogía de las rocas recuperadas en seis perforaciones en el área de El Durazno, con profundidades entre 50 y 100 m, utilizando para ellos análisis mineralógicos, químicos y radiométricos. Las rocas exhibieron una notable alteración argílica y argílica avanzada, lo que les impidió realizar una clasificación química convencional. Sin embargo, dadas las altas concentraciones de sanidina que observaron en los análisis de DRX, los autores sugirieron un origen ígneo. Peña (2016) complementó la anterior cartografía con análisis petrográficos y de química mineral de rocas de la cantera ALFAGRES al NE del Alto de los Godos. Como resultado, registró la presencia de cristobalita y tridimita (polimorfos de SiO_2 de alta temperatura) y la formación de arcillas interestratificadas de halloisita-caolinita, relacionadas con una alteración argílica avanzada.

Rodríguez y Vallejo (2013) por medio de 147 sondeos térmicos superficiales identificaron las zonas de mayor concentración de anomalías de temperatura y estimaron el gradiente geotérmico bajo los sectores de El Durazno y los domos volcánicos del AGP. Rueda-Gutiérrez (2017) para la cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa, realizó análisis petrográficos y de difracción de rayos X. Esto le permitió caracterizar las rocas con texturas porfiríticas de composición félsica, con presencia de cristales de feldespato dentro de una masa fundamental fina alterada; de manera que sus principales fases cristalinas son albita, ortoclasa, anortoclasa, sanidina, cristobalita y cuarzo. Además, señala que la mayoría de los afloramientos que hicieron parte de su estudio muestran una evidente meteorización/alteración, que reemplazó los cristales de feldespatos y vidrio volcánico por minerales arcillosos como la caolinita.

En la Tabla 4-1: Minerales de alteración en el sector Alto de los Godos se presenta un resumen de los minerales de alteración del Alto de los Godos reportados en los anteriores estudios y en la

Tabla 4-2 los datos de alteraciones del área geotérmica de Paipa, insumo para la identificación de los sectores de alteración y la caracterización de minerales de alteración en esta tesis:

Tabla 4-1: Minerales de alteración en el sector Alto de los Godos

Unidad	Tipo de muestra y roca	Descripción	Minerales secundarios
Unidad I.1	Depósitos de tefras de la Primera Época Eruptiva (PEE)	Sericita relleno de vesículas y feldespato potásico reemplazando cavidades euhedrales (sericita hidrotermal).	Sericita
Unidad I.2	Depósitos de tefras de la PEE	Sericita (meteorización del vidrio), ópalo, sílice amorfa, feldespato potásico por relleno de cavidades/vesículas y reemplazo total de anortoclasa, mica potásica (probablemente illita) y óxido férrico.	Sericita
Unidad I.3	Depósitos de tefras de la PEE	Incipiente sericitización del vidrio.	Sericita
Unidad I.4	Depósitos de tefras de la PEE	Sílice amorfa, tridimita, y adularia relleno de vesículas, calcedonia en filamentos relleno de cuarzo en microvenillas sobre cristales de feldespatos.	Sílice Amorfa Adularia Tridimita
Domo SE	Domo SE rocas porfiríticas	Alto contenido de caolinita, concentrada especialmente en venas y alterando cristales de feldespatos potásicos. La caolinita puede también ser el resultado de la alteración de vidrio volcánico.	Caolinita feldespato potásico

Modificado de Cepeda y Pardo (2004) y Rueda-Gutiérrez (2017)

Tabla 4-2: Minerales de alteración del AGP

Localización/unidad	Tipo de muestra/tipo de roca	Descripción	Minerales secundarios	Ensamble mineralógico	Temperatura °C	Alteración hidrotermal	
Sector Olitas	(Unidades I.3 Y I.4 PEE)	Superficial/líticos sedimentarios no alterados (arenitas) y riolíticos (Alfaro, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo de plagioclasa por epidota. • Precipitación de clorita y albita en venillas. • Feldespato potásico parcialmente caolinitizado en la masa fundamental riolítica • Cristales de homblenda alterados a clorita. 	Caolinita clorita	Epidota, clorita, albita	> 250 °C	Propilítica
	(Unidad esquistos y filitas de Busbanzá)	Superficial/esquistos micáceos (Alfaro, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Ricos en moscovita, cuarzo y biotita • Albita en vena • Venillas rellenas de limonita • Incluye biotita, moscovita, albita, cuarzo, adularia, illita, esmectita, clorita. 	Sericita feldespato potásico	Albita, feldespato potásico	170 °C	
	Xenolito	Superficial/xenolito metamórfico (Alfaro, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Incluye clorita, cuarzo, illita, moscovita, albita, adularia, epidota y biotita. • Depósitos de biotita secundaria, adularia y cuarzo en vena. 	Epidota, biotita, adularia, albita	Biotita- feldespato potásico (adularia)	320 °C	Potásica
	Líticos	Líticos superficiales (Mojica y Valentino, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Pirita disseminada, abundante y a veces oxidada a hematita. • Presencia de dickita. 	Hematita, goethita	Dickita	> 200 °C	Argílica
Sector Guarruz	Depósitos piroclásticos	Superficial/depósitos piroclásticos (Alfaro, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Sericitización parcial de la matriz vítrea. • Presencia de arcilla (caolinita) • Líticos de pómez 	<i>Líticos accesorios de pómez</i> (ópalo, tridimita, calcedonia, adularia y cuarzo)	Ópalo, tridimita, adularia	Ópalo: 110 °C Tridimita: 100-200 °C Adularia: >180 °C	Argílica
Sector Aguatibia	Depósitos de caolinita	Depósitos de caolinita (Garzón, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Caolinita desordenada, Halloysita deshidratada, cristobalita, cuarzo, feldespatos, illita-esmectita, dickita. 	Halloysita, caolinita, illita-esmectita	Caolinita- esmectita	120 °	
El Durazno	Formación Guaduas	Núcleos de perforación (González et al., 2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Abundancia de sanidina y cuarzo • Registra silicificación 	Alunita, moscovita, caolinita, barita	Alunita- caolinita. Caolinita- sanidina	> 200 °C	Argílica y argílica avanzada

Elaborado a partir de Alfaro (2005); Mojica y Valentino (2009); Garzón (2003) y González et al. (2008) y Rueda-Gutiérrez (2017).

Rueda-Gutiérrez (2017) también recoge información de la geoquímica de roca total, a partir de los análisis de fluorescencia de rayos (FRX) y espectrometría de masas (ICP-MS) de 16 muestras: siete del Alto de los Volcanes, dos de la Quebrada Honda y siete del Alto de los Godos. En la siguiente

Figura 4-1: Porcentajes de los elementos mayores en los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes) se presentan las composiciones elementales promedio de las muestras de cada sector, donde se puede observar que presentan una similitud en sus características composicionales, como altos contenidos de SiO_2 y de Al_2O_3 respecto a otros componentes. (tabla 4-3). Con esta información y el diagrama de Total Álcalis Sillica (TAS), el autor clasificó las rocas como riolitas y traquitas y estableció que todas las muestras están dentro de la serie calcoalcalina ricas en potasio.

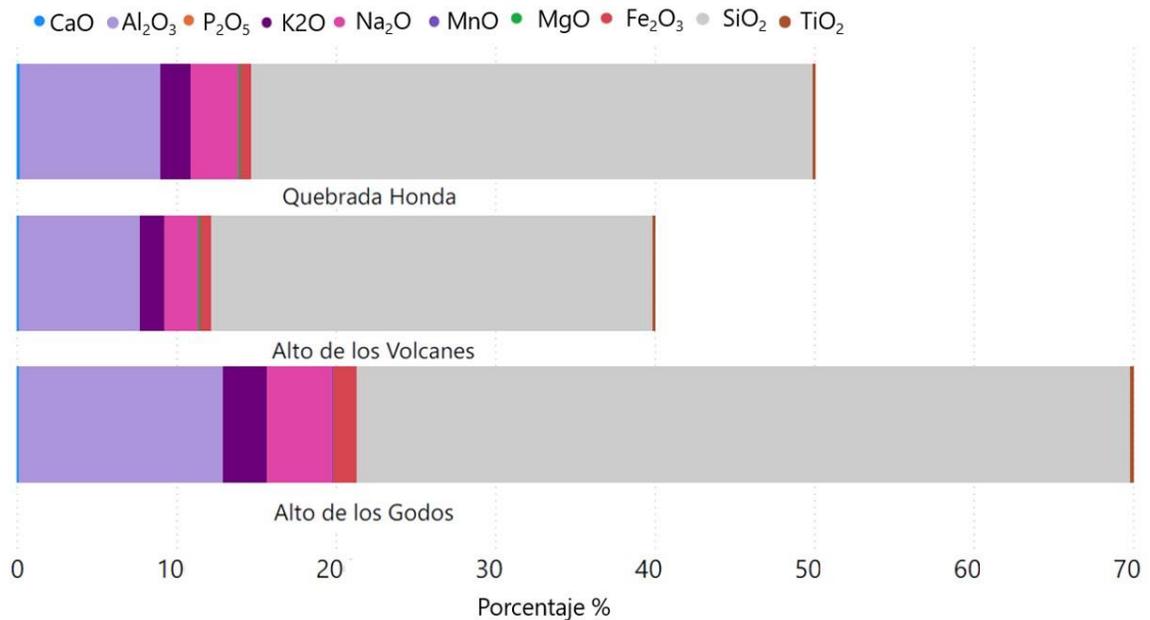


Figura 4-1: Porcentajes de los elementos mayores en los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes. Adaptado de Rueda-Gutiérrez (2017).

Tabla 4-3: Valores promedio de los elementos mayores en roca total de los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes.

Sector	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	FeO*	LOI
Alto de los Volcanes	0.19	17.65	0.02	3.63	5.87	0.02	0	1	70.95	0.16	0.13	1.6
	0.55	19.76	0.09	3.8	5.34	0.07	0.55	2.59	66.91	0.33	0.36	4.22
	0.46	20.51	0.07	3.7	4.98	0.04	0.39	1.96	67.57	0.32	0.13	3.3
	0.13	17.89	0.03	4.17	4.93	0.03	0	1.23	71.42	0.15	0.13	2.24
Quebrada Honda	0.61	18.73	0.07	3.73	5.41	0.03	0.4	2.1	68.64	0.3	0.13	2.45
	0	18.24	0.06	4.08	5.24	0.01	0	1.18	71	0.18	0.13	2.47
	0.21	17.4	0	3.89	6.17	0.03	0	1.18	70.95	0.17	0.13	1.33
	0.38	16.91	0.02	3.73	6.42	0.05	0.1	1.28	70.99	0.12	0.19	0.65
	0.53	16.76	0	3.8	6.61	0.05	0.17	1.46	70.42	0.19	0.13	0.52
Alto de los Godos	0.11	17.34	0.03	3.94	5.56	0.03	0.1	1.86	70.79	0.24	0.13	1.48
	0.14	20.31	0.05	3.27	5.14	0.09	0	2.57	68.17	0.28	0.13	3.5
	0.18	17.61	0.03	4.22	6.11	0.04	0	1.98	69.61	0.23	0.13	1.44
	0.18	18.81	0.03	4.08	5.84	0.06	0	2.16	68.56	0.27	0.14	2.07
	0.2	17.96	0	4.21	6.22	0.04	0	2.05	69.06	0.25	0.18	1.38
	0.13	18.56	0.03	3.99	5.53	0.03	0	2.16	69.28	0.28	0.21	2.1
	0.18	17.12	0.03	4.2	6.65	0.04	0	1.99	69.55	0.24	0.14	0.61

Adaptado de Rueda-Gutiérrez (2017).

Algunos de los estudios revisados fueron integrados por Alfaro et al. (2017) en la *Actualización del modelo conceptual del Área geotérmica de Paipa*, que contiene la identificación de los principales elementos del sistema como zonas de recarga, reservorio, fuente de calor, roca sello y zona de descarga. Con este nuevo modelo, los autores propusieron sitios de perforación para investigaciones de gradiente térmico y conocimiento geológico con una profundidad de hasta 500 m. Las investigaciones realizadas en el AGP aportaron a esta tesis para la identificación de las zonas de muestreo de domos y depósitos volcánicos que finalmente fueron identificadas en campo de acuerdo con las condiciones de acceso y exposición de las litologías con evidencia de alteración hidrotermal. Adicionalmente las recomendaciones en los estudios de Alfaro (2005) y Rueda-Gutiérrez (2017) permitieron reconocer los análisis y preparaciones complementarias de difracción de rayos X, necesarios para identificar los minerales de arcilla producto de la alteración hidrotermal que no habían sido caracterizados en investigaciones anteriores.

5. Datos y métodos

Para esta investigación, desarrollada tanto en oficina como en campo se emplearon los siguientes procedimientos: 5.1) revisión bibliográfica, 5.2) elaboración de mapas de reconocimiento, 5.3) selección de los sitios para la toma de muestras, 5.4) selección de muestras, 5.5) elaboración de secciones delgadas, 5.6) análisis petrográficos, 5.7) análisis de catodoluminiscencia 5.8) cálculo de los índices de meteorización, 5.9) análisis de difracción de rayos X (DRX), 5.10) microsonda electrónica análisis de química mineral, 5.11) geotermometría y 5.12) caracterización geomecánica. A continuación, se describen los aspectos más relevantes de cada actividad.

5.1 Revisión bibliográfica

En la etapa inicial de esta investigación se revisó la bibliografía correspondiente al AGP que incluyó la *Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa* (Velandia, 2003), las planchas cartográficas 171ICV y 171IVD a escala 1:25 000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC; Gómez et al., 2015), el *Vulcanismo de Paipa, proyecto de exploración y evaluación de los recursos geotérmicos* (Cepeda y Pardo, 2004), *Mecanismos de transporte y acumulación durante las erupciones piroclásticas más explosivas, registradas al sur de Paipa, en la Cordillera Oriental de Colombia* (Suárez, 2016), y la *Cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa* (Rueda-Gutiérrez, 2017), entre otros; actividad que permitió reconocer el área de estudio, su topografía, las vías de acceso, su contexto geológico, las unidades volcánicas presentes, la ubicación de los litologías de interés y una familiarización con aspectos administrativos de la región. Con esta información, posteriormente, se elaboraron los mapas de localización, geología regional y local, sistemas de fracturamiento y localización de los domos/intrusivos.

5.2 Elaboración de mapas de reconocimiento

Los documentos base que se emplearon para elaborar todos los mapas fueron las planchas cartográficas 171IVC y 171IVD a escala 1:25 000 del IGAC en formato *geodatabase*; imágenes satelitales descargadas de *Google Earth Pro*; archivos tipo *shapefile* de las unidades volcánicas, contornos de domos y líneas de fallas descargados del Motor de Integración Geocientífica (MIIG)¹ del Servicio Geológico Colombiano y un modelo digital de elevación (*hillshade*) con resolución de 12.5 m/píxel construido a partir de los datos de la misión ALOS PALSAR (esta información de libre acceso se obtuvo a través de la página de *Alaska Satellite Facility* (ASF)². Estos insumos se procesaron en el software ArcGis©³ (herramienta *basemap*) junto con la información de referencia y los recursos necesarios para cada uno, como se puede observar en la siguiente Tabla 5-1):

Tabla 5-1: Insumos y preparación de los mapas de reconocimiento

Mapa	Insumos adicionales y tratamiento	Bibliografía especializada
Localización	Archivos en formatos <i>shapefile</i> correspondientes a los departamentos, municipios y veredas, adquiridos en la plataforma de datos abiertos ESRI ⁴ .	Mapa Geológico Colombiano a escala 1:1 000 000 (Gómez et al., 2015) publicado por el Servicio Geológico Colombiano en formato MXD.
Geología regional	Archivos en formato <i>geodatabase</i> y <i>shapefile</i> del Mapa Geológico de Colombia a escala 1:100 000	Gómez et al. (2015) y Velandia (2003).
Geología local	Las unidades en formato <i>shapefile</i> se sobrepusieron en el modelo de sombras del relieve (<i>hillshade</i>), realizado a partir del modelo digital de elevación (DEM).	Velandia (2003), Cepeda y Pardo (2004) y Rueda-Gutiérrez (2017).
Sistemas de fracturamiento en el AGP	Archivos en formato <i>shapefile</i> de las fallas y domos sobrepuestos en una imagen satelital del 2017 obtenida de <i>Google Earth</i> .	Velandia (2003) y Rueda-Gutiérrez (2017).
Localización de los cuerpos intrusivos sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes	Los polígonos de los cuerpos intrusivos se sobrepusieron en una imagen satelital de <i>Google Earth</i> del año 2017, con exageración del relieve y en dirección NW.	Cepeda y Pardo (2004) y Rueda-Gutiérrez (2017).

¹ <https://miig.sgc.gov.co>

² <https://asf.alaska.edu/>

³ Versión Learn ArcGIS: <https://learn.arcgis.com/es/>

⁴ <http://datosabiertos.esri.co/datasets/>

Las georreferencias del mapa de localización de los cuerpos dómicos se digitalizaron y cargaron en un dispositivo portátil GPS tipo Oregon 750, usado en las dos primeras comisiones de campo durante el reconocimiento del área.

5.3 Selección de sitios de muestreo

Una vez georreferenciadas las unidades volcánicas y domos del AGP, a partir de las observaciones de campo⁵ e imágenes de *Google Earth*, se seleccionaron los lugares con las mejores condiciones para recolectar las muestras como: zonas accesibles desprovistas de vegetación, canteras en explotación y cortes en taludes de carretera. De manera que para esta etapa se eligieron los domos NW, Centro y SE (Alto de los godos), Quebrada Honda, Alto de los Volcanes, cantera CEMEX (Rincón de Vargas), cantera ALFAGRES (Venta del llano) y El Durazno; donde, en las dos campañas de campo subsecuentes, se recolectaron las muestras y se realizó el correspondiente registro de ubicación para posteriormente elaborar los mapas.

5.4 Selección de muestras

Los criterios de recolección y selección de muestras en esta tesis fueron los siguientes:

1. Rocas con cambios notorios de coloración en comparación con otras de la localidad.
2. Zonas de fractura y fracturas con halos de alteración.
3. Afloramientos con rocas muy competentes.
4. Depósitos y rocas ígneas con evidencias de alteración para análisis de DRX.

⁵ En esta etapa se contó con la asesoría de los expertos en el área de geotermia y alteraciones hidrotermales Natalia Pardo (n.pardo@uniandes.edu.co), Andrés Rodríguez (arodriguez@minerlablimitada.com), Jesús Rueda Gutiérrez (jbrueda@sgc.gov.co) y Jhon Forero (jforero@sgc.gov.co). Por su recomendación se eligieron además zonas con diferencias de coloración en la roca que podrían indicar alteración de estas y fracturas rellenas de material arcilloso.

En total se recolectaron 54 muestras para análisis de DRX y 15 para análisis de petrografía. Pero por limitaciones presupuestales sólo se elaboraron 9 secciones delgadas para análisis petrográficos. En la siguiente Tabla 5-2 se pueden observar el número de muestras tomadas en cada lugar, su rótulo de identificación y los análisis y preparaciones que se les aplicaron:

Tabla 5-2: Registro del lugar de muestreo, identificación utilizada para cada sector, tipo de análisis y número de muestras

Lugar	Identificación	Tipo de análisis	Número de muestras	
			Sección delgada	DRX (Polvo desorientado y lamina orientada)
Cantera CEMEX	CMX	DRX	-	18
Cantera ALFAGRES	AFG	DRX Petrografía/ Química mineral	4	26
Domo Central Alto de los Godos	VGP	Petrografía DRX	2	1
Domo NW Alto de los Godos	VGP	Petrografía DRX	1	1
Domo SE Alto de los Godos	VGP	Petrografía DRX	2	5
El Durazno	DRZ	DRX	3	3

5.5 Elaboración de secciones delgadas

Las secciones delgadas elaboradas fueron comisionadas a la empresa MINERLAB Ltda. A continuación, un resumen de la técnica empleada. Primero cada muestra se redujo a espesores 1 a 3 cm, dependiendo de su fragilidad y friabilidad, con una cortadora de disco diamantado. A las rocas friables se les aplicó resina epóxica y después se llevaron a una cámara de impregnación al vacío. En algunas muestras se utilizó resina azul para destacar los poros o espacios vacíos y facilitar la inspección visual. Las secciones de roca se cortaron en tabletas de 2.7 cm de ancho, 4.5 cm de largo y 5 mm de profundidad, y nuevamente se impregnaron con resina para cubrir las porosidades primarias y secundarias. Después, se pulieron con carburo de silicio de calibre 600 (equivalente a 75 μm) para proporcionarles una superficie plana y lisa; se pegaron al vidrio portaobjeto con resina epóxica y se dejaron secar durante 1-2 horas a $< 60^\circ\text{C}$. Una vez adheridas, las tabletas se desbastaron para darles

un tamaño de 80 a 100 μm con la máquina de corte Petrothin, marca Buehler, y con carburo de silicio de calibre 600 hasta obtener un espesor estándar de 30 μm , controlado por el color de interferencia que presenta el cuarzo (típicamente gris claro). Por último, la textura se suavizó con carburo de silicio calibre 1000 y pastas diamantadas de 1 y 9.3 μm de granulometría.

En el caso de las secciones delgadas, al completar el procedimiento con los pulimentos, los cortes se pegaron al vidrio cubreobjetos, se limpió el exceso de resina y se marcaron con el número de la muestra.

5.6 Análisis petrográficos

Este método permitió identificar los minerales principales (esenciales), accesorios, de alteración, así como sus formas, tamaños y porcentajes en volumen para definir las texturas de las rocas. En total se analizaron nueve secciones delgadas en el laboratorio de MINERLAB Ltda, con un equipo marca Opticks retícula de 0-100 con divisiones marcadas de 10 unidades y un objetivo de trabajo estándar de 10 X. El porcentaje de minerales se estimó con la técnica de conteo de puntos propuesta por Stoltman (1989), que incluyó entre 368 y 467 puntos por sección. Las rocas se clasificaron con el diagrama de Streckeisen (1979) y se describieron con la asesoría de los geólogos Andrés Rodríguez (MINERLAB Ltda.) y Elizabeth Henríquez⁶ (LaGeo) expertos en petrografía de rocas volcánicas y alteraciones hidrotermales.

5.7 Catodoluminiscencia

Este análisis se realizó a cuatro secciones delgadas en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con un equipo fabricado

⁶ ehenriquez@lageo.com.sv

por Cambridge Image Technology Ltd. modelo CL8200 MK-5, adaptado a un microscopio petrográfico marca Leica DM 2500 P con corriente de 220-300 μA a 15-20 kV. Lo que permitió observar zonaciones y fracturas rellenas y abiertas en cristales de feldespatos.

5.8 Cálculo de índices de meteorización

Para conocer la intensidad de la meteorización y alteración de las rocas, se emplearon el método de Fedo, Nesbitt y Young (1995) y los datos de óxidos mayores de las rocas del sector Alto de los Godos, específicamente del óxido de aluminio (Al_2O_3), de sodio (Na_2O), potasio (K_2O) y calcio (CaO), publicados por Rueda-Gutiérrez (2017). Primero se estimó el *chemical index of alteration*-CIA (Nesbitt y Young, 1982) con la ecuación 1, cuyo resultado refleja la eliminación de cationes móviles inestables (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) durante la meteorización en relación con los constituyentes residuales estables altamente inmóviles (Al^{3+} , Ti^{4+}); de manera que un CIA entre 50-60 corresponde a una meteorización baja o incipiente, > 50-60 intermedia y > 80 extrema.

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$$

Ecuación 1. Cálculo del *chemical index of alteration*. El CaO^* representa la cantidad en silicatos.

En la ecuación anterior, según la metodología propuesta por McLennan (1993), se deben corregir los valores, ya que solamente se aceptan $\text{CaO} < \text{Na}_2\text{O}$; pues cuando se encuentran valores de $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$, la concentración de CaO es igual al de Na_2O . Los efectos de la meteorización y alteración en plagioclasas se evaluaron a partir del índice químico de intemperización (CIW), en proporciones moleculares, con la ecuación 2, ya que K_2O es restado de Al_2O_3 en el denominador de la ecuación de CIA.

$$\text{CIW} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$$

Ecuación 2. Cálculo del índice químico de intemperización. El CaO^* es CaO que reside sólo en la fracción de silicato.

Los valores CIW se interpretan de una manera similar al CIA. Se parte de un valor de 50 para la corteza continental superior no meteorizada y alrededor de 100 para materiales altamente degradados, con una eliminación completa de elementos alcalinos y

alcalinotérreos (McLennan, 1993). Por último, se calculó el índice de alteración de plagioclasa (PIA) con la ecuación 3 (Fedo et al., 1995). En este caso, cuando los valores son > 84 se consideran altos e indican un intenso degaste químico, mientras que un resultado bajo (~ 50) es característico de valores frescos de las plagioclasas.

$$\text{PIA} = 100 \times ((\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O})) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})$$

Ecuación 3. Cálculo del índice de alteración de la plagioclasa

5.9 Difracción por rayos X

Las fases minerales de tamaño arcilla ($< 2 \mu\text{m}$), comunes en litologías volcánicas (domos y depósitos piroclásticos) pueden pasar desapercibidas a nivel petrográfico por su tamaño. Estas se originan por procesos de alteración ocasionados por la circulación de fluidos geotermales. En esta tesis se analizaron diferentes tipos de muestras:

- Muestras de rocas porfiríticas provenientes de domos. De estos se analizaron las partículas en fracción arcilla ($< 2 \mu\text{m}$).
- Muestras de depósitos piroclásticos, en donde también se analizó la fracción fina.
- Muestras específicas de material en fracturas y halos de alteración alrededor de fracturas encontradas en los domos.

En total se analizaron 54 muestras en el Laboratorio de Caracterización Litogeoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, con un equipo Bruker D2 Phaser, lo que permitió identificar el sistema cristalino de las muestras, la estructura interna del cristal y los minerales arcillosos. Estos análisis se desarrollaron con las técnicas de polvo desorientado y orientado propuestas por Thorez (1995) y Moore y Reynolds (1997), descritas a continuación.

5.9.1 Análisis en polvo desorientado

Las muestras se pulverizaron con un mortero de ágata para evitar impurezas de otros materiales. De este polvo se tomaron 2 g en una fracción $< 70 \mu\text{m}$ y se colocaron en un porta

muestras, que fue observado con un ángulo de barrido de entre 2.5 ° y 70 ° grados, adecuado para identificar la mayoría de los planos cristalográficos presentes en casi todos los minerales conocidos.

5.9.2 Análisis en polvo orientado

Esta técnica se aplicó para el análisis de minerales de arcilla. Primero se suspendió una fracción < 3 g de la muestra pulverizada en 50 ml de agua destilada y se agitó durante 20 minutos hasta alcanzar una completa dispersión de las partículas. Se dejó reposar en un intervalo de 5 a 10 minutos, se tomó 1 cm³ de la superficie y se colocó sobre una lámina de vidrio, donde se generó una gota estable por los efectos de la tensión superficial. Luego de 6 horas el efecto de gravedad en la suspensión produjo una película de minerales arcillosos preferencialmente orientados sobre sus planos basales, que fueron medidos con un ángulo de adquisición entre 2.5 ° y 40 °.

La misma preparación fue saturada con etilenglicol en un ambiente de vacío a 0.3 atm que estimuló las condiciones de humedad y el hinchamiento de las estructuras cristalinas de los minerales expansivos, como las esmectitas. Por último, la muestra se llevó a una mufla a 500 °C durante tres horas, donde se deshidrató por pérdida de moléculas de OH. En este último proceso fue posible identificar las arcillas hidratadas o las que permitieron el ingreso de etilenglicol por el colapso de su estructura.

5.9.3 Análisis de difractogramas

A cada difractograma se le aplicaron las correcciones rutinarias, como la disminución del ruido de fondo (*background*) y una calibración de las posiciones de los picos, utilizando para ello difractogramas estándares como el del cuarzo. Después se usó el programa EVA de Bruker D8 en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, para analizar primero las muestras de polvo desorientado, donde se identificaron y cuantificaron las especies minerales más representativas. Después se revisaron las muestras de lámina orientada y se reconocieron las especies de minerales de arcilla.

En total se analizaron 172 difractogramas, cuatro por muestra (polvo desorientado, natural, etilenglicol y calcinada a 500 °C), que fueron integrados para identificar las diferencias en la estructura del mineral generadas en cada proceso. Por último, se realizó un tratamiento adicional conocido como deconvolución que precisó la identificación de los minerales en fracción arcillosa con el programa Fityk (Wojdyr, 2010, citado en Moreno, 2018).

5.10 Microsonda electrónica-análisis de química mineral.

Esta es una técnica de alta precisión y sensibilidad utilizada para los análisis cualitativos y cuantitativos de química mineral, que consiste en bombardear un espécimen con un fino haz de electrones que mide la longitud de onda e intensidad de los rayos X, electrones secundarios y electrones retrodispersados. Estos rayos son detectados por espectrómetros dispersores de longitud de onda (WDS) (Castellanos y Ríos, 2005). Estos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Microsonda Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, con un equipo EPMA-JEOL JXA-82309, que permitió identificar la química mineral de los feldespatos y anfíboles.

Para el análisis cualitativo de los resultados se compararon las intensidades de las líneas elementales características con aquellas emitidas por los estándares que en su mayoría son de elementos puros o componentes de composición conocida (Castellanos y Ríos, 2005). Estos análisis se aplicaron a cristales de feldespatos y anfíboles, además se realizaron mediciones cuantitativas puntuales de óxidos mayores en núcleo y borde de cristales, así como perfiles y mapas composicionales. Las condiciones analíticas de las mediciones fueron: aceleración de voltaje de 15 kv; 20 nA de corriente en haz; diámetro de haz entre 5 μm -10 μm nA; tiempo de medida de cada elemento 20 s para el pico y 10 s para el fondo. El análisis químico en feldespatos incluyó los siguientes óxidos: Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SrO, CaO, TiO₂, K₂O, FeO, BaO; y en anfíboles: Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO, TiO₂, K₂O, FeO, MnO y Cr₂O₃. También se realizaron mapas de rayos X WDS y EDS con una aceleración de voltaje de 15 kv, 85 nA y 10 ms de tiempo de permanencia por píxel (Reed, 2005).

5.11 Geotermometría

Los métodos analíticos que permiten estimar las condiciones de presión y temperatura prevalecientes en sistemas geológicos se conocen como geobarómetros y geotermómetros. Estos determinan experimentalmente las condiciones de equilibrio que propician la formación y coexistencia de fases minerales (Tapia, 1997). Aunque los datos de geotermometría en esta tesis no son un insumo para caracterizar los minerales de alteración, se tomaron para dar un contexto base de las posibles condiciones de formación de los minerales, a partir de los datos de química mineral obtenidos con la microsonda y los mapas composicionales usados como técnicas complementarias a la petrografía. En este caso, se seleccionaron los núcleos más limpios tanto en los feldespatos como en los anfíboles con el fin de obtener información de las posibles primeras fases de cristalización. Adicionalmente, se hicieron análisis puntuales en los bordes de los cristales, para corroborar variaciones composicionales.

Teniendo en cuenta la mineralogía identificada en las muestras del domo del sector Alto de los Godos y en la cantera ALFAGRES; que corresponde principalmente a feldespatos alcalinos, plagioclasas y anfíboles; se aplicó la metodología para estimación de temperatura utilizando el geotermómetro propuesto por Holland y Blundy (1994) que se basa en el contenido de silicio de los anfíboles y en el porcentaje molar de anortita en las plagioclasas. Para su estimación se hizo uso de la base de cálculo preparada por Lawford Anderson (*University of Southern California*), obtenido del portal de internet⁷ de la Sociedad Mineralógica de América. En primer lugar, se registran los datos catiónicos de los óxidos y elementos determinados en los anfíboles a partir del análisis de química mineral realizado por la microsonda electrónica (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , MnO , CaO , Na_2O , K_2O , F, y Cl). Posteriormente, se calculó la proporción de albita (X_{Ab}) y anortita (X_{An}) presente en los cristales de feldespatos (plagioclasas), en este caso, se utilizó la base de cálculo para

⁷ <http://www.minsocam.org/>

feldespatos alcalinos obtenida de la página de GabbroSoft⁸. Los datos de porcentaje de X_{Ab} y X_{An} se integraron a la hoja de cálculo del geotermómetro anfíbol-plagioclasa y de esta manera se obtuvieron los valores de presión y temperatura, resultado de diferentes calibraciones de equilibrio de acuerdo con Anderson y Smith (1995).

5.12 Caracterización geomecánica

El estudio estructural de caracterización geomecánica cualitativa y semicuantitativa se realizó a tres secciones de 26 m, 20 m, y 66 cm del domo SE del sector Alto de los Godos. La información registrada incluyó el número, la densidad y el espaciamiento de las discontinuidades (fracturas, fallas y grietas); sus dimensiones; una especificación de si son abiertas o cerradas; si tienen superficies rugosas o erosionadas; y su contenido de humedad. Para esto se empleó la clasificación RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) citada en Jerram y Petford (2011), que tiene en cuenta cinco aspectos: 1) la resistencia de la roca bajo compresión uniaxial, 2) el porcentaje de calidad de la roca (%RQD - *Rock Quality Designation*), 3) el espaciamiento de las discontinuidades, 4) la condición de las discontinuidades y 5) la condición general del agua. Los valores asignados para cada parámetro se muestran en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Parámetros para la clasificación de un macizo rocoso (RMR) y valores

Resistencia de la roca intacta	Resistencia a compresión uniaxial (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
1	Valoración	15	12	7	4	2	1	0
	(%RQD)	90-100	75-90		50-75	25-50		< 25
2	Valoración	20	17		13	8		3
	Espaciamiento de discontinuidades (m)	> 2	0.6-2		0.2-0.6	0.06-0.2		< 0.06
3	Valoración	20	15		10	8		5
	Condición de discontinuidades	Muy rugosa,	Paredes rugosas, separación < 0.1		Levemente rugosas,	Cara suave o harina < 5 mm		Harina suave espesor > 5

⁸ <http://www.gabbrosoft.org/>

		discontinuidades, no separación, sin erosión	mm, algo meteorizada	separación < 1mm, altamente meteorizada	espesor, o separación continua de 1 – 5 mm	mm o separación continua > 5 mm, roca caja descompuesta
4	Valoración	30	25	20	10	0
Agua subterránea	Condiciones generales	Completamente seca	Húmeda	Mojada	Empapada	Fluida
5	Valoración	15	10	7	4	0

Según las descripciones realizadas en campo, a cada parámetro se le asignó uno de los valores anteriores para obtener, con la Ecuación 4, el porcentaje de calidad de roca. Donde el numerador es la suma de las separaciones mayores a 0.1 m (10 cm) entre discontinuidades que interceptan una línea horizontal de referencia en el afloramiento. Se tuvo en cuenta, además, que cuando la longitud de la línea de referencia cambia, se debe actualizar la condición del numerador para mantener las proporciones; por ejemplo, si la longitud de la línea de referencia es 10 m, entonces la condición del numerador es de > 1m (100 cm):

$$\%RQD = \frac{\sum(\text{longitud de bloques continuos de la roca en línea de referencia, } > 0.1 \text{ m})}{\text{longitud línea de referencia (1)}} \times 100$$

Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de la calidad de la roca

Para encontrar los valores del aspecto 3 se usó la mediana de los valores observados de las separaciones entre discontinuidades, luego de descartar las separaciones de acuerdo con la condición del numerador en la ecuación 4. Después se evaluaron los aspectos 4 y 5, y se obtuvieron cinco valores individuales, cuya suma es el valor de RMR que debe ser < 100.

Una segunda etapa consistió en la estimación de la resistencia del macizo rocoso. Para esto se usó el valor RMR, que se calcula sumando los valores de resistencia a la roca asignados en los parámetros 1, 2, 3, 4, 5 de la tabla 5-3. El valor de RMR representa la relación empírica entre la resistencia de las rocas y los valores relativos de los esfuerzos principales durante la fractura. A este procedimiento se le agregó el cálculo de los dos parámetros m y s de Hoek y Brown (1997) obtenidos con las Ecuación 5 y Ecuación 7, donde $m_1 = 25 \pm 5$.

$$m = m_i \exp \frac{(RMR - 100)}{28}$$

Ecuación 5. Cálculo del parámetro m de Hoek y Brown (1997)

$$s = s \exp \frac{(RMR - 100)}{28}$$

Ecuación 6. Cálculo del parámetro s de Hoek y Brown (1997)

Finalmente, los parámetros m y s se usaron para determinar las principales propiedades mecánicas y geotécnicas de una masa rocosa: resistencia compresiva de la masa rocosa (σ_{cm}) y resistencia tensional (σ_{tm}), con las ecuaciones 7 y 8 donde (σ_c) es la resistencia compresiva de la roca intacta,

$$\sigma_{cm} = \left(S \sigma_c \frac{2}{m} \right)^{1/2}$$

Ecuación 7. Cálculo del esfuerzo de compresión de la masa rocosa

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_c}{2} (m - (m^2 + 4s))^{1/2}$$

Ecuación 8. Cálculo del esfuerzo de compresión de la masa rocosa

6. Resultados

6.1 Petrografía

Las nueve muestras analizadas (cinco de los domos del sector Alto de los Godos y cuatro de la cantera ALFAGRES: tres de un domo y una de un depósito piroclástico) presentaron texturas porfiríticas con presencia de grandes cristales entre 4-6 mm de tamaño de plagioclasas y sanidinas en medio de una masa fundamental de microcristales de sanidina, plagioclasas, cuarzo y minerales arcillosos. En las Figura 6-1 a Figura 6-9 se presentan las imágenes escaneadas de las secciones delgadas en luz polarizada plana (PPL) y luz polarizada cruzada (XPL), donde se señalan sus principales constituyentes junto con los afloramientos de donde se recuperaron dichas muestras.

La muestra VGP-01 (Figura 6-1) fue recuperada de la zona de domo (cerca del contacto domo - depósito piroclástico) y presentó alteración superficial con coloraciones grises oscuras, material que al ser removido permitió ver tonalidades amarillas y una textura porfirítica (cristales euhedrales de feldespatos). En las imágenes del escaneo de la sección delgada completa se identificaron grandes cristales euhedrales de feldespatos descritos como sanidina (Snd), fracturados, con presencia de óxidos. La porosidad se puede identificar en la imagen PPL (Figura 6-1 b) como espacios de microfracturas y otros vacíos en la masa fundamental.

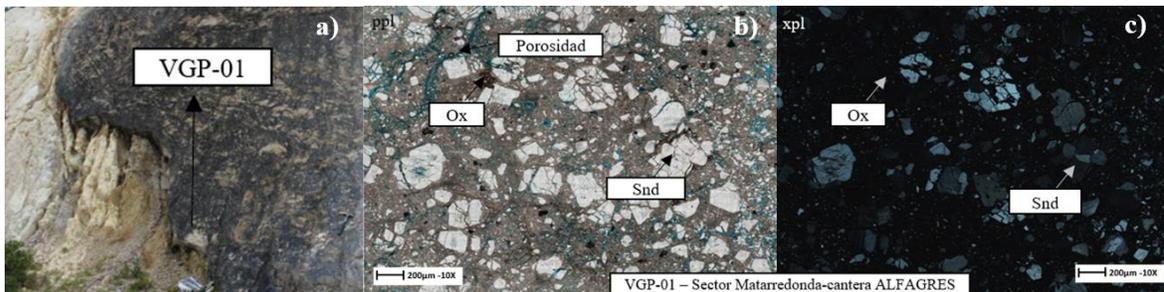


Figura 6-1: Muestra VGP-01 cantera ALFAGRES. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 10x y c) sección delgada en XPL, aumento 10x.

La muestra VGP-02 (Figura 6-2) se tomó de un depósito piroclástico en la cantera ALFAGRES, donde las rocas están moderadamente consolidadas y tienen color blanco o amarillo claro. A nivel microscópico se observaron megacrismos de feldespato fracturados, cuyos núcleos, en su mayoría, han sido removidos, generando porosidad secundaria (Figura 6-2 b).

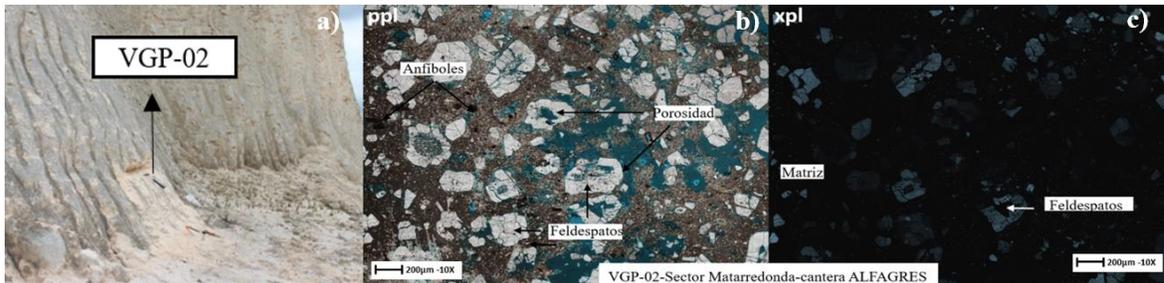


Figura 6-2: Muestra VGP-02 cantera ALFAGRES. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL aumento 10x y c) sección delgada en XPL aumento 10x.

En el sector central, último de nivel de terrazas, de la cantera ALFAGRES, se encontraron los materiales más compactos y duros con presencia de diaclasas, como se muestra en la Figura 6-3 a. La mineralogía principal de la muestra tomada allí también presentó grandes cristales de feldspatos y, en menor proporción, anfíboles.

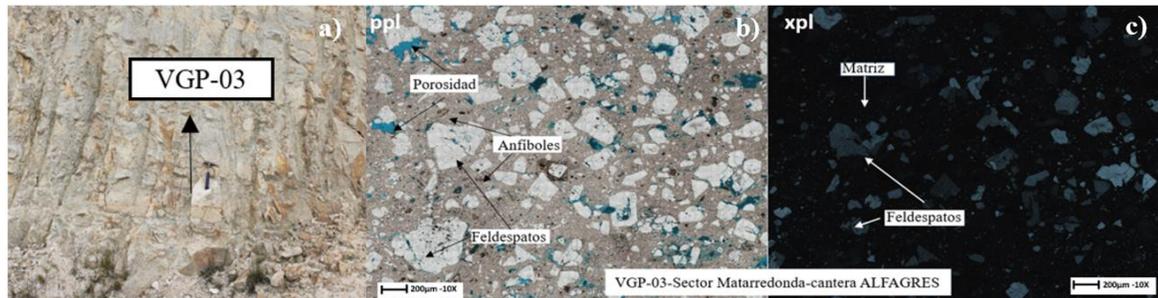


Figura 6-3: Muestra VGP-03 cantera ALFAGRES. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 10x y c) sección delgada en XPL, aumento 10x.

En el primer frente de explotación de la cantera ALFAGRES se encuentra un sector de brechas, reconocido por la presencia de fragmentos de feldespatos alcalinos (≥ 2 mm) de formas subangulares a subredondeadas dentro de una masa fundamental fina (Figura 6-4 a), donde se tomó la muestra VGP-04. Esta presentó una mineralogía principal de grandes cristales de feldespatos fracturados con plagioclasas, anfíboles y cuarzo.

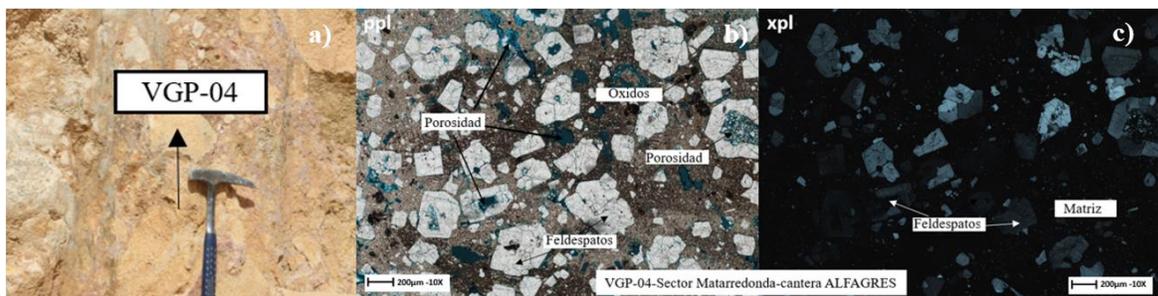


Figura 6-4: Muestra VGP-04 cantera ALFAGRES. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 10x y c) sección delgada en XPL, aumento 10x.

En el sector Alto de los Godos, se tomó al menos una muestra de cada uno de los tres domos. La primera, VGP-05 (Figura 6-5), se recuperó de un sitio ubicado 500 m al E del domo central, en una cantera sin nombre en explotación. Las rocas allí presentaron color gris claro, textura porfirítica y competencia moderada. Según la descripción petrográfica, esta muestra tiene una porosidad móldica, relacionada con la ausencia de algunos fenocristales de feldespato y la ocurrencia de microfracturas. Los minerales principales que se identificaron fueron plagioclasas, cuarzos y sanidinas.

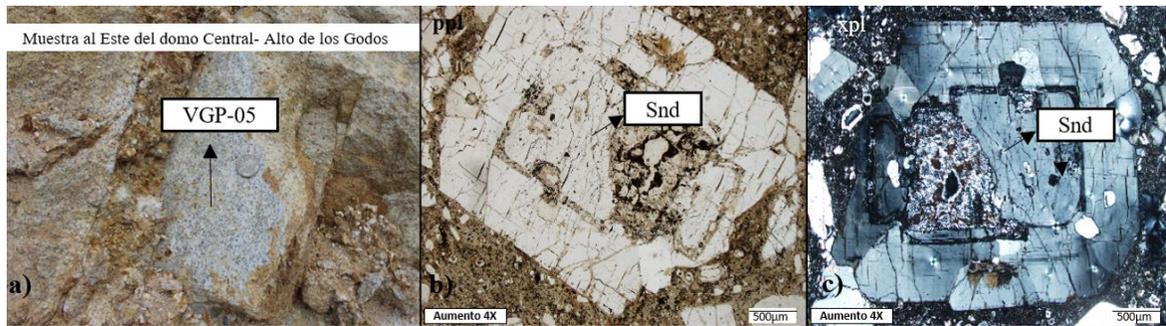


Figura 6-5: Muestra VGP-05 al este del domo Central - Alto de los Godos. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 4x y c) sección delgada en XPL, aumento 4x.

La muestra VGP-06 (Figura 6-6) se tomó en un corte de carretera del sector del domo NW, donde las rocas, de textura porfirítica con presencia de óxidos y arcillas, presentaron un color café con tonalidad clara a oscura y algunas zonas meteorizadas. En el análisis de la sección delgada se identificó que algunos de los grandes cristales de feldespato alcalino de esta muestra tenían inclusiones de cristales de plagioclasas, identificados por la presencia del típico maclado polisintético. En la Figura 6-6 c se observa la masa fundamental criptocristalina compuesta por microcristales, arcillas y óxidos de hierro.

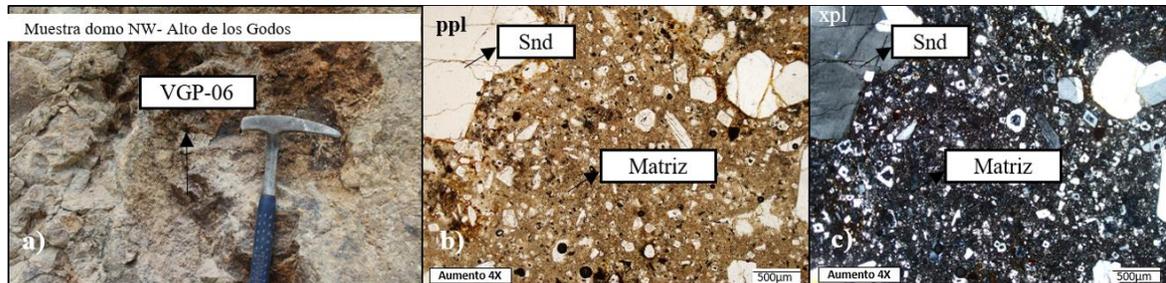


Figura 6-6: Muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 4x y c) sección delgada en XPL, aumento 4x.

En el domo Central del sector Alto de los Godos, se tomó una muestra de un afloramiento de una excavación artesanal de aproximadamente 2 m de profundidad, usada para el almacenamiento del agua. La muestra de roca porfirítica con moderada compactación se tomó de la parte superior de la excavación (Figura 6-7 a). La mineralogía principal correspondió a grandes cristales de sanidina y plagioclasas en medio de una matriz argilizada. También se reconocieron algunas hornblendas, anfíboles alterados, óxidos de hierro y arcillas.

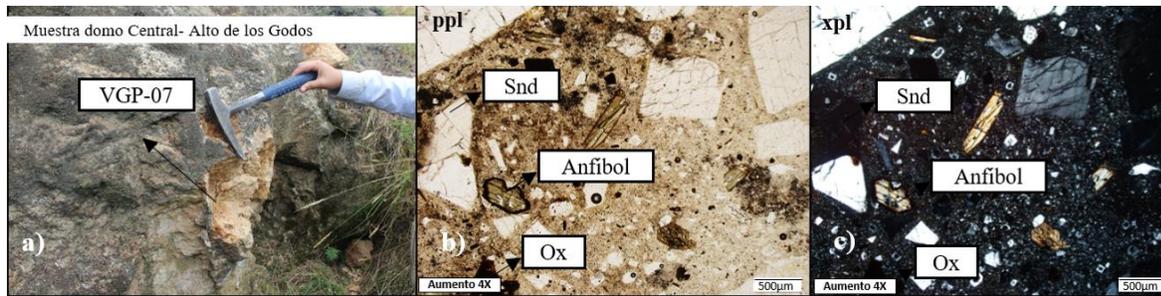


Figura 6-7: Muestra VGP-07 domo Central - Alto de los Godos. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 4x y c) sección delgada en XPL, aumento 4x.

Finalmente, las muestras del domo SE del Alto de los Godos se tomaron de los sectores en los que la roca exhibía mayor competencia (figuras Figura 6-8 y Figura 6-9). Estas muestras se caracterizaron por presentar fracturas con halos de alteración de colores rojizos y grises, y por la presencia de un sistema de venas orientadas y rellenas de material arcilloso (patrón tipo *stockwork*). Su mineralogía, principalmente, corresponde a feldespatos, cuarzo, sanidina y magnetita; minerales accesorios como el circón; y minerales de alteración como óxidos de hierro y arcillas.

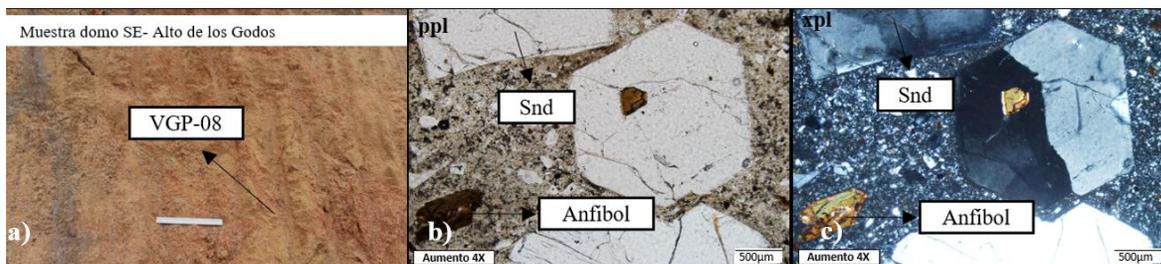


Figura 6-8: Muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 4x y c) sección delgada en XPL, aumento 4x.

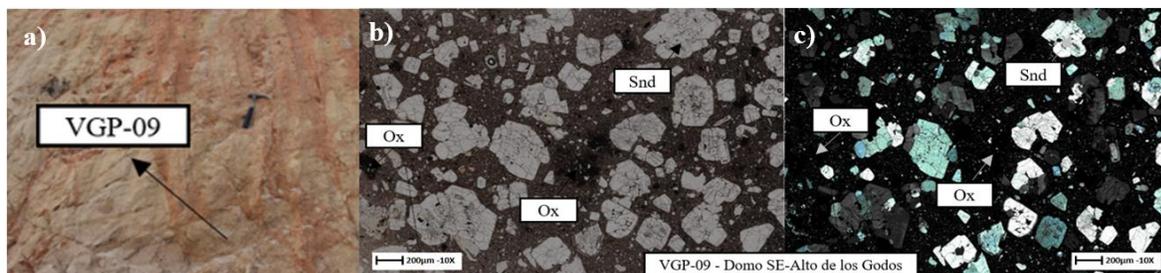


Figura 6-9: Muestra VGP-09 domo SE - Alto de los Godos. a) Afloramiento, b) sección delgada en PPL, aumento 10x y c) sección delgada en XPL, aumento 10x.

A continuación, se describe la mineralogía de las muestras analizadas: minerales esenciales, secundarios y de alteración. Además, la secuencia paragenética de cada grupo de minerales.

6.1.1 Minerales esenciales

Con las observaciones a nivel microscópico de las nueve secciones delgadas se identificó cuarzo (en menor proporción), feldespatos alcalinos y plagioclasas, descritos a continuación:

Cuarzo: se encontró en microcristales dentro de la masa fundamental. Presenta formas angulares a subangulares, parcial o totalmente fragmentados y bahías de disolución en algunos de los bordes.

Feldespatos alcalinos y plagioclasas: los cristales de feldespatos alcalinos se encontraron distribuidos en dos poblaciones, la primera como megacristales o fenocristales caracterizados por formas euhedrales y subedrales con zonación oscilatoria, maclados simples y bordes de sobrecrecimiento; y la segunda como microcristales dentro de la masa fundamental. Algunos de los fenocristales de feldespato alcalino presentaron inclusiones de cristales de plagioclasas con maclas polisintéticas, anfíboles, cuarzo y circones, no siempre en un mismo fenocristal. En la Figura 6-10 se muestra uno de los fenocristales de feldespato alcalino con un cristal de plagioclasa en el núcleo.



Figura 6-10: Microfotografías de feldespatos y plagioclasas muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos. a) Nícoles paralelos, b) nícoles cruzados y c) retrodispersado -Back Scattered Electrons (BSE). Fsp: feldespato alcalino. Pl: plagioclasa.

En las imágenes microscópicas del cristal y los esquemas ilustrativos (Figura 6-11 a 6-14), se pueden observar las características principales de los fenocristales de feldespato alcalino. La figura 6-10 presenta un agregado policristalino de feldespato potásico compuesto de dos individuos euhedrales de la misma especie mineralógica, con un sobrecrecimiento común al agregado, delimitado por un borde de reacción. Este fenocristal incluye otras especies minerales como plagioclasas y algunas facturas rellenas por vidrio.

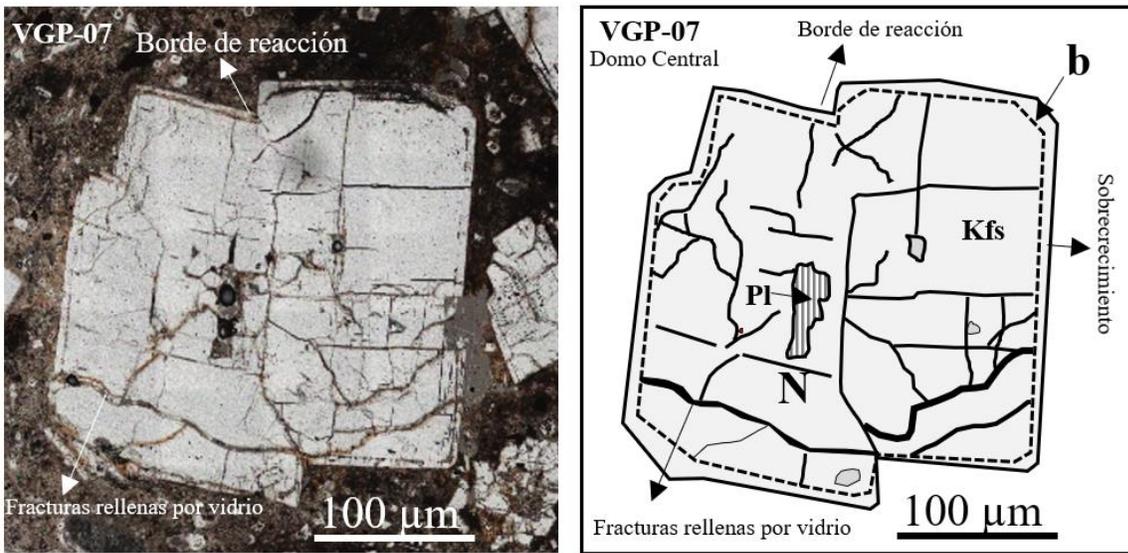


Figura 6-11: Fenocristal muestra VGP-07 domo Central - Alto de los Godos. Izquierda en PPL y derecha esquema de fenocristal con borde de reacción, presencia de cristal de plagioclasa en el núcleo y fracturas rellenas por vidrio volcánico. Kfs: feldespato, Pl: plagioclasa, N: núcleo y b: borde.

En la siguiente Figura 6-12) se muestra un fenocristal de feldespato potásico conformado por dos individuos minerales de la misma especie. Este agregado presenta a su vez cristales de plagioclasa (en núcleo de fenocristal) y cuarzo (inclusiones).

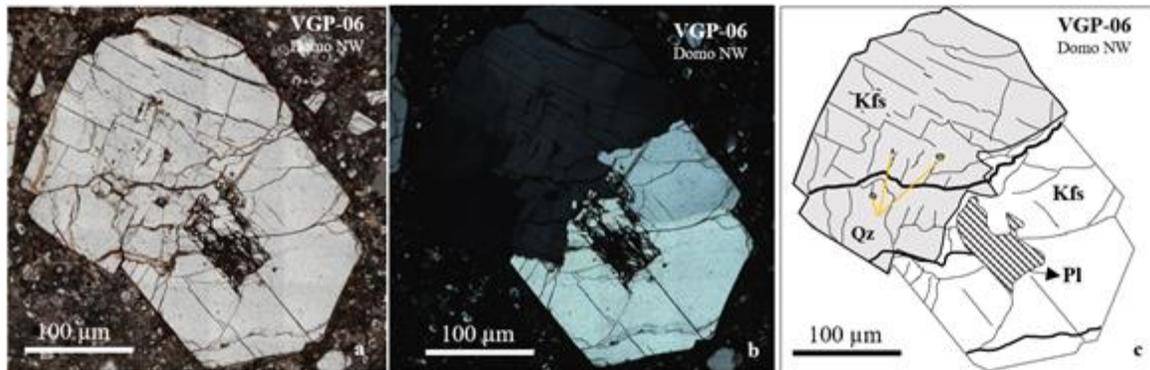


Figura 6-12: Microfotografías de fenocristales muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos. a) Fenocristal en PPL, b) imagen en XPL y c) esquema del fenocristal, donde está señalada la presencia de cristal de plagioclasa dentro de fenocristal de feldespato potásico. Kfs: feldespato, Pl: plagioclasa y Qz: cuarzo.

Algunos de los fenocristales de feldespato se muestran en la Figura 6-13, donde se puede identificar una alternancia de capas claras y oscuras de diferentes espesores, y cristales alterados de anfíboles en el núcleo. También se puede observar que algunos cristales de feldespato alcalino presentan núcleos de reabsorción y sobrecimientos (Figura 6-14).

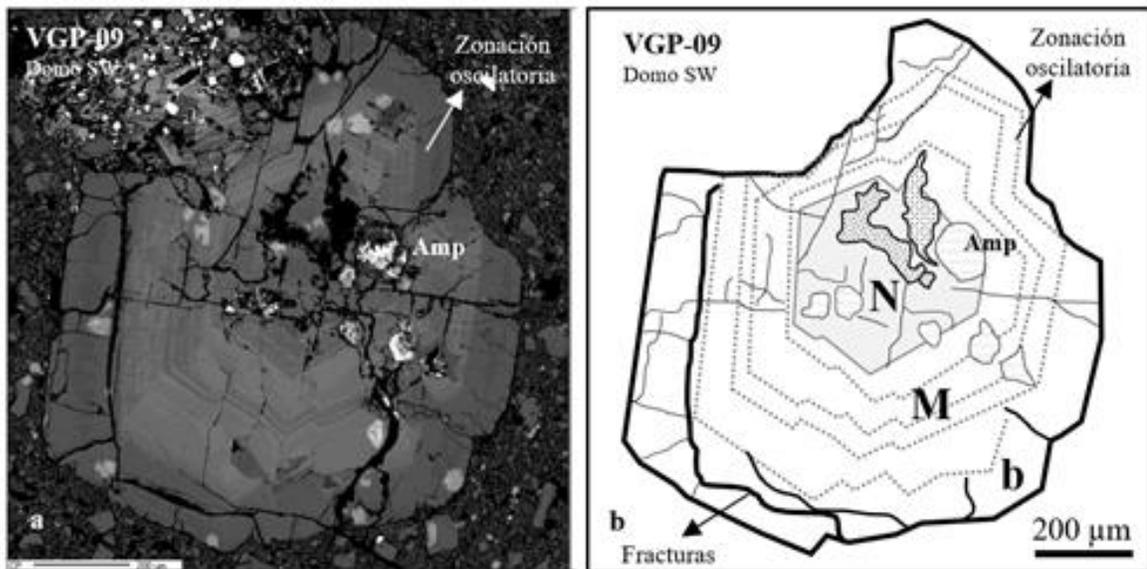


Figura 6-13: Fenocristal de feldespato zonado muestra VGP-09 domo SW – Alto de los Godos. a) Imagen composicional de electrones retrodispersados- BSE, obtenida mediante microsonda electrónica y b) esquema del fenocristal resaltando su zonación oscilatoria y la presencia de cristales alterados de anfíbol en el centro. n: núcleo; m: manto; b: borde y Amp: anfíboles.

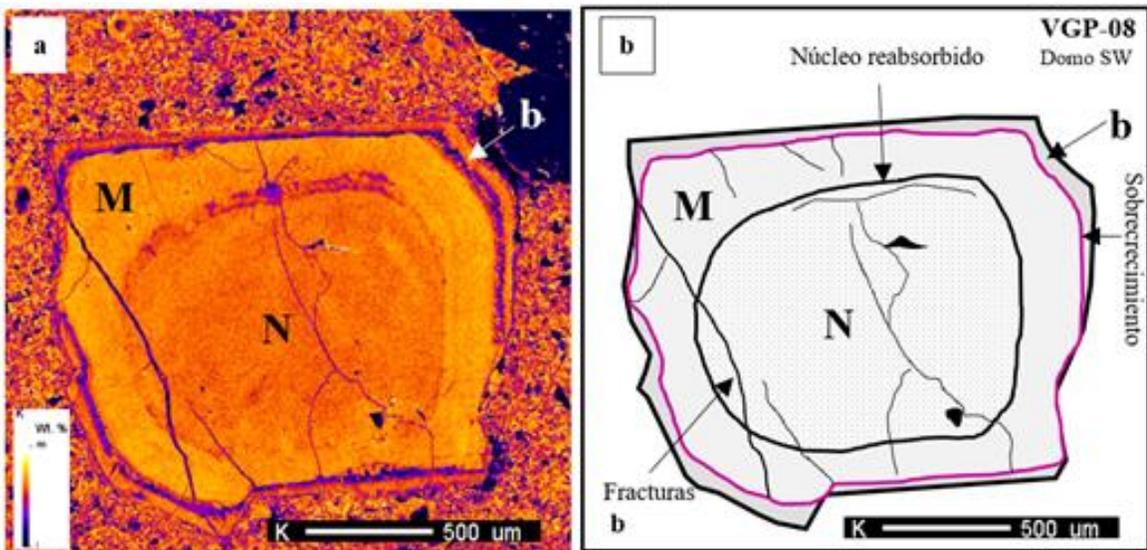


Figura 6-14: Mapa composicional de fenocristal de feldespato alcalino con textura de reabsorción muestra VGP-08 domo SW – Alto de los Godos. a) Mapa composicional de potasio (K) y b) esquema de fenocristal, donde se señala el núcleo reabsorbido y el borde de sobrecimiento anhedral.

6.1.2 Minerales accesorios

Anfíbol: estos cristales tienen forma poligonal hexagonal y con frecuencia exhiben patrones de clivaje a $56-124^\circ$. Cuentan con un pleocroísmo que varía de verde claro a oscuro y sus colores de interferencia son de segundo orden. Varios de los cristales se encuentran

fragmentados y alterados a óxidos de hierro, y en algunos casos dentro de fenocristales de plagioclasas.

Esferulitas: están dentro de la masa fundamental, conformadas principalmente por sílice muy fina.

Magnetita: se reconocen por el color gris pardo y sus características isotrópicas en nicoles cruzados. Generalmente está alterada a hematita hacia los bordes de los cristales y en algunas microfracturas.

Apatito: cristales incluidos en medio de los cristales de plagioclasas. Se diferencian de las inclusiones de circones por sus bajos colores de interferencia.

Circón: se encontraron incluidos en los fenocristales de plagioclasas, en forma prismática y con frecuencia subhedral.

6.1.3 Minerales de alteración

Arcillas: se encontraron diseminadas en forma de pequeñas escamas afectando tanto la matriz como algunos cristales de máficos y plagioclasas.

Óxidos de hierro: están diseminados en la masa fundamental, afectando con frecuencia los minerales de anfíbol, en donde adoptan, como en el caso de los minerales félsicos hoy ausentes, una forma móldica. En algunos casos estos óxidos adquieren las formas hexagonales preexistentes de los anfíboles, quedando sólo el borde del cristal generando formas móldicas.

Hematita: reemplaza los cristales de magnetitas, de los que se diferencia por la presencia de un moderado pleocroísmo, débil anisotropía y abundantes reflejos internos de color rojo.

Calcita: se identificó en algunos rellenos de sectores dominados por óxidos de hierro, donde presenta forma anhedral con colores de interferencia altos de tercer orden.

De los análisis petrográficos se propone una secuencia paragenética general. Esta indica que los minerales se formaron en conjunto por el mismo proceso genético, como se registra en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Secuencia paragenética de las rocas del sector Alto de los Godos

Categoría	Mineral	Primarios	Secundarios
Minerales principales	Plagioclasa	X	
	Cuarzo	X	
	Sanidina	X	
	Anortoclasa	X	
Minerales accesorios	Anfíbol	X	
	Cuarzo en esferulitas	X	
	Magnetita	X	
	Apatito	X	
	Circón	X	
Minerales de alteración	Arcillas		X
	Óxidos de hierro		X
	Hematita		X
	Calcita		X

Las casillas grises marcadas con una X indican la categoría del mineral.

6.1.4 Clasificación petrográfica

Las rocas fueron clasificadas como feno-traquitas, feno-traquitas cuarzo feldespáticas alcalinas, feno-traquita feldespática alcalina y feno-latitas (figura 6-15). A continuación, se presenta un consolidado de los minerales encontrados en cada muestra con su respectiva clasificación (Tabla 6-2); la clasificación de las rocas (Tabla 6-3) y sus texturas (Tabla 6-4).

Tabla 6-2: Mineralogía y clasificación modal según el conteo de puntos de las muestras sectores Alto de los Godos y Quebrada Honda

Muestra	Matriz y fenocristales			Minerales principales				Minerales accesorios				Minerales de alteración			
	%C	%M	% ø	P	Q	Snd	Hbl	Prx	Mt	Ap	Cr	Arc	Ox	Cal	Rt
VGP-01	39.2	57.2	3.2	16.7	0.9	9.2	2.1	-	-	0.2	0.2	3.4	3.6	0.6	-
VGP-02	32.3	56.3	11.4	12.0	0.5	9.2	1.4	-	-	0.3	0.3	1.6	7.1	-	-
VGP-03	36.9	60.1	3.0	7.7	0.6	18.5	1.2	0.3	-	0.3	0.3	3.0	5.1	-	-
VGP-04	36.9	56.9	6.2	7.2	0.5	20.5	0.2	0.3	-	0.2	0.5	0.2	5.0	-	-
VGP-05	37.5	57.9	4.6	5.8	0.7	20.3	-	-	-	0.2	0.7	4.8	1.2	-	-
VGP-06	45.8	51.7	2.5	2.8	2.5	22.9	1.1	-	2.5	0.3	0.3	4.2	7.9	-	-
VGP-07	34.0	63.6	2.4	1.2	1.2	14.8	1.5	-	2.4	0.3	0.6	3.0	6.8	-	-
VGP-08	34.5	61.4	4.1	0.8	0.5	13.2	3.9	-	1.8	-	0.3	3.4	9.8	-	-
VGP-09	34.6	62.9	2.5	3.6	1.1	18.7	1.6	-	1.1	0.3	0.3	1.9	4.9	-	0.8

%C: cristales, % M: matriz, % ø: porosidad, P: plagioclasa, Q: cuarzo, Snd: sanidina, Hbl: hornblenda, Prx: piroxenos, Mt: magnetita, Ap: apatito, Cr: circón, Arc: arcillas, Ox: óxidos, Cal: calcita y Rt: rutilo.

Tabla 6-3: Clasificación de las rocas según Streckeisen (1979) sectores ALFAGRES y Alto de los Godos

Muestra	Minerales			Clasificación de Streckeisen (1979)
	%Q	%A	%P	
VGP-01	3.35	34.32	62.31	Feno-latita con alteración argílica
VGP-02	2.3	42.3	55.2	Feno-latita con alteración argílica
VGP-03	2.2	69.02	28.7	Feno-traquita con alteración argílica
VGP-04	1.77	72.69	25.53	Feno-traquita con alteración argílica
VGP-05	2.61	75.74	21.6	Feno-traquita con alteración argílica
VGP-06	8.86	81.12	9.92	Feno-traquita cuarcífera con alteración argílica
VGP-07	6.97	86.04	6.97	Feno-traquita cuarzo alcalina con alteración argílica
VGP-08	3.44	91.03	5.51	Feno-traquita alcalina con alteración argílica
VGP-09	4.7	79.9	15.4	Feno-traquita alteración argílica

Valores normalizados de Q: cuarzo, A: feldespato alcalino y P: plagioclasa. Muestras VGP-01 a la VGP-04 sector ALFAGRES, el restante sector Alto de los Godos

Tabla 6-4: Características texturales de las rocas sectores ALFAGRES y Alto de los Godos

Muestra	Patrón textural			Textura general	Texturas específicas
	Tm	Tr	Ta		
VGP-01	Hipocristalina	Porfírica	Grueso 3-5 mm	Porfírica	Textura fragmentaria, zonas con cavidades (textura vuggy)
VGP-02					Brechoide
VGP-03					Texturas de corrosión en anfíboles
VGP-04					Texturas de corrosión en anfíboles
VGP-05					Zonación de cristales Sobrecimiento de cristales (feldespatos alcalinos)
VGP-06					Textura glomeroporfírica
VGP-07					Sobrecimiento de cristales (feldespatos alcalinos)
VGP-08					Sobrecimiento de cristales
VGP-09					Sobrecimiento de cristales (feldespatos alcalinos) textura esqueletal

Tm: textura de la masa fundamental, Tr: textura y T: tamaño. Muestras VGP-01 a la VGP-04 sector ALFAGRES, el restante sector Alto de los Godos

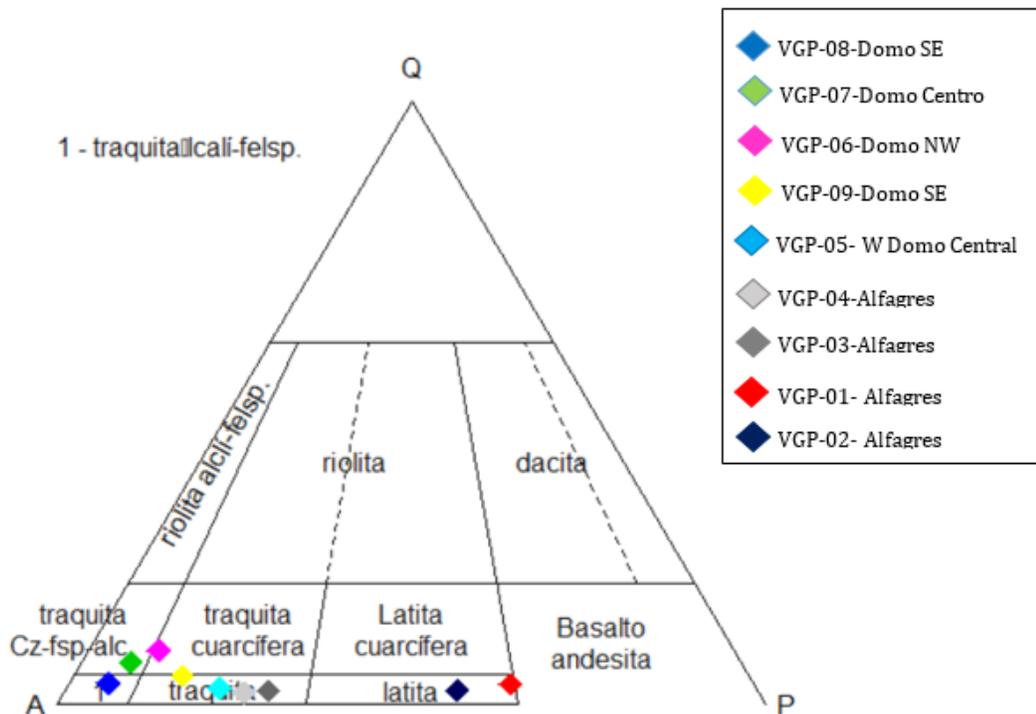


Figura 6-15: Diagrama de clasificación rocas sectores ALFAGRES y Alto de los Godos

6.2 Catodoluminiscencia

Con este método se analizaron fenocristales de feldespatos alcalinos de tres secciones delgadas correspondientes a las muestras VGP-06 (Figura 6-16), VGP-08 (Figura 6-17) y VGP-09 (Figura 6-18). De forma general, se presentan dos colores de luminiscencia (rojo y verde-amarillo); el color rojo se distribuye en todo el fenocristal con algunos sectores de mayor intensidad, que permiten identificar la zonación del cristal. El color verde-amarillo se presenta en cristales de plagioclasas que se encuentran dentro de los fenocristales de feldespatos.

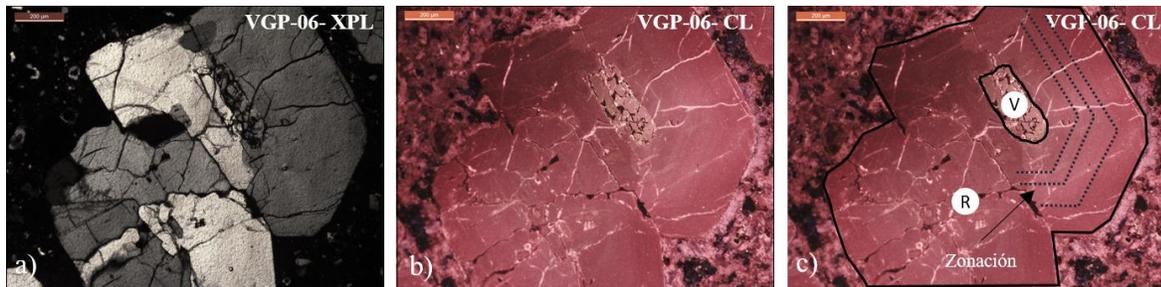


Figura 6-16: Catodoluminiscencia muestra VGP-06 domo SW - Alto de los Godos. a) Imagen de fenocristal de feldespato alcalino en luz polarizada cruzada (XPL), b) imagen de catodoluminiscencia (CL) y c) imagen de CL en la que se resalta la zonación del cristal. R: luminiscencia color rojo y V: luminiscencia color verde.

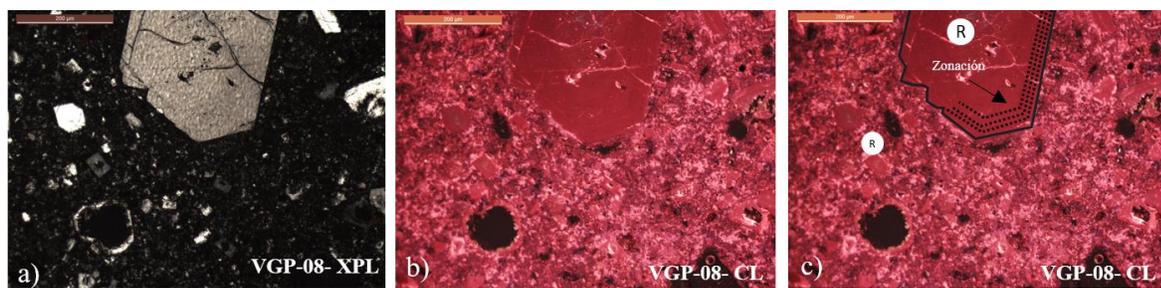


Figura 6-17: Catodoluminiscencia muestra VGP-08 – Alto de los Godos. a) Imagen de fenocristal muestra en XPL, b) imagen de CL y c) imagen de CL en la que se resalta la tenue zonación del cristal. R: luminiscencia color rojo y V: luminiscencia color verde.

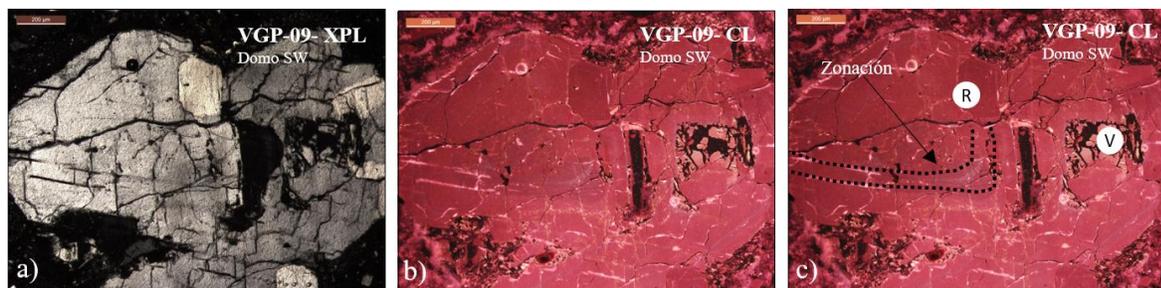


Figura 6-18: Catodoluminiscencia muestra VGP-09 – Alto de los Godos. a) Imagen de fenocristal muestra en XPL, b) imagen de CL y c) imagen de CL en la que se resalta zonación del cristal. R: luminiscencia color rojo y V: luminiscencia color verde.

6.3 Química mineral

Los análisis cuantitativos de química mineral se les realizaron a cristales de feldspatos y anfíboles. Estas mediciones fueron efectuadas en puntos de núcleos y bordes, líneas de perfil y mapas composicionales de los cristales. En la siguiente **Tabla 6-5:**) se relacionan el tipo de medición, mineral analizado, muestras y cantidad de análisis.

Tabla 6-5: Mediciones de química mineral realizadas en cristales de feldespatos y anfíboles

Tipo de medición	Mineral	Muestras	Cantidad
Puntos	Feldespatos	VGP-03, VGP-04, VGP-05, VGP-06, VGP-07 y VGP-09	50
	Anfíboles	VGP-03, VGP-09, VGP-06 y VGP-07	32
Perfiles	Feldespatos	VGP-08	2
Mapas	Feldespatos	VGP-01, VGP07, VGP-06, VGP-08 y VGP-09	5

Los feldespatos se clasificaron por sus proporciones de CaO, Na₂O y K₂O con el diagrama ternario de Marshall (1996) de albita, anortita y ortoclasa. En la figura 6-19, se señalan 50 puntos de feldespatos medidos en seis muestras. En resumen, estos se concentran principalmente en el área de la anortoclasa, seguido de la albita y sólo unos puntos en la sanidina.

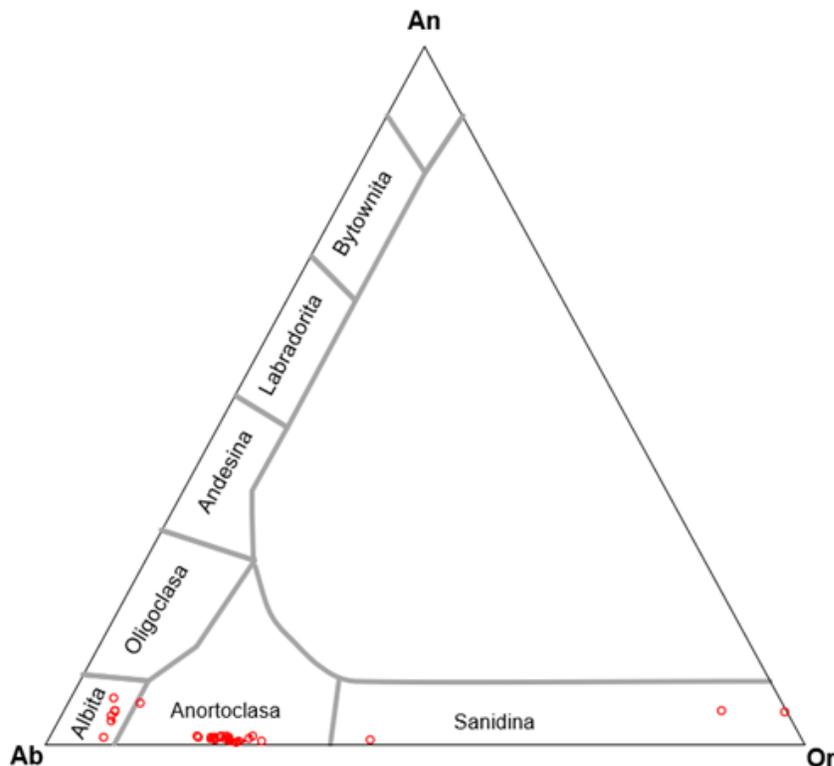


Figura 6-19: Diagrama de clasificación de feldespatos de Marshall (1996) de las muestras VGP-03, VGP-04, VGP-05, VGP-06, VGP-07 y VGP-09. Los círculos rojos representan un punto de medición en diferentes cristales de feldespatos.

Los feldespatos tipo plagioclasa se encuentran como microcristales con abundante microfracturamiento y conservan el típico maclado polisintético y bajos colores de

interferencia. En las Figura 6-20 y Figura 6-21 se presentan fotografías en microscopio petrográfico e imágenes de electrones retrodispersados (microsonda) de anfíboles encontrados en la muestra VGP-09. Los resultados de los análisis puntuales en anfíboles fueron realizados a cristales que conservan sus formas poligonales, algunos de estos presentan bordes corroídos y reemplazamiento por óxidos de hierro y arcillas

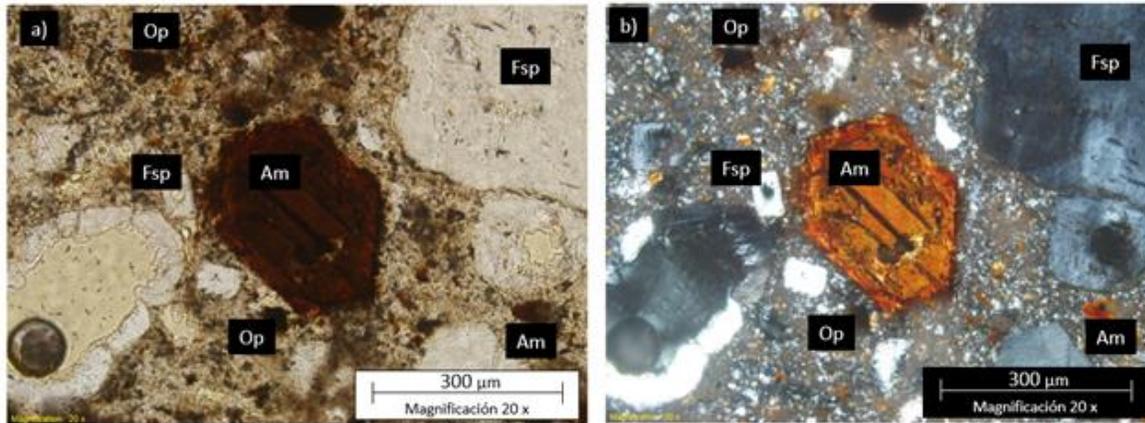


Figura 6-20: Microfotografías de anfíboles de la muestra VGP-09 domo SE – Alto de los Godos. a) Nicoles paralelos y b) nicoles cruzados. Am: anfíbol, Fsp: feldespatos y Op: opacos.

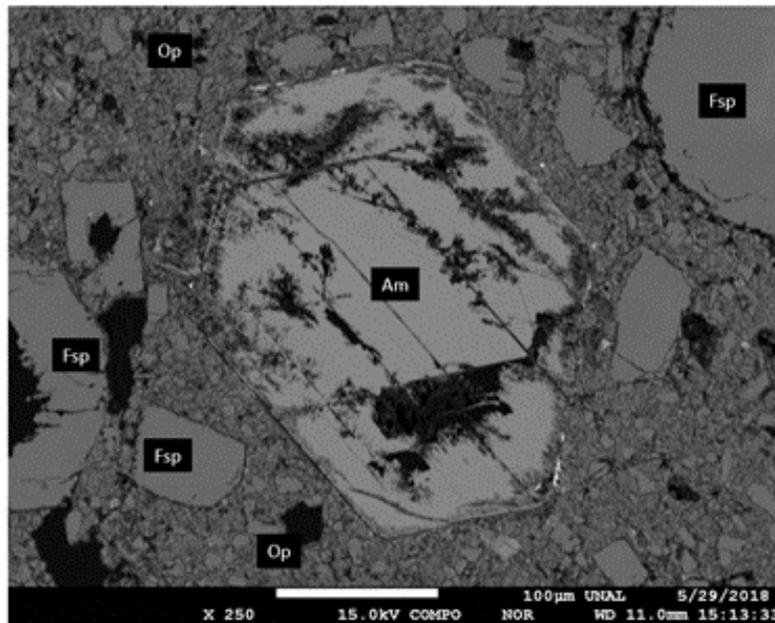


Figura 6-21: Imagen de electrones retrodispersados para el anfíbol de la muestra VGP-09 domo SE – Alto de los Godos. Am: anfíbol, Fsp: feldespatos y Op: opacos.

En la Figura 6-22 se presenta el diagrama de límite composicional Na-Ca (Hawthorne et al., 2012), donde se clasifican los anfíboles en los grupos de las richteritas y katoforitas.

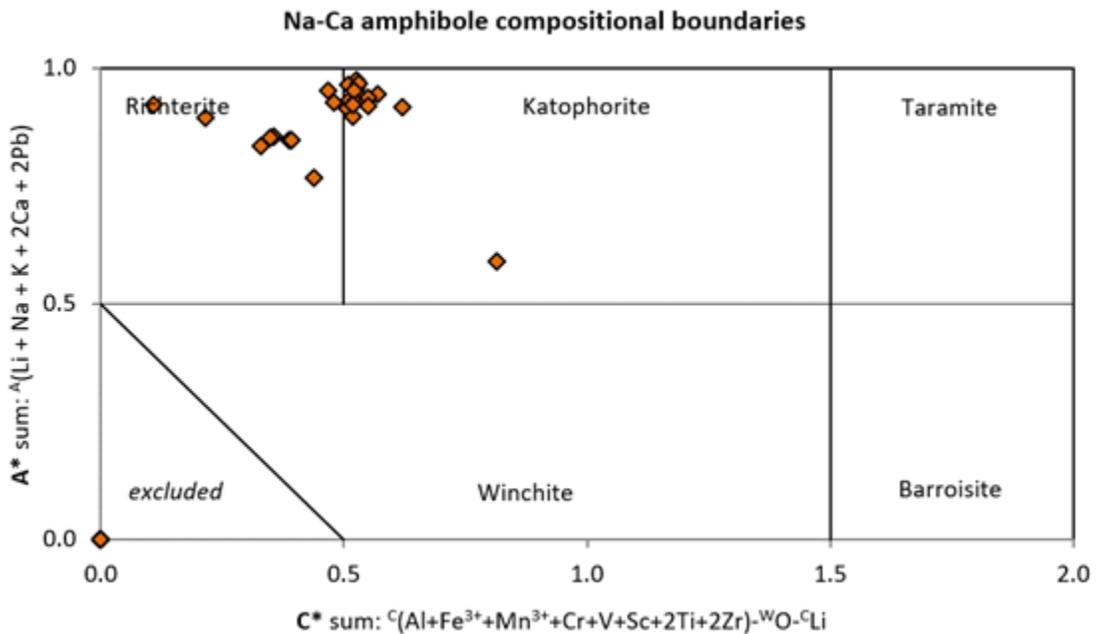


Figura 6-22: Diagrama de clasificación de anfíboles de composición Na-Ca de cristales muestras VGP-03, VGP-09, VGP-06 y VGP-07. Los rombos de color naranja representan cada medición realizada a diferentes cristales de anfíboles.

Los resultados de los análisis de química mineral también muestran valores de Al_2O_3 en un rango de 1.5-3.5 % wt., exceptuando los anfíboles de la muestra VGP-03 que registran valores de 15-23 % wt. Los valores en porcentaje en peso de TiO_2 (< 0.7% wt.), Na_2O (0.15-9.0 % wt.), K_2O (0.4-8.4 % wt.), SiO_2 (38-69 % wt.), CaO (0.013-11.31 % wt.), FeO (10-18 % wt.), MgO (0.02-15% wt.) y finalmente valores Cr_2O_3 (0.016-0.02 % wt.). La información completa de los resultados de estos los análisis se puede ver en el anexo D.

El primer perfil se muestra en la Figura 6-23, donde los valores registrados en porcentaje en peso del SiO_2 están en el rango 55.14 a 67.73; Al_2O_3 en el rango de 18.77 a 20.02; del Na_2O entre 7.15 y 10.40; del K_2O de 2.92 a 4.34; del CaO entre 0.032 y 0.377 y del TiO_2 entre 0.005 y 0.194. Las inflexiones las líneas en la Figura 6-23 c corresponden a bajos valores de K_2O , que indican inclusiones de mineral de diferente composición. Finalmente, según el diagrama triangular anortita (An), albita (Al) y ortoclasa (Or) de Marshall (1996), la clasificación es principalmente de tipo anortoclasa con una inclusión de un cristal de sanidina (Figura 6-23 b).

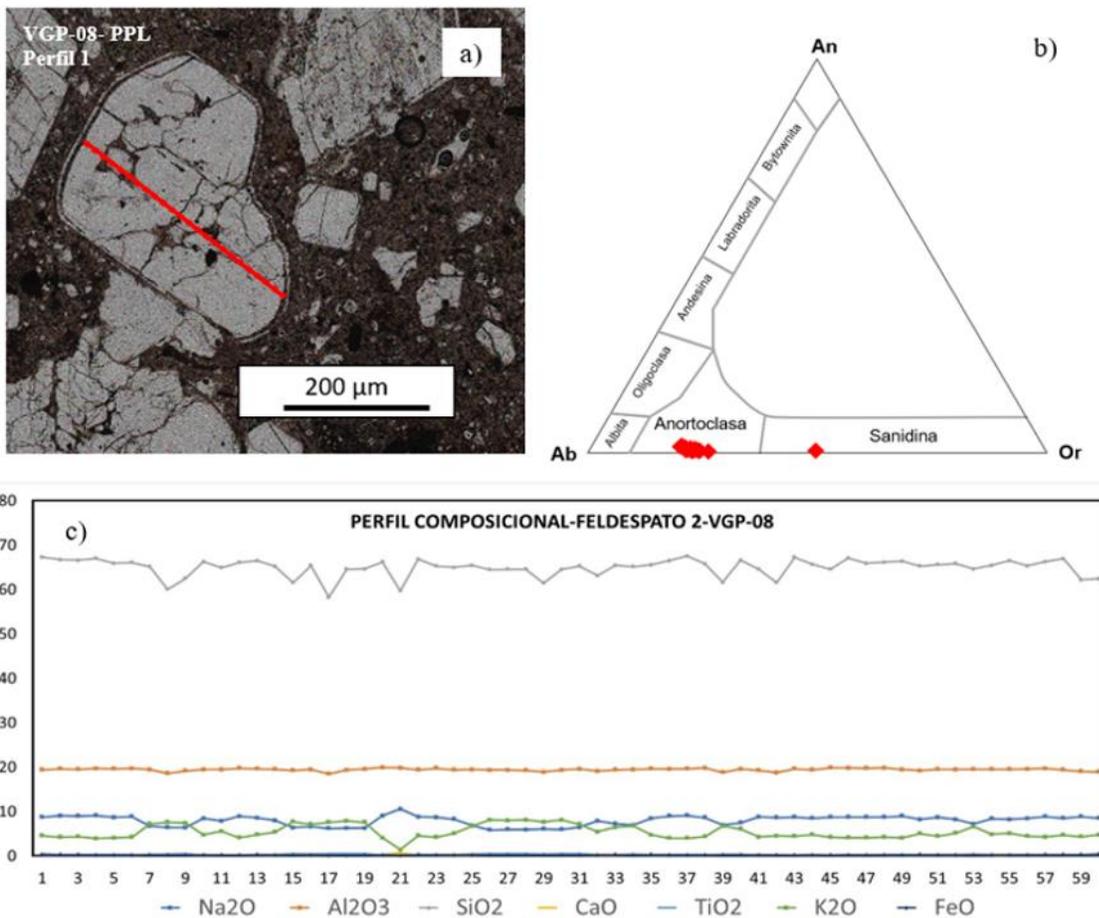


Figura 6-23: Química mineral de fenocristal de la muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos. a) Imagen en PPL del fenocristal de feldespato analizado a lo largo de la línea roja, b) clasificación según Marshall (1996), para cada punto analizado a lo largo de la línea mostrada en a). c) perfil composicional del fenocristal.

El mapa composicional del fenocristal analizado con el perfil 1 (figura 6-23) se presenta en la Figura 6-24. Según la escala de colores en porcentaje en peso (wt. %), los colores cálidos (rojo, naranja y amarillo) indican una mayor concentración del elemento en el mineral, mientras que los colores fríos (azules y morados) menor porcentaje. En el caso de la muestra VGP-08, se identifica un contenido de sodio (Na) más o menos homogéneo en los fenocristales de feldespato y los microcristales en la masa fundamental. El contenido de potasio (K) se puede identificar superficialmente enriquecido hacia los bordes de los cristales y, así como el borde externo del cristal antes de un sobrecrecimiento del mismo.

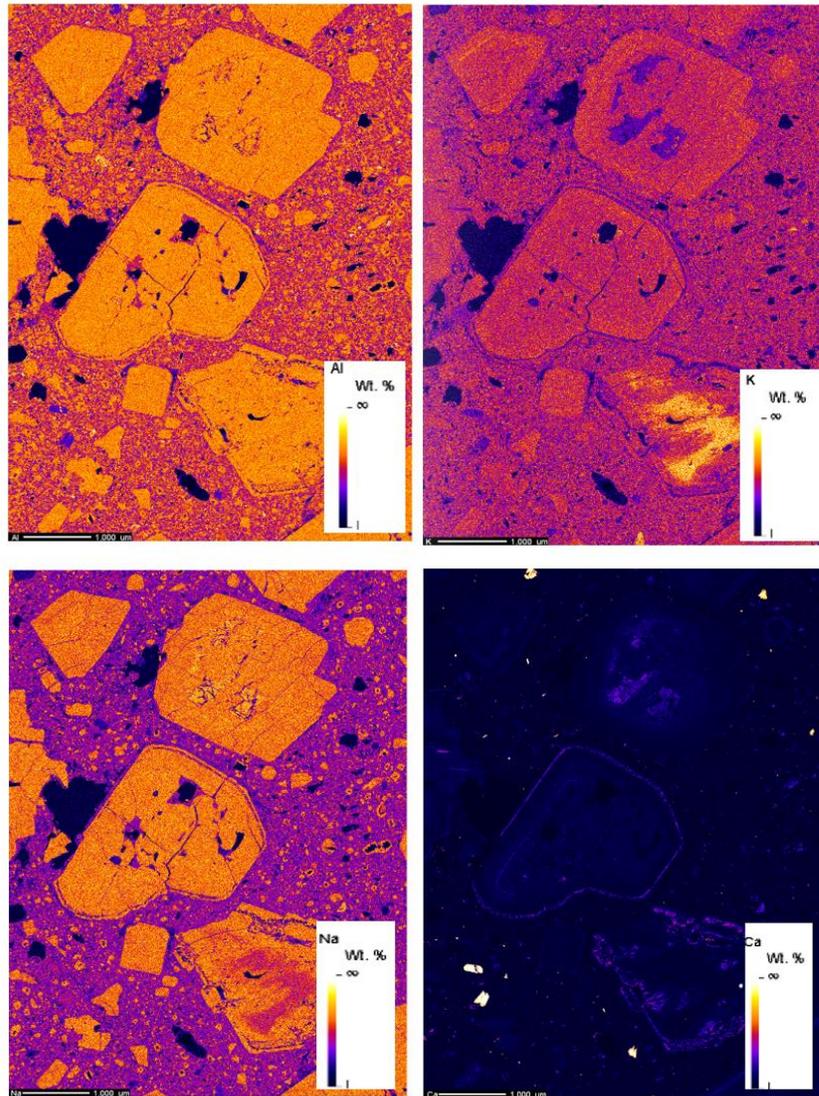


Figura 6-24: Mapa composicional fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE -Alto de los Godos. Elementos analizados Al, K, Na y Ca. La escala de colores indica las variaciones en % en peso en la concentración del elemento, los colores cálidos (rojos, amarillos y naranja) mayor concentración y colores fríos (azules y morados) menor concentración.

A continuación, se presenta otro perfil composicional de fenocristal de feldespato alcalino tipo anortoclasa (Figura 6-25). Vistos bajo el microscopio petrográfico, este tipo de cristales presentaron superficies claras sin zonaciones muy penetrativas u otros tipos de cristales como inclusiones.

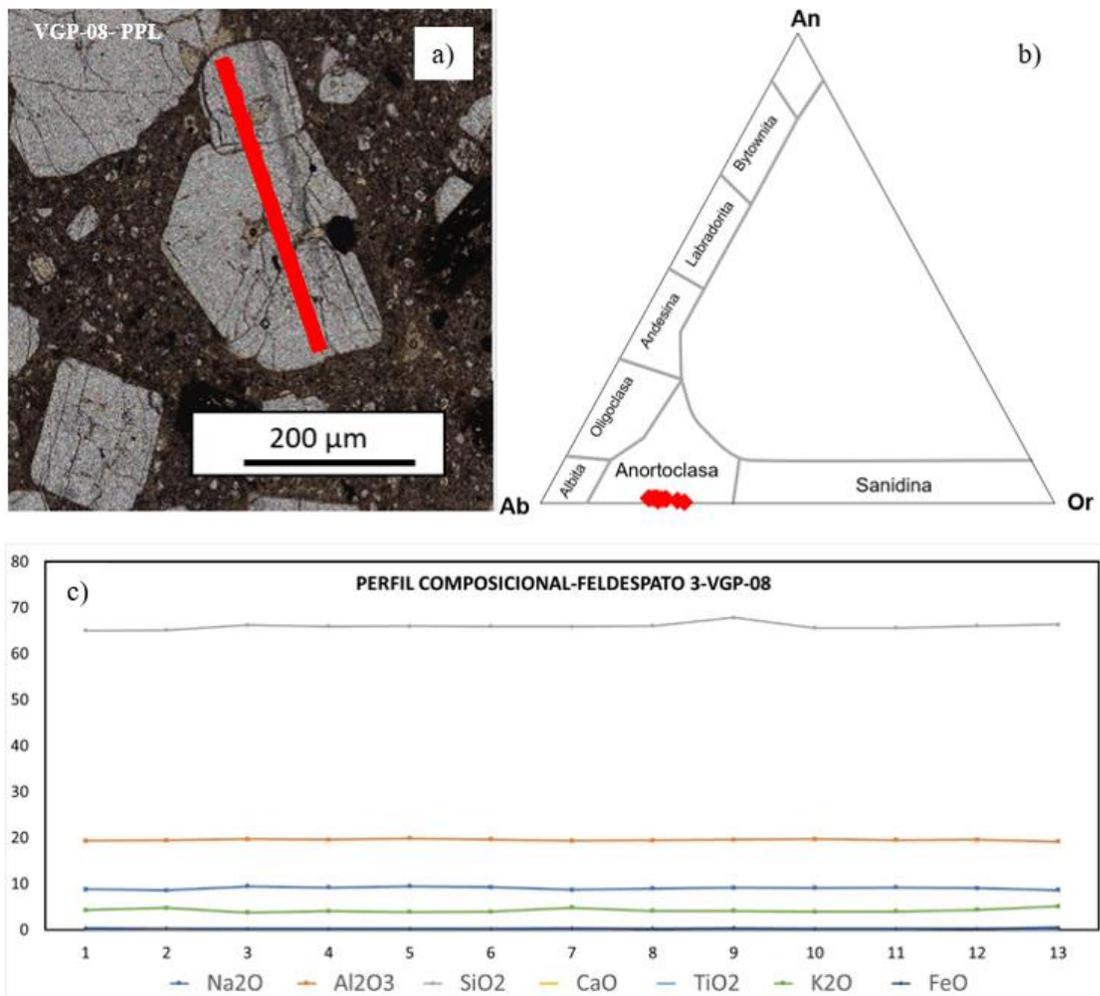


Figura 6-25: Química mineral muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos. a) Imagen en PPL de fenocristal de feldespato-2, la línea roja indica el perfil analizado composicionalmente, b) clasificación según Marshall (1996) y c) perfil composicional fenocristal de feldespato.

En los mapas composicionales (figura 6-26) sí se identificaron zonaciones en el cristal, hacia los bordes de composición potásica y hacia el núcleo de composición sódica. Además, se observaron altos valores de calcio relacionados con las plagioclasas incluidas dentro del fenocristal.

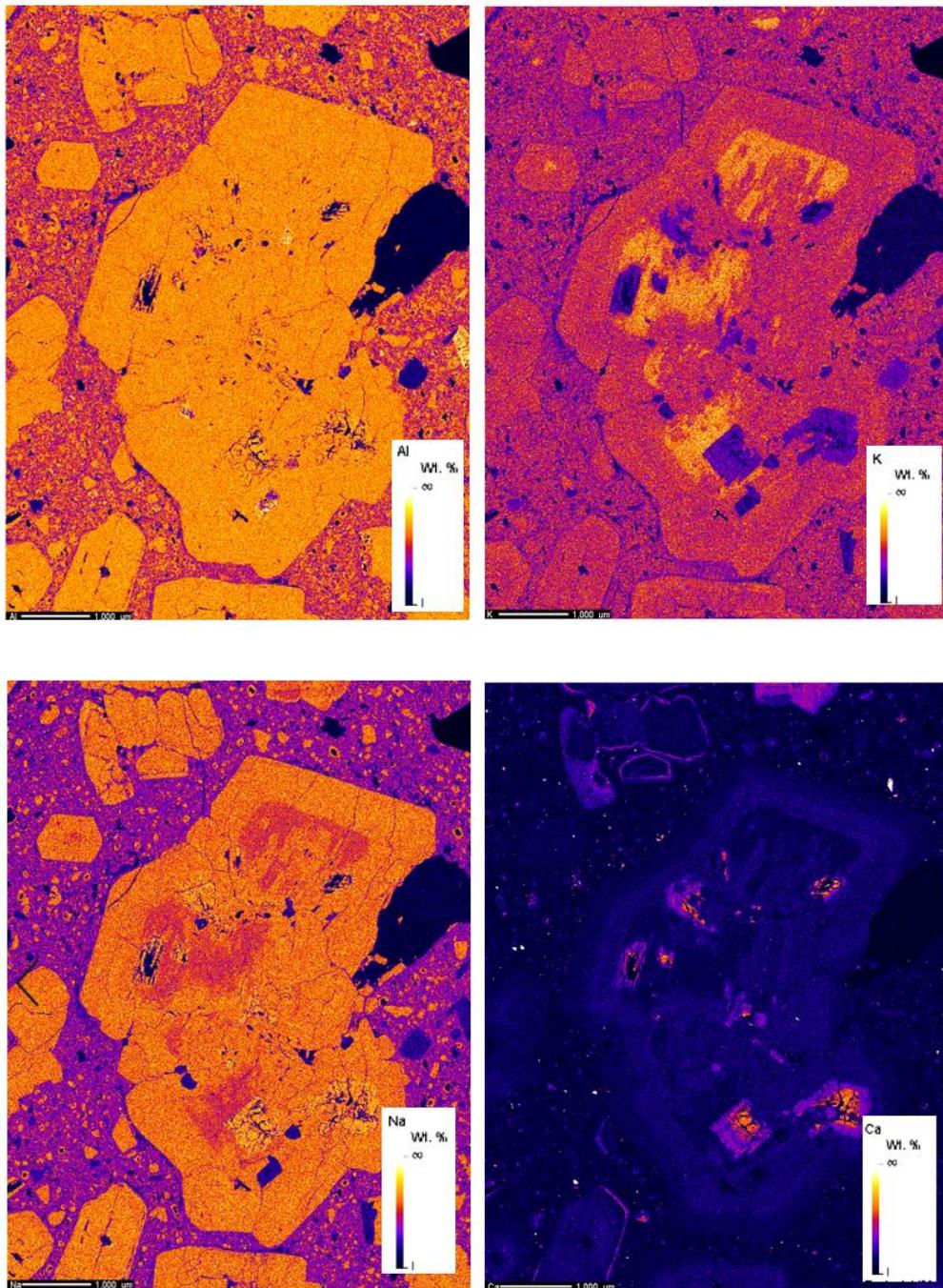


Figura 6-26: Mapa composicional fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos. Elementos analizados Al: aluminio, K: potasio, Na: sodio y Ca: calcio.

También se reconocieron cristales uniformes en composición, principalmente feldespato tipo anortoclasa, como se puede observar en la Figura 6-27. Este fenocristal exhibe una zonación tenue, detectada en el mapa composicional de potasio (Figura 6-28).

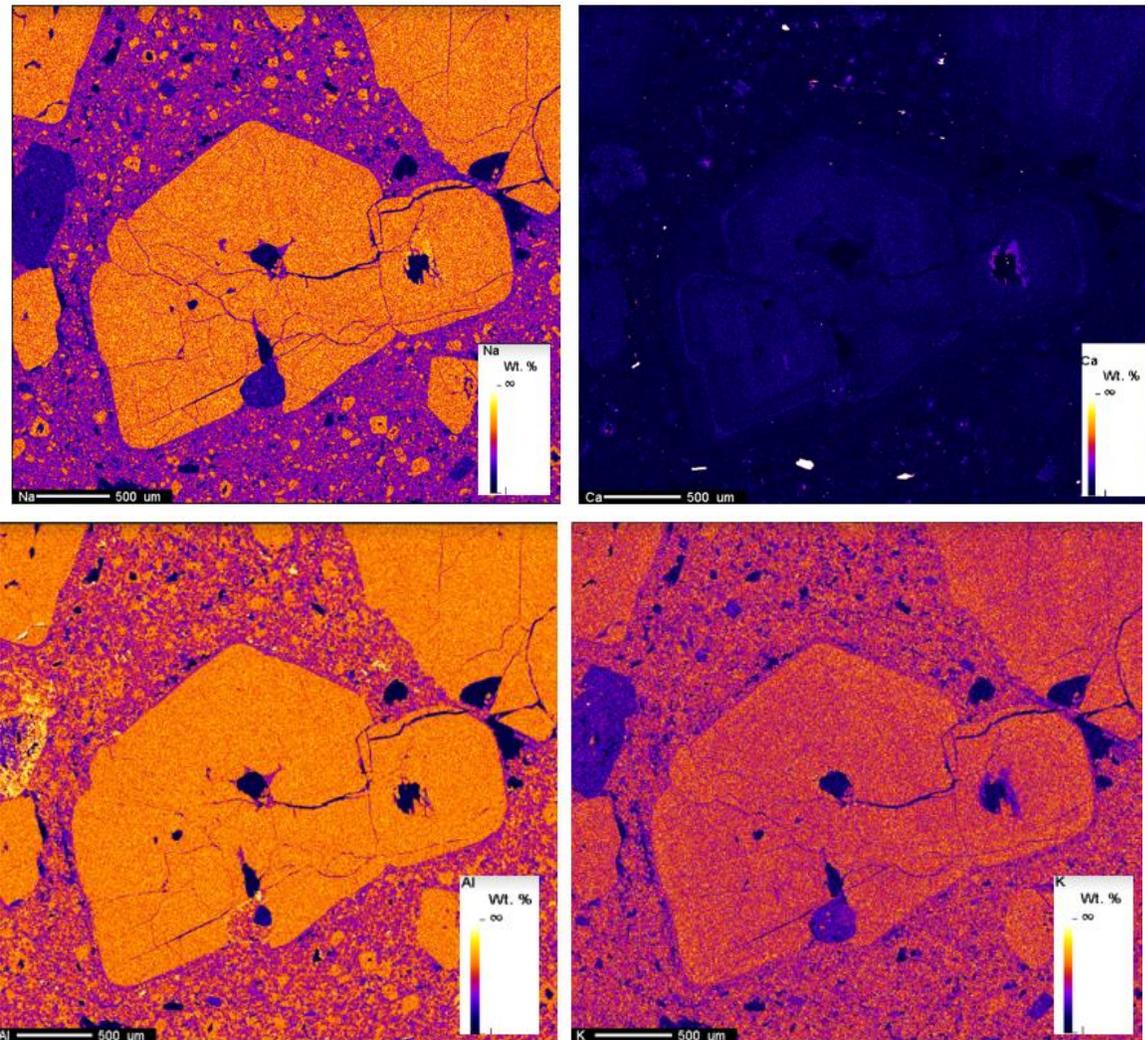


Figura 6-27: Mapas composicionales de fenocristal de feldespato muestra VGP-08 domo SE - Alto de los Godos. Elementos analizados Al: aluminio, K: potasio, Na: sodio y Ca: calcio.

A continuación, se presentan los mapas composicionales (Figura 6-28 a la Figura 6-31) de los fenocristales en muestras de los domos SE, NW y Central del Alto de los Godos y del depósito piroclástico de la cantera ALFAGRES. En general, en estas muestras los cristales presentaron composiciones similares como fenocristales de feldespato de tipo anortoclasa y cristales de plagioclasas tipo albita, con una mayor concentración de sodio. Algunos bordes de sobrecimiento se reconocieron por el aumento en su contenido de calcio.

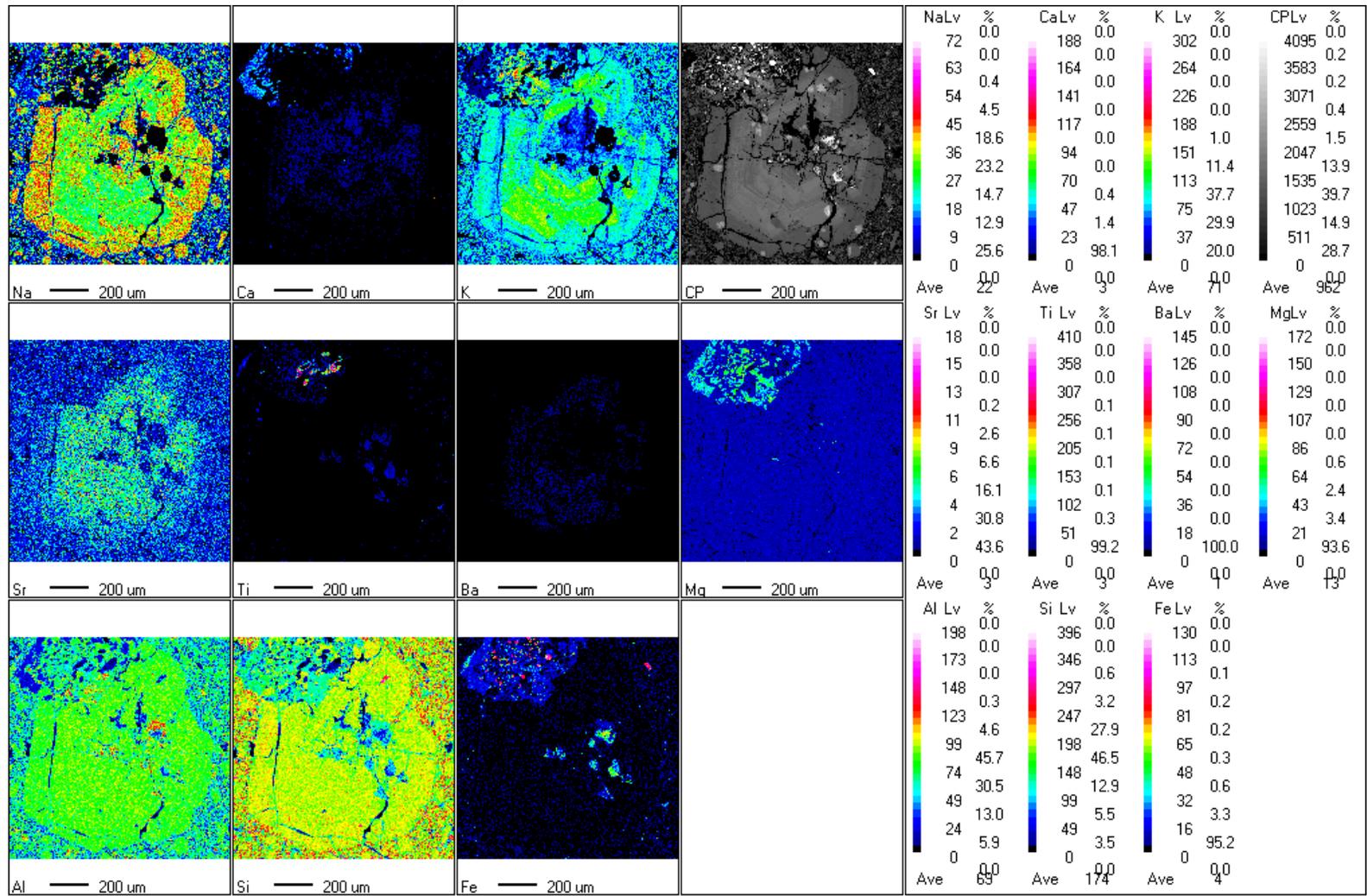


Figura 6-28: Imagen composicional cristal de feldespato muestra VGP-09 domo SE - Alto de los Godos. Elementos registrados: Na, Sr, Ca, Ti, K, Ba y W.

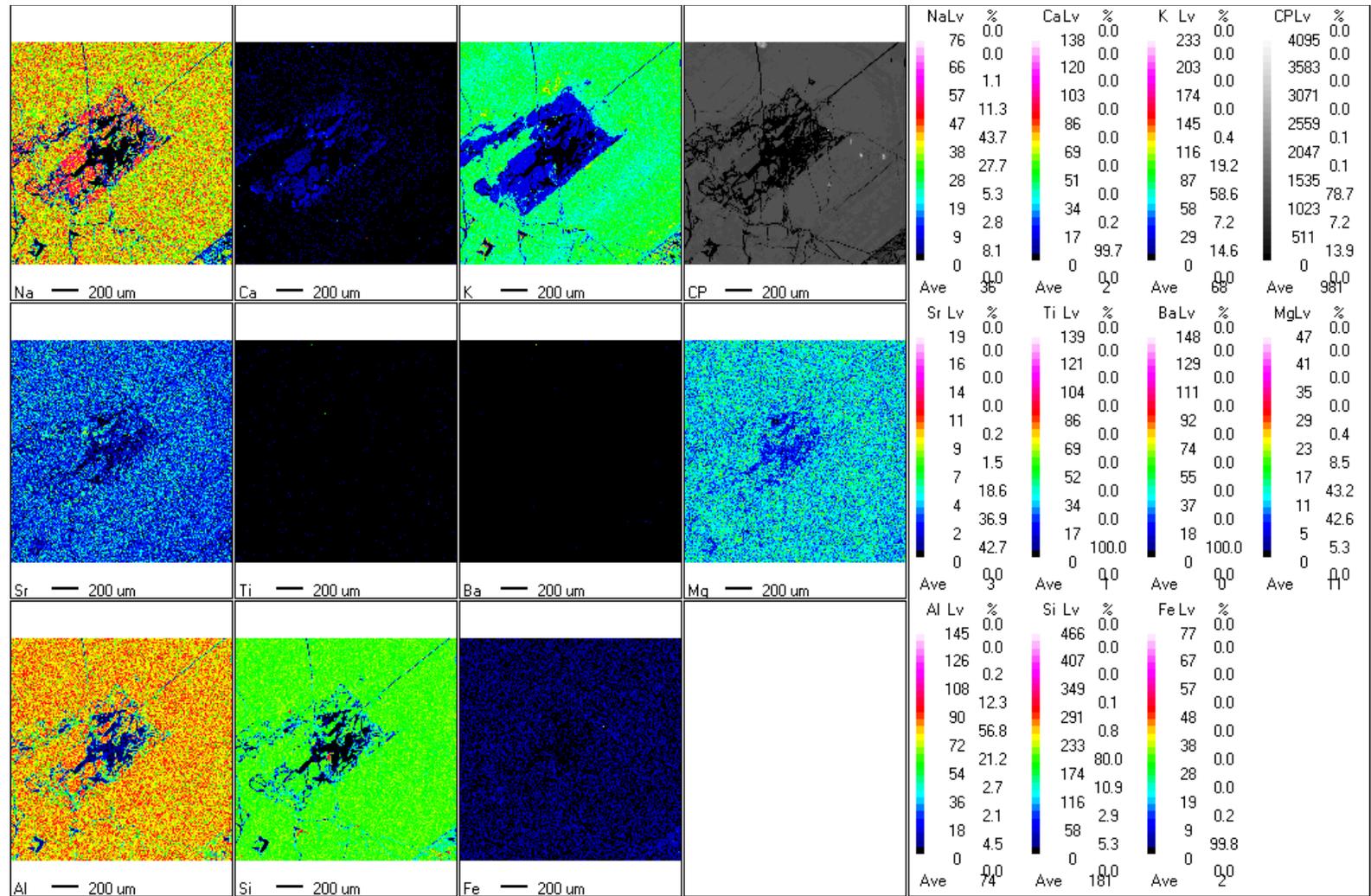


Figura 6-29: Imagen composicional cristal de feldspato de la muestra VGP-06 domo NW - Alto de los Godos. Elementos registrados: Na, Ca, K, Sr, Ti, Ba, Mg, Al, Si y Fe

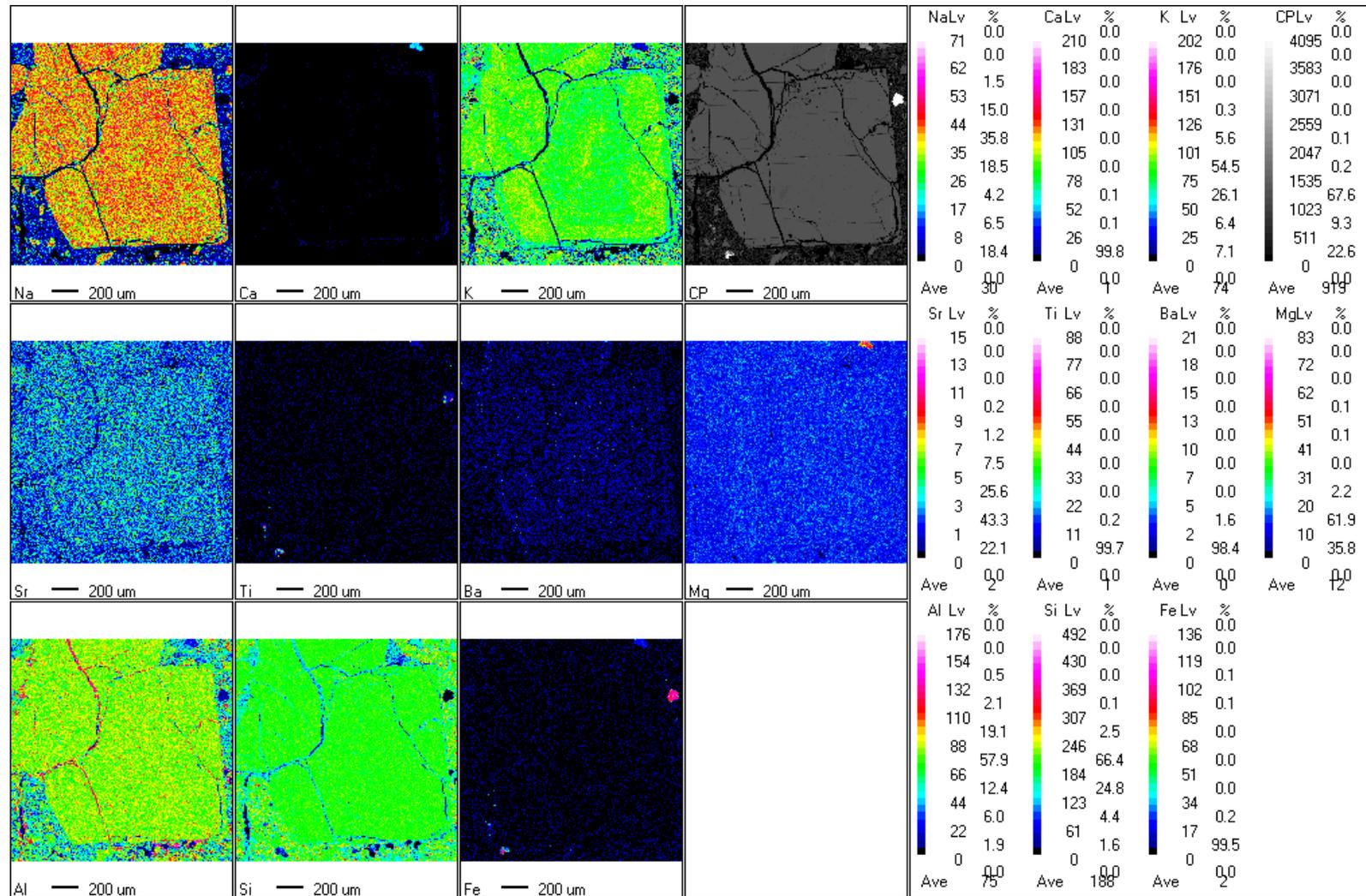


Figura 6-30: Imagen composicional cristal de feldspato de la muestra VGP-07 domo Centro - Alto de los Godos. Elementos registrados: Na, Ca, K, Sr, Ti, Ba, Mg, Al, Si y Fe.

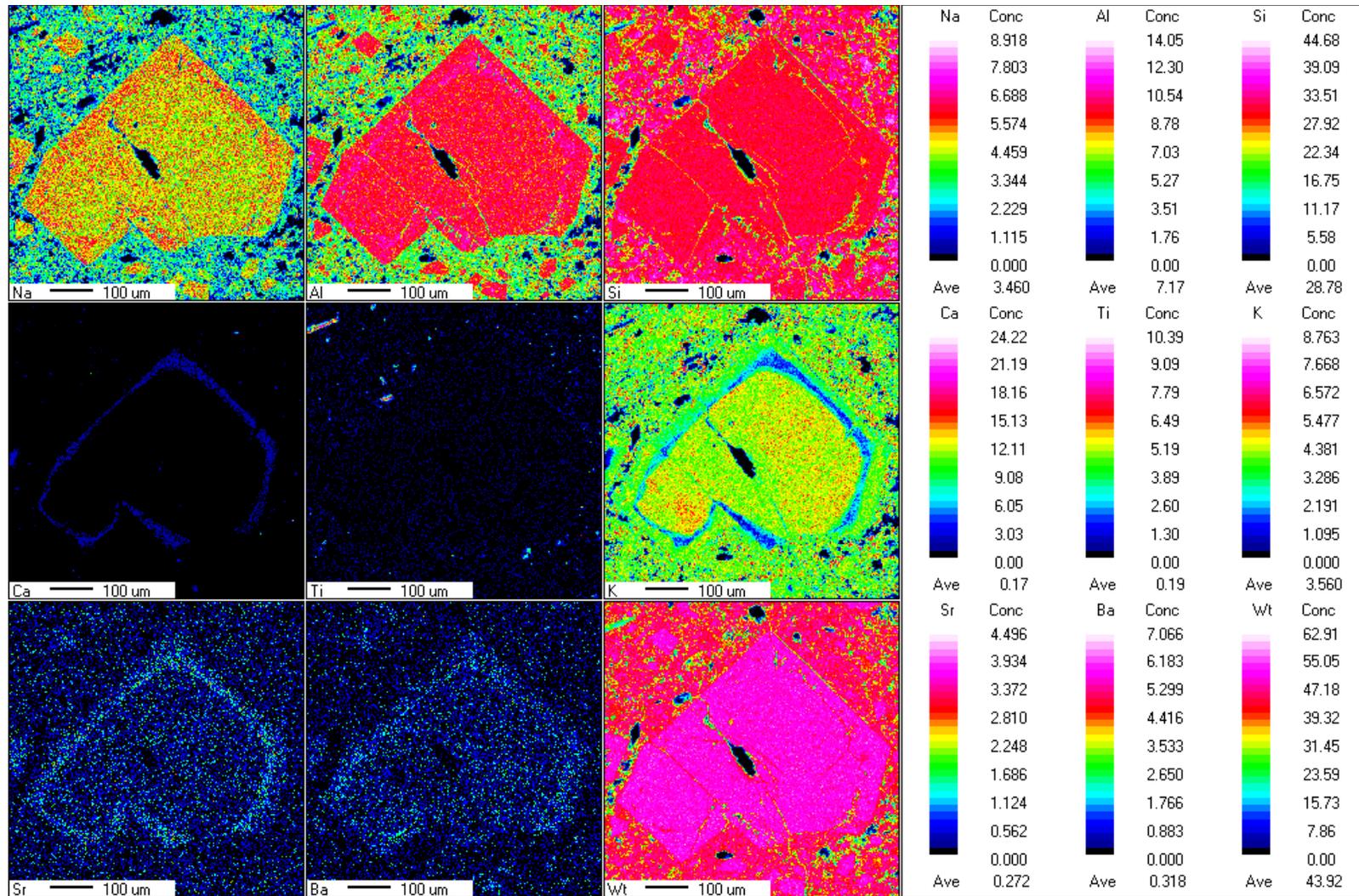


Figura 6-31: Imagen composicional cristal de feldspato de la muestra VGP-01 ALFAGRES. Elementos registrados: Na, Ca, K, Sr, Ti, Ba, Mg, Al, Si y Fe.

6.4 Geotermometría

Los datos de las concentraciones elementales de anfíboles y plagioclasas se utilizaron para estimar la temperatura de cristalización con los geotermómetros establecidos por Otten (1984) y Holland y Blundy (1990). En la

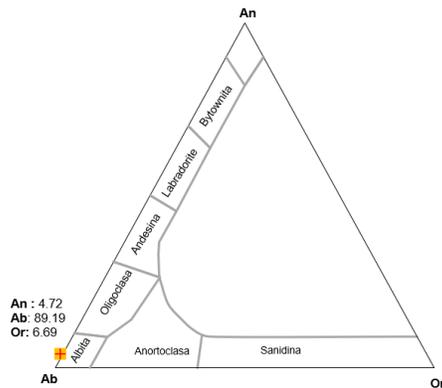
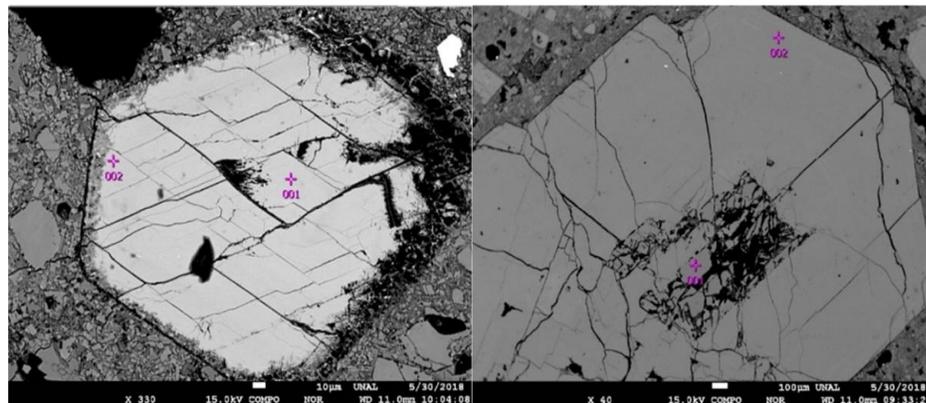


Figura 6-32 se presentan las microfotografías del conjunto de anfíbol-plagioclasa de la muestra VGP-06 y la clasificación composicional del punto 001 registrado en el núcleo de cada cristal. Para estimar la temperatura inicial de formación del cristal se usaron los resultados de química mineral en los núcleos de los anfíboles y plagioclasas (Tabla 6-6).



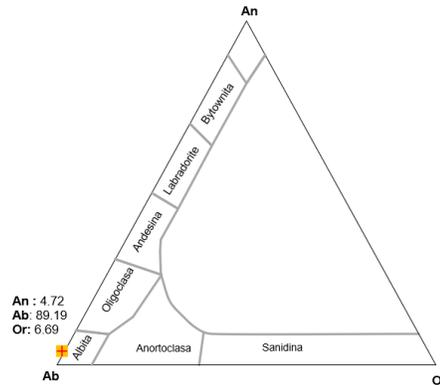


Figura 6-32: Microfotografías de plagioclasa y anfíbol muestra VGP-06 domo NW – Alto de los Godos. Plagioclasa (izquierda) y anfíbol (derecha), imágenes en BSE. Las cruces marcan los puntos analizados con química mineral en núcleos y bordes de los cristales. Clasificación de feldspatos según Marshall (1996) (parte inferior).

Tabla 6-6: Resultados geotermométricos muestra VGP-06 domo NW - Altos de los Godos

Anfíbol 2-1 (punto 001-núcleo)										
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total
4.836	14.42	3.716	47.805	8.967	0.626	0.935	16.599	0.997	0.000	98.88
Plagioclasa Pl2-1 (punto 001-núcleo)										
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SrO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	BaO	Total
11.499	0.013	20.522	64.72	0.000	0.957	0.003	1.305	0.1560	0.096	98.118
Temperatura °C (Holland y Blundy, 1990)			773.2			Temperatura °C (Otten, 1984)			630	

6.5 Difracción de rayos X

Para identificar los minerales arcillosos se llevaron a cabo análisis de difracción de rayos X (DRX) a 54 muestras distribuidas en diferentes sectores del AGP (Figura 6-33), con las técnicas de polvo y lámina orientada (natural, etilenglicol y calcinado a 500 °C) (Tabla 6-7).

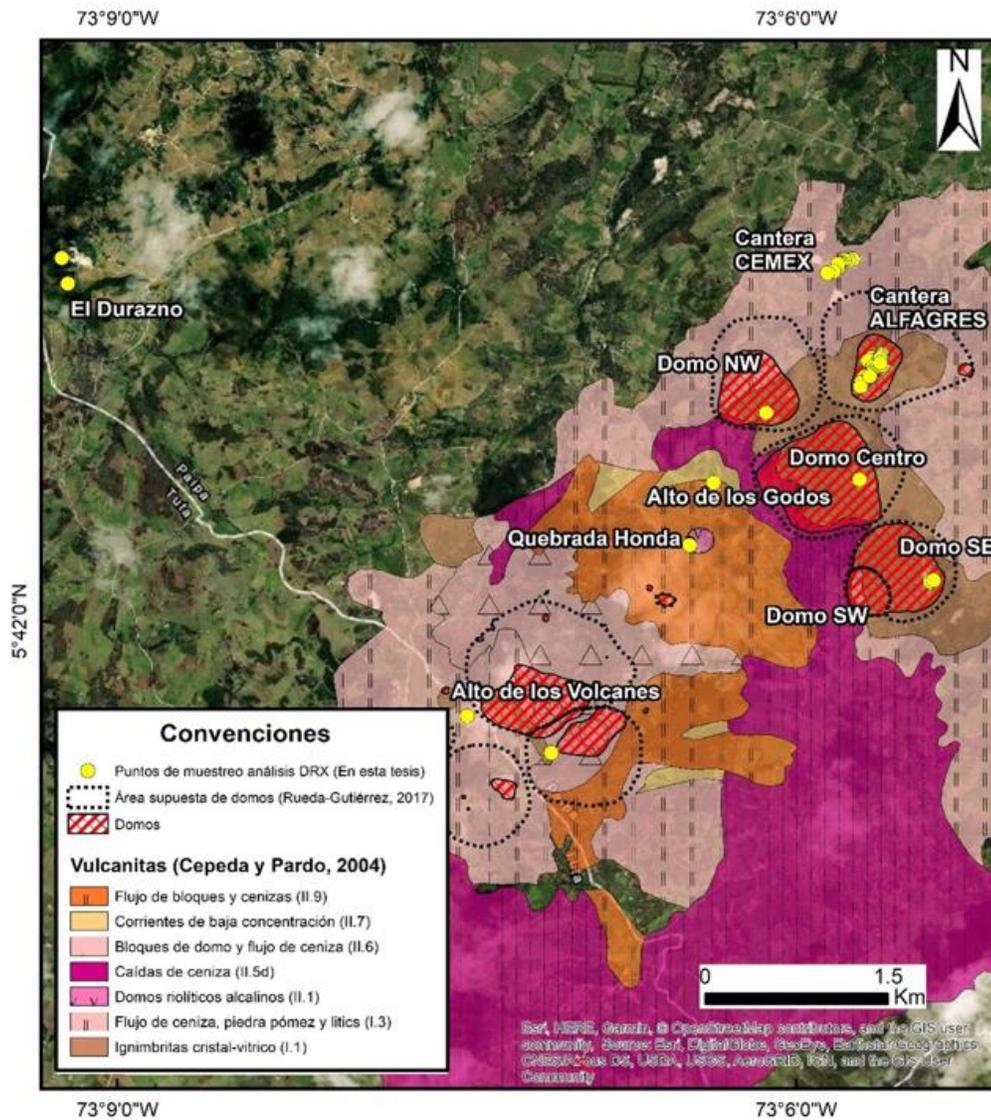


Figura 6-33: Localización de las muestras de DRX.

Tabla 6-7: Muestras analizadas mediante DRX

Lugar	Litología	Número de análisis por DRX (polvo desorientado y lamina orientada)
Cantera CEMEX	Depósitos piroclásticos	18
Cantera ALFAGRES	Depósitos piroclásticos y domos (zonas de alteración)	26
Domo Central del Alto de los Godos	Domo	1
Domo NW del Alto de los Godos	Domo	1
Domo SE del Alto de los Godos	Depósitos piroclásticos y domos (zonas de alteración)	5
El Durazno	Depósitos piroclásticos	3

En el sector de la cantera ALFAGRES se tomaron muestras de depósitos piroclásticos y domos (Figura 6-34). Los primeros presentaban superficies rojizas de alteración /meteorización y zonas de brecha y fracturas. Debido a que en este lugar se encontraron unas de las mejores condiciones de exposición de afloramientos y accesibilidad, fue allí donde se recolectaron el mayor número de muestras por área. Suárez (2016) indica que en esta cantera se reconocen por lo menos tres cuerpos dómicos caracterizados por ser macizos, densos, no vesiculados y coherentes; con textura porfirítica de una matriz vítreo-cristalina, en la Figura 6-35 se señalan algunos con estas características.

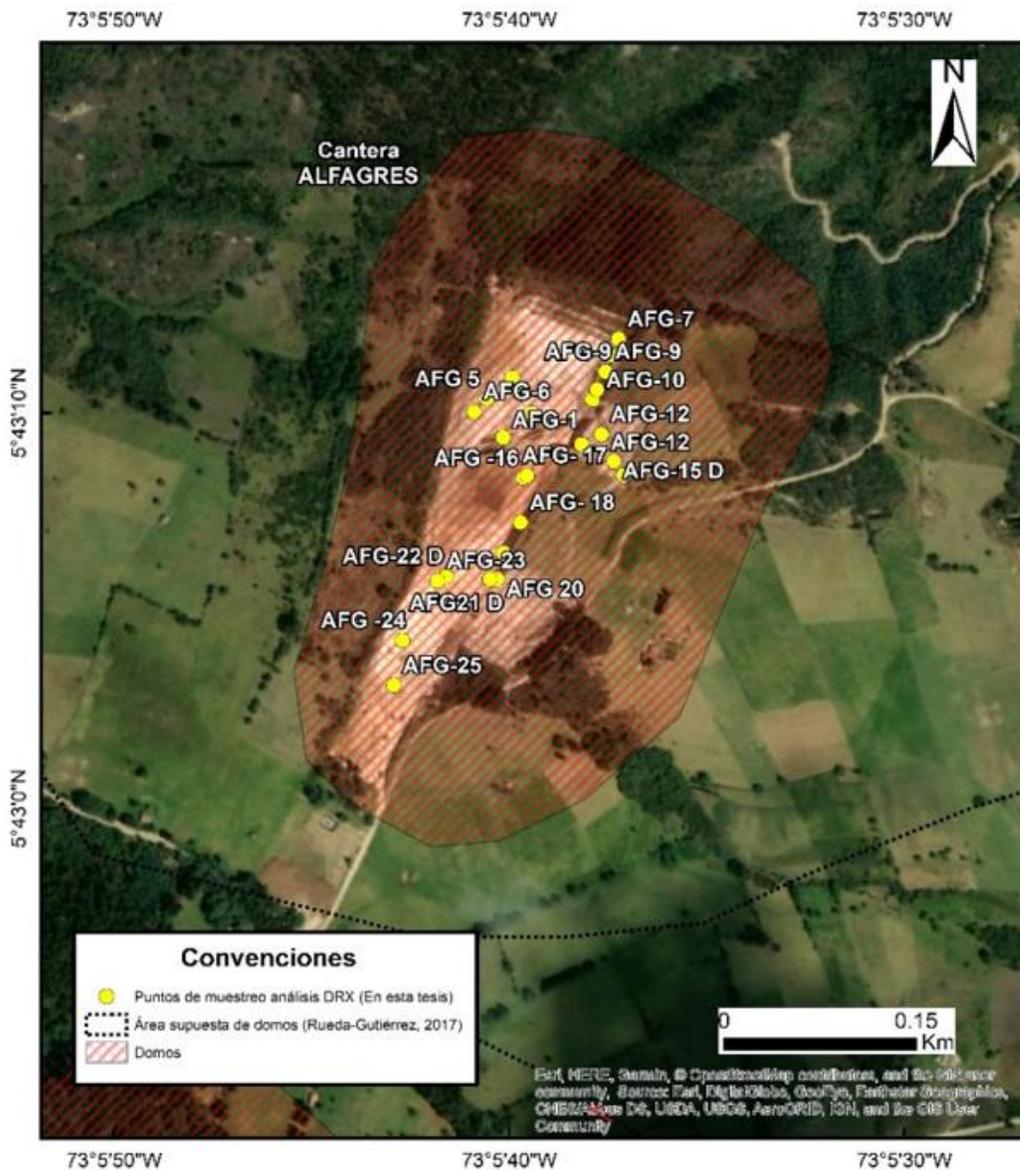


Figura 6-34: Localización de las muestras de DRX sector ALFAGRES.



Figura 6-35: Fotografía de la cantera en explotación ALFAGRES. En esta cantera hay depósitos volcánicos poco consolidados y algunos sectores afloran rocas con texturas porfíricas. En el sector norte de la cantera se encuentra un canal relleno de material fino alterado con coloraciones rojizas. Los polígonos de los domos son tomados del trabajo de Suárez (2016).

Las principales fases cristalinas que fueron identificadas en los depósitos del sector Matarredonda cantera ALFAGRES incluyen feldspatos (albita, anortoclasa) cuarzo, esmectita (montmorillonita 14A), halloisita 10A, halloisita 7A y zeolitas (mordenita). Las Figura 6-36, Figura 6-37, Figura 6-38 y Figura 6-39 muestran los difractogramas con la identificación de las fases cristalinas mencionadas.

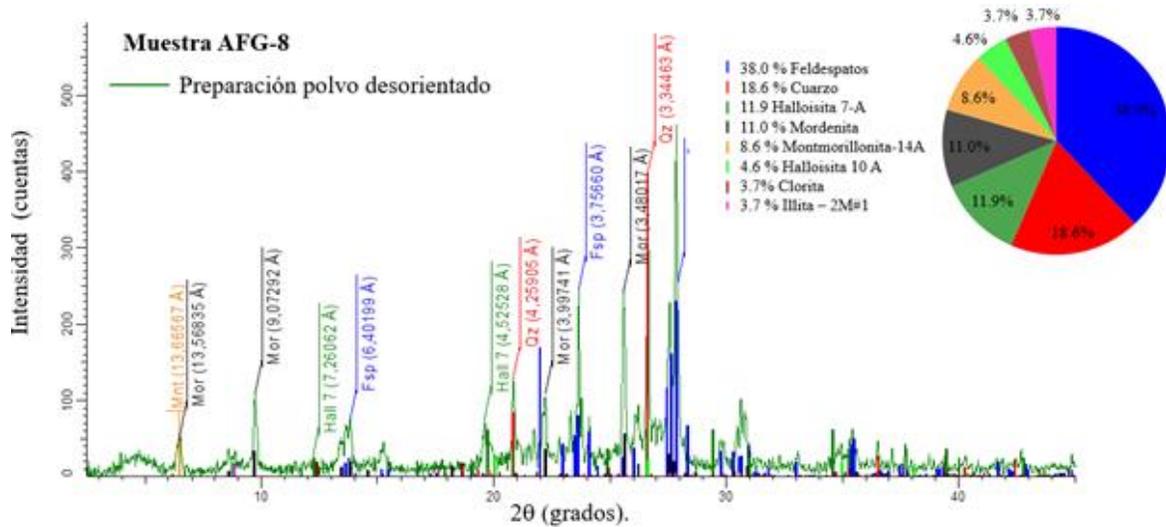


Figura 6-36: Difractograma de análisis en polvo desorientado de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES.

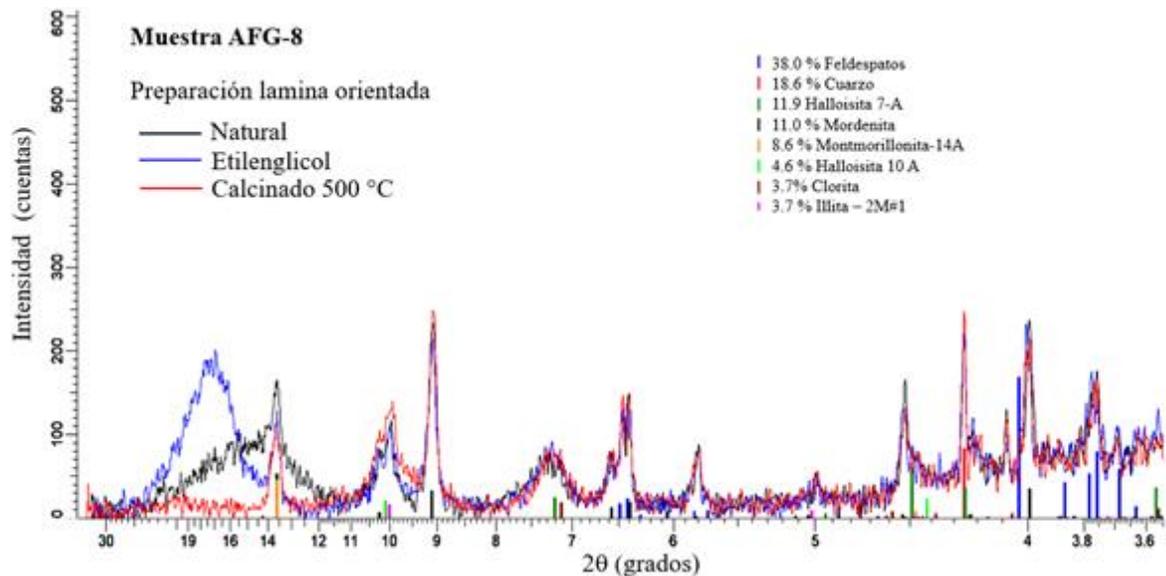


Figura 6-37: Difractograma de análisis en lamina orientada de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES

En cuanto al difractograma típico de muestras de rocas con textura porfírica, las fases principales encontradas fueron: feldespatos (anortoclasa, albita,) y cuarzo, sin presencia de minerales de acilla (Figura 6-38). Mientras que en el difractograma resultado de la preparación de lámina orientada de DRX (Figura 6-39) se identificaron minerales arcillosos como hallosita 7A y 10A además del cuarzo y feldespatos.

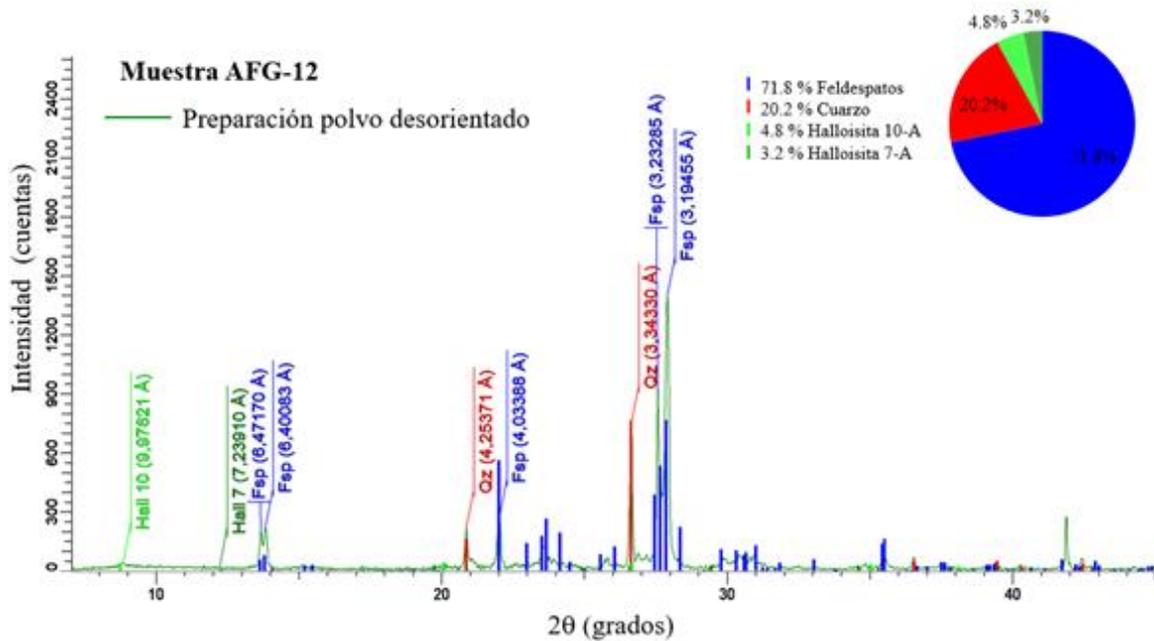


Figura 6-38: Diffractograma de análisis en polvo desorientado de la muestra AFG-12 cantera ALFAGRES

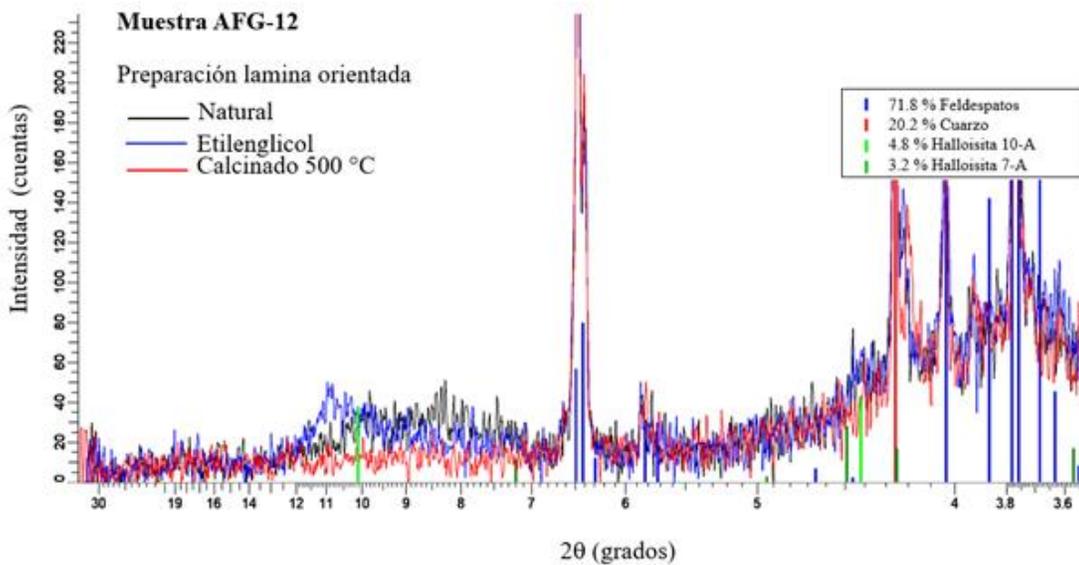


Figura 6-39: Diffractograma de análisis en lámina orientada de la muestra AFG-12 cantera ALFAGRES

La cuantificación de minerales por DRX del sector cantera ALFAGRES se puede observar en la Tabla 6-8: Cuantificación de minerales por DRX de las muestras del sector cantera ALFAGRES, y la del sector CEMEX en la Tabla 6-9. En las Figura 6-40 y

Figura 6-41: Porcentajes de minerales y minerales arcillosos obtenidos en el sector ALFAGRES se presentan diagramas con los porcentajes de los minerales encontrados, en la segunda se incluyen los minerales arcillosos.

Tabla 6-8: Cuantificación de minerales por DRX de las muestras del sector cantera ALFAGRES

Muestra/ minerales	AFG-02	AFG-03	AFG-05	AFG-08	AFG-09	AFG-10	AFG-11	AFG-12	AFG-13	AFG-14	AFG-15	AFG-16	AFG-17	AFG-18	AFG-19	AFG-20	AFG-21	AFG-22	AFG-23	AFG-24	AFG-25	AFG-26
Cuarzo	8.3	4.7	13.2	1	3.7	8.9	4.7	6.9	11.3	11.4	2.9	24.5	12.7	11.3	6.2	10.8	2.2	27.1	26.6	16.4	22.2	12.3
Albita	38.9	42.8	22	0.2	26.4	37	41.3	49.1	21	41.4	-	26	48.4	42.8	28.1	25.9	35	25.9	40.2	35.9	18	-
Sanidina	6.9	10.5	14.1	-	-	-	21.1	-	19.9	-	-	-	-	-	-	14.3	7.7	-	-	-	20.9	-
Anortoclasa	39.8	36.8	39.7	63.5	63.5	29.8	26.8	44	40.2	37.3	-	24.1	35.7	43.9	32.3	37.7	51	35.7	-	33.3	38.9	47.6
Halloisita	6.1	10.9	10.9	7.8	-	8.1	-	-	7.6	-	-	14.3	3.1	1.9	5.7	-	4	11.3	18.2	14.4	-	7
Microlina	-	-	-	22.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.7	-	-	-	-	-	-	33.1
Mordenita	-	-	-	-	-	-	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Illita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64.4	11	-	-	-	11.2	-	-	-	-	-	-
Caolinita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biotita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6-9: Cuantificación de minerales por DRX del sector CEMEX

Muestra/ minerales	CMX-01	CMX-03	CMX-04	CMX-05	CMX-09	CMX-14	CMX-14	CMX-15	CMX-18
Cuarzo	16.1	12	22.3	4.9	11.1	21.1	13.5	20.6	32.1
Albita	-	35.8	16.7	45.4	27	18	27.5	27.7	18.9
Sanidina	-	41.9	9.1	-	-	-	-	-	-
Anortoclasa	82.5	-	35.3	42.7	38.5	31.8	38.8	33.38	27.1
Halloisita	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-
Illita	-	5	6.1	4.6	10	8	8.4	8.1	-
Caolinita	-	5.3	6.1	-	8.2	13.5	7.7	6.1	13.5
Biotita	-	-	4	2.4	5.2	7.6	4.1	3.7	8.4

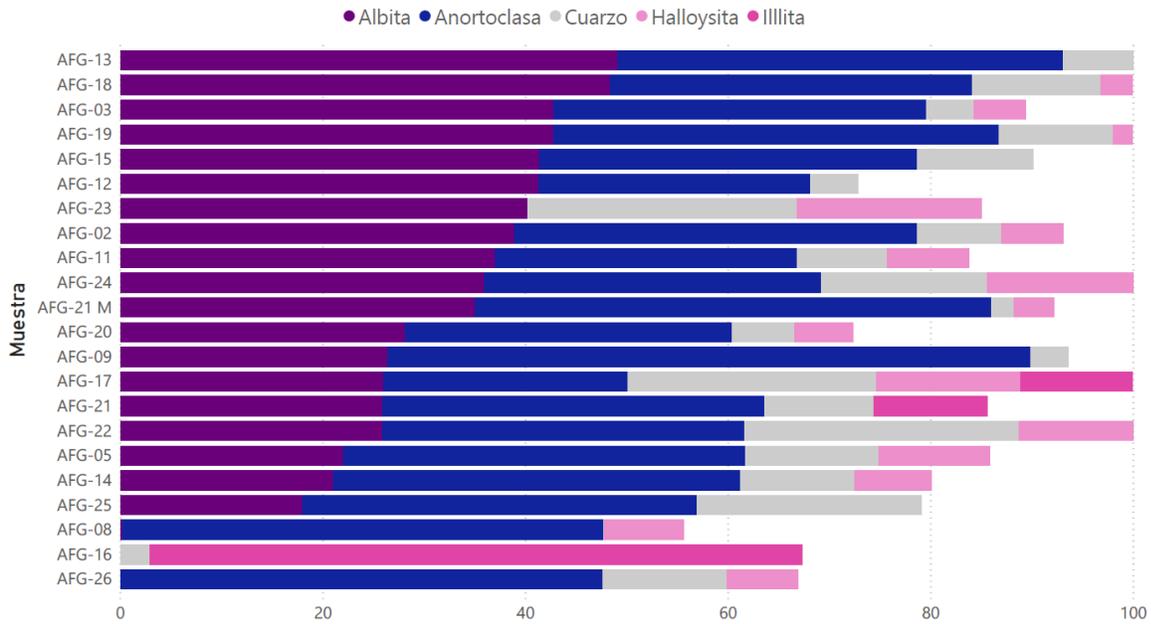


Figura 6-40: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector ALFAGRES.

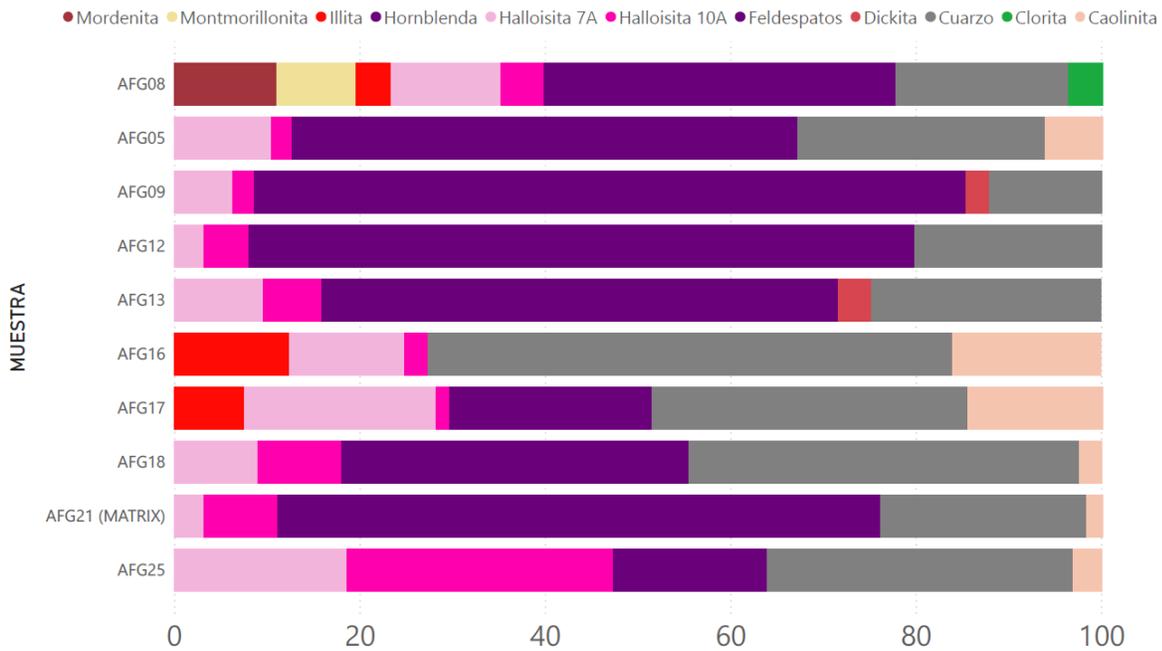


Figura 6-41: Porcentajes de minerales y minerales arcillosos obtenidos en el sector ALFAGRES.

En el sector de la cantera CEMEX se encontraron depósitos volcanoclásticos, macizos, matriz soportados y mal seleccionados (Figura 6-42). La cuantificación de las principales

fases cristalinas de las 18 muestras en polvo de este lugar dio como resultado un predominio de anortoclasa, albita, cuarzo, illita, montmorillonita y halloisita (Figura 6-43).

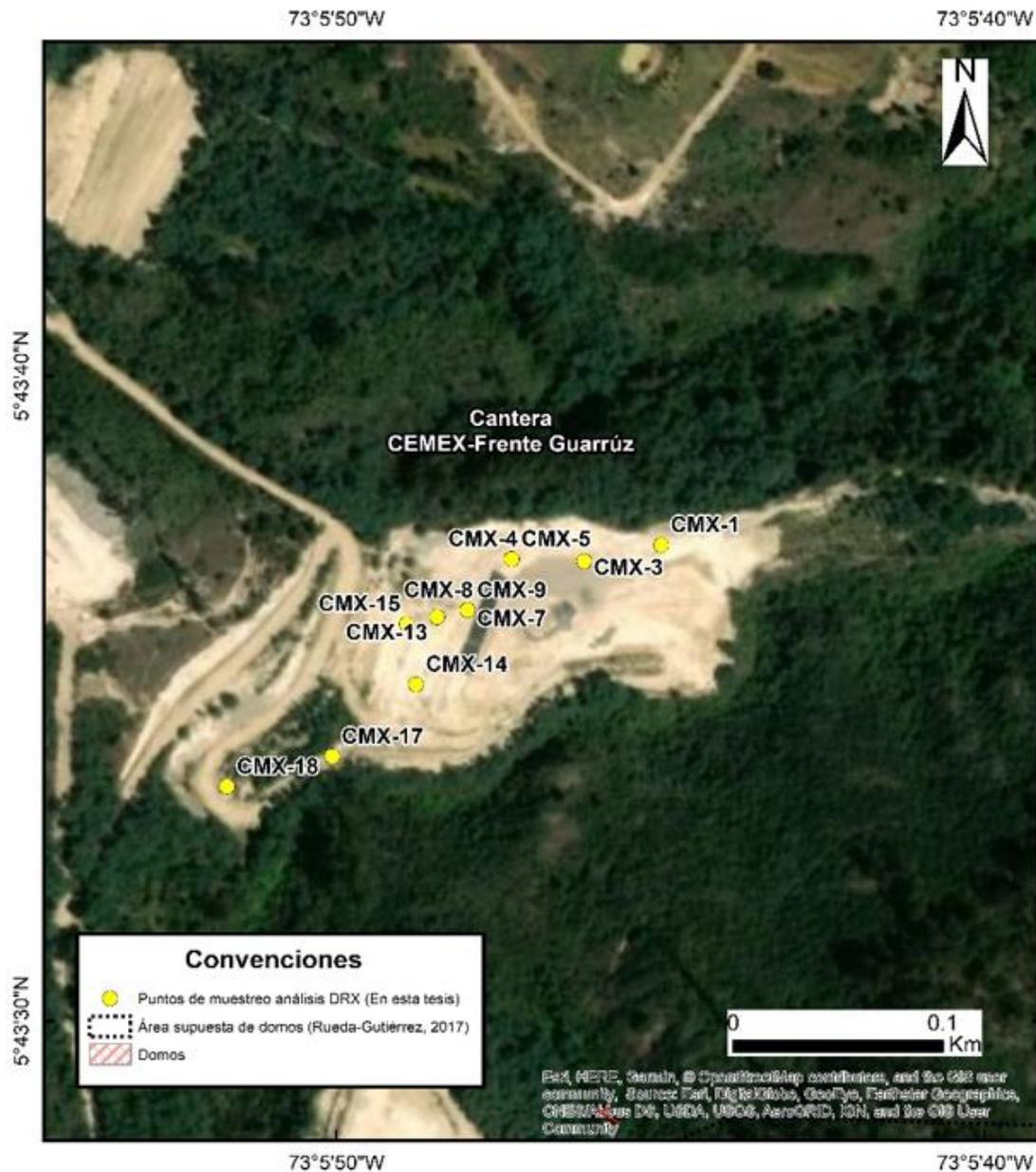


Figura 6-42: Localización de las muestras de DRX sector CEMEX.

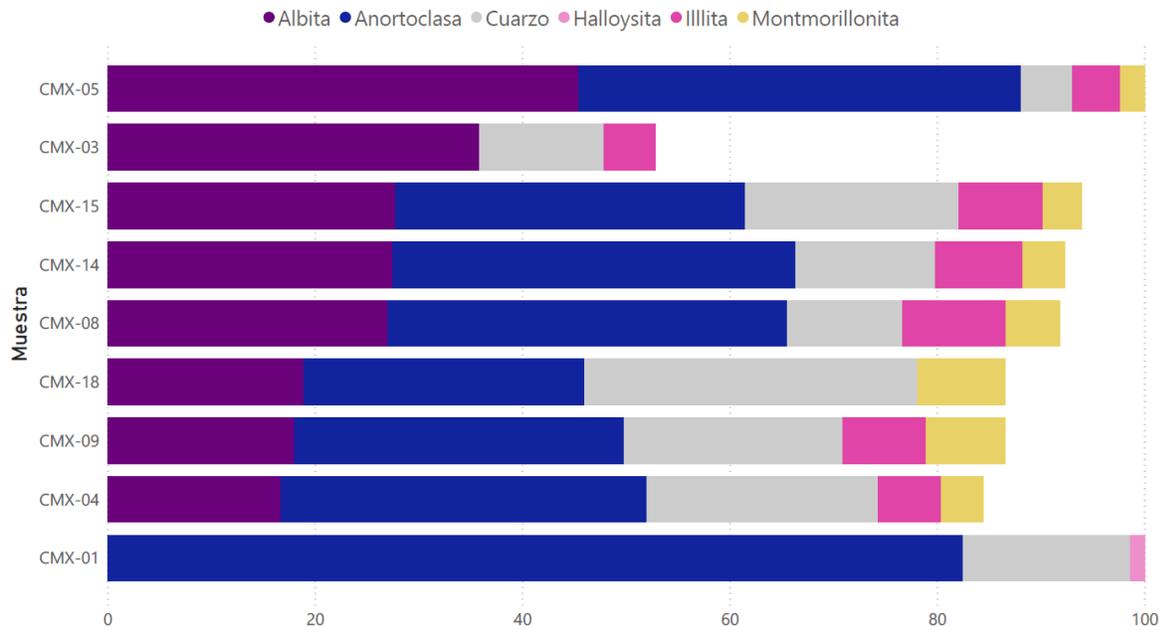


Figura 6-43: Porcentajes de las principales fases cristalinas obtenidas en el sector CEMEX.

Después de analizar el material arcilloso que rellena las fracturas del domo SE del Alto de los Godos (Figura 6-44), se encontró que está compuesto principalmente de albita, sanidina, y cuarzo, con un alto porcentaje caolinita e illita como se muestra en la Figura 6-45 y la tabla 6-10.



Figura 6-44: Detalle del material arcilloso relleno de fracturas en el domo SE - Alto de los Godos. El punto azul marca el sitio de muestreo.

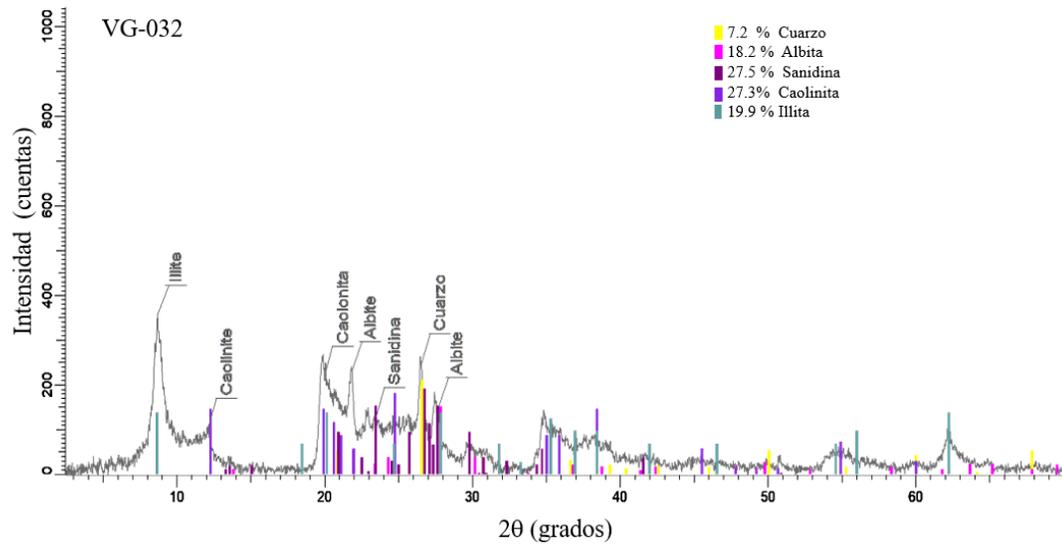


Figura 6-45: Diffractograma en agregado desorientado y porcentajes de los minerales obtenidos en la muestra VGP-032 domo SE - Alto de los Godos.

Tabla 6-10: Cuantificación de minerales por DRX, sector Alto de los Godos.

Muestra/ minerales	VG030	VG-032-2	VG-033-1	VG033-3	VG033-4
Feldespatos	82.9	78.8	59.8	70.9	73.9
Cuarzo	12.1	13.5	15.2	21.5	16.5
Halloysita 7A	-	2.2	11.5	3.8	5.2
Halloysita 10 A	-	2.2	6.9	3.8	5.2
Caolinita		2.4	5.8		
Montmorillonita		1			
Illita			0.8		
Hornblenda	5				

En los lugares donde se tomaron las muestras del sector Alto de los Godos (Figura 6-46) se identificaron las fases minerales principales de feldespato tipo anortoclasa, albita y cuarzo como se puede observar en la figura (6-47).

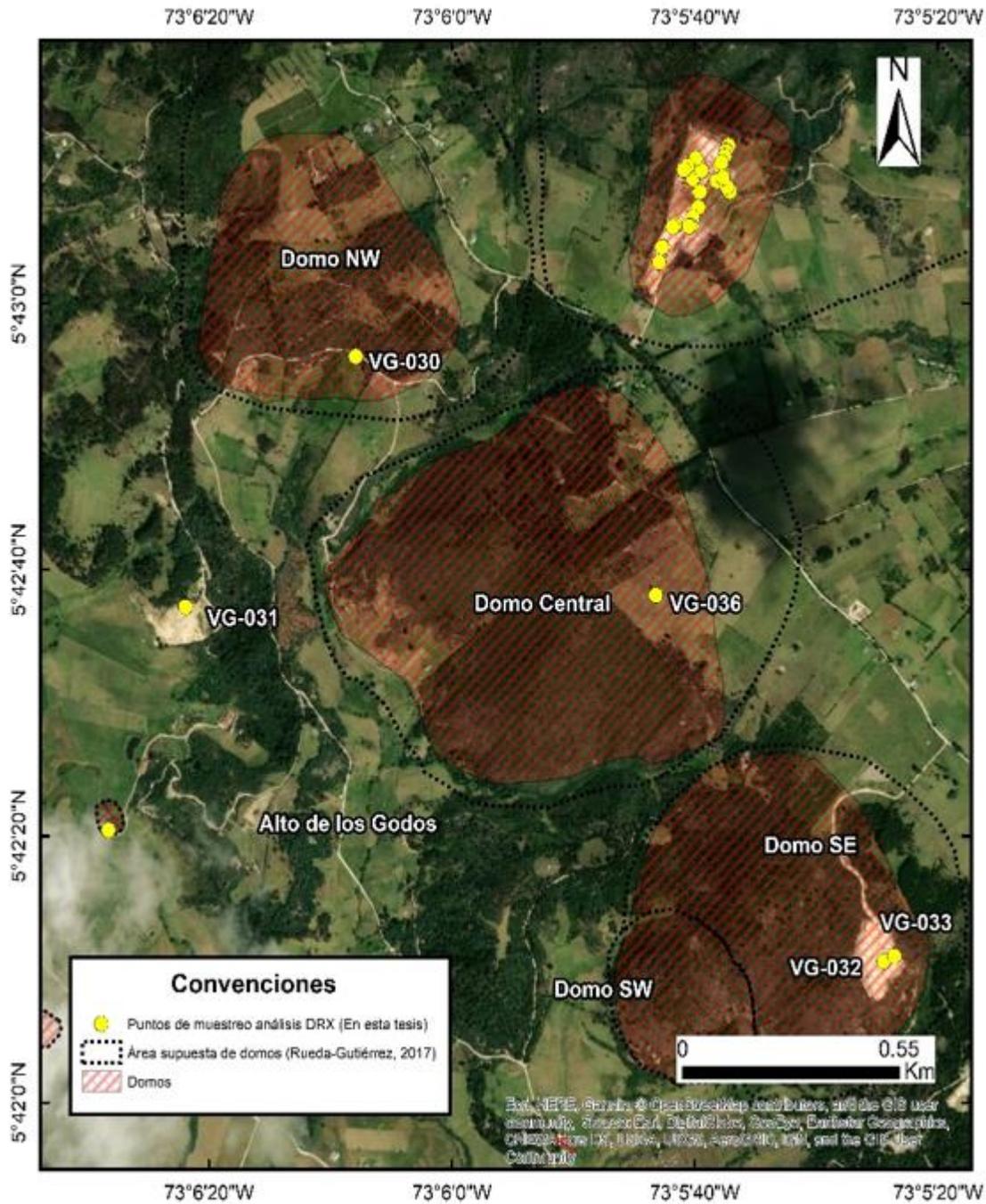


Figura 6-46: Localización de las muestras de DRX sector Alto de los Godos.

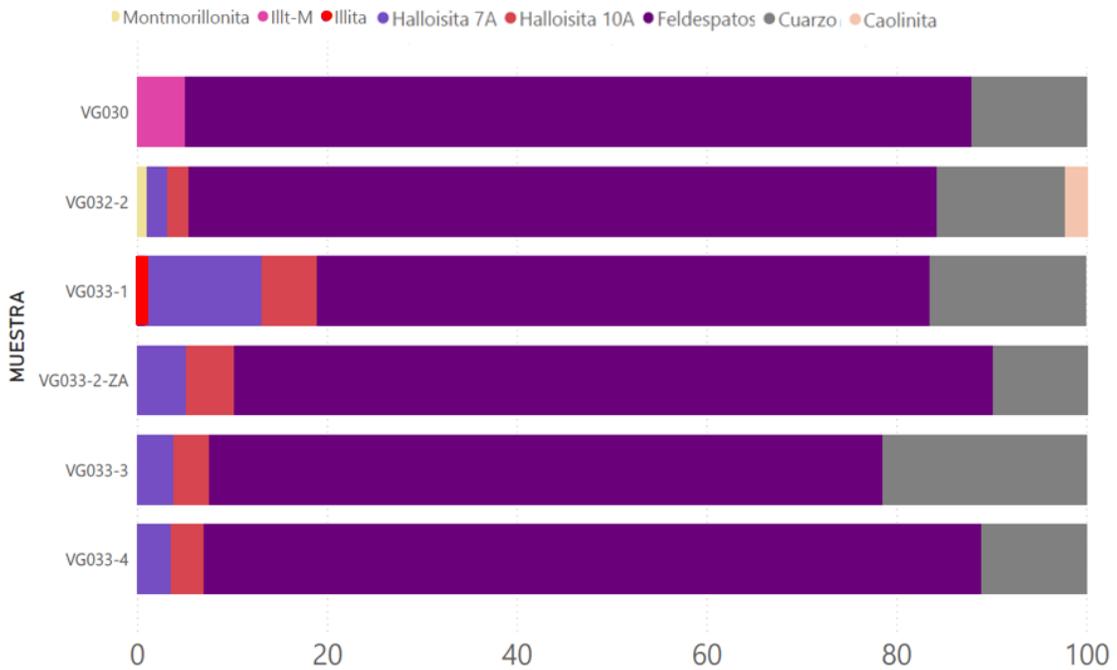


Figura 6-47: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector Alto de los Godos.

En el sector El Durazno, como en los sectores anteriores, también se identificó alunita, montmorillonita y talco, según los análisis de DRX realizados a las muestras DRZ-1, DRZ-2 y DRZ-3 (figura 6-48). Cabe resaltar que en este sector las muestras fueron tomadas en superficie un control estratigráfico y la mineralogía principal que se identificó fue: sanidina, cuarzo, moscovita, illita y alunita (Figura 6-48).

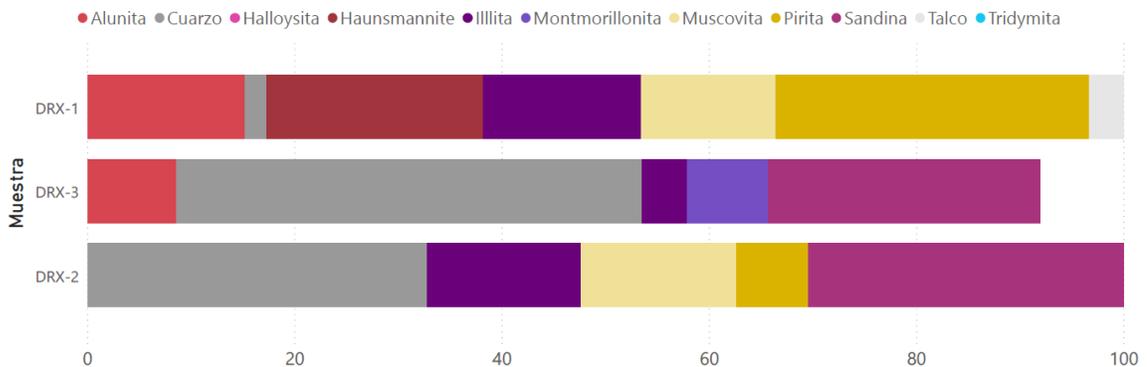


Figura 6-48: Porcentajes de minerales obtenidos en el sector El Durazno.

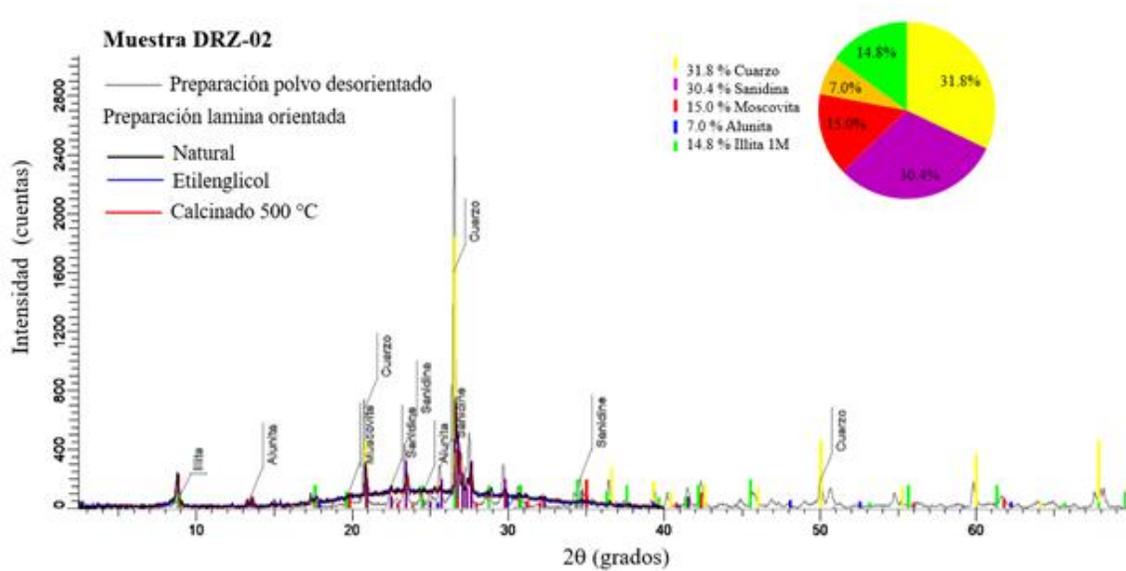


Figura 6-49: Difractograma de análisis en polvo desorientado y lámina orientada de la muestra DRZ-02 sector El Durazno

6.5.1 Identificación de minerales arcillosos en lámina orientada (N, EG y C-500 °C)

Además de los análisis de los difractogramas en polvo desorientado y la identificación de las fases cristalinas principales, se realizaron los análisis de los difractogramas con la técnica de lámina orientada para la identificación de minerales de arcilla que pueden ser producto de procesos de alteración. Para cada muestra se obtienen tres difractogramas de los tratamientos de la muestra Natural (N), saturación con etilen-glicol (EG) y calcinado 500° C). En la Figura 6-50) se presenta un ejemplo de la integración de los difractogramas (N, EG y C); en el eje horizontal se indica el valor en 2θ y en el vertical las intensidades respectivas.

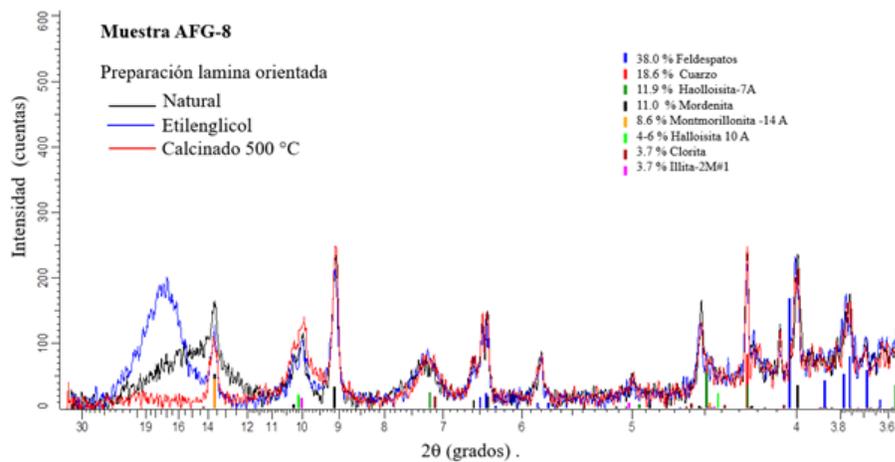


Figura 6-50: Difractograma en lámina orientada de la muestra AFG-08 cantera ALFAGRES. La línea negra corresponde a la muestra natural (N), línea azul a etilenglicol (EG) y línea roja a calcinado (C-500°C).

Una vez identificadas las especies minerales se realiza la deconvolución matemática de la señal del difractograma, que consiste en la identificación de picos principales y secundarios en la zona donde 2θ está en el rango 0-20 grados. Una vez identificados los picos, se procede a calcular los parámetros de área, altura y anchura del pico, esta última medida a la mitad de la altura (*full width at half maximum*, FWHM) expresada en $2\theta^\circ$ (medida angular). Los valores de FWHM fueron necesarios para conocer el índice de cristalinidad, ya que mientras más estrecho el pico, menor el valor de FWHM; lo que indica mayor cristalinidad. En las figuras 6-51 y 6-52 se muestran las secciones del difractograma en preparación natural y etilenglicol, respectivamente.

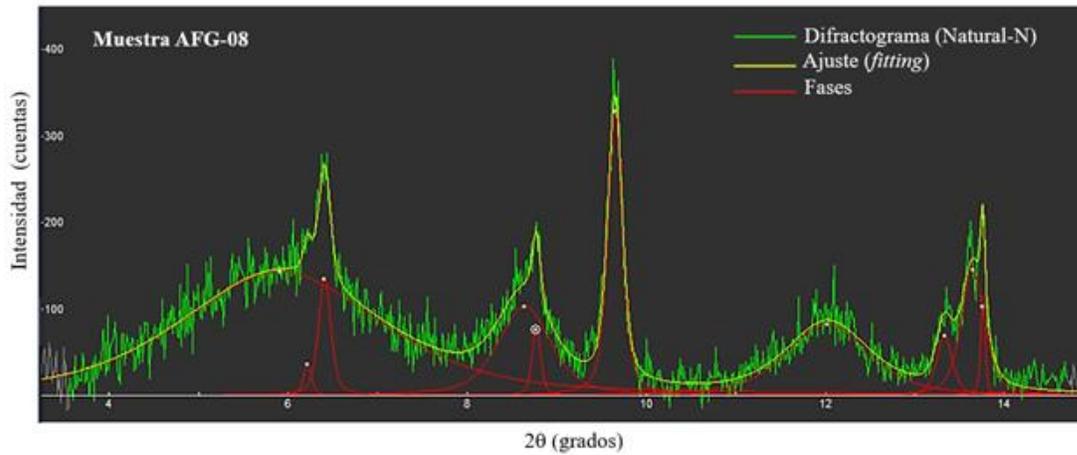


Figura 6-51: Deconvolución matemática de la señal del difractograma AFG-08 cantera ALFAGRES. La señal en verde representa el difractograma en natural (N) y las curvas rojas los picos principales y secundarios identificados en el programa Fictyk 0.9.8.

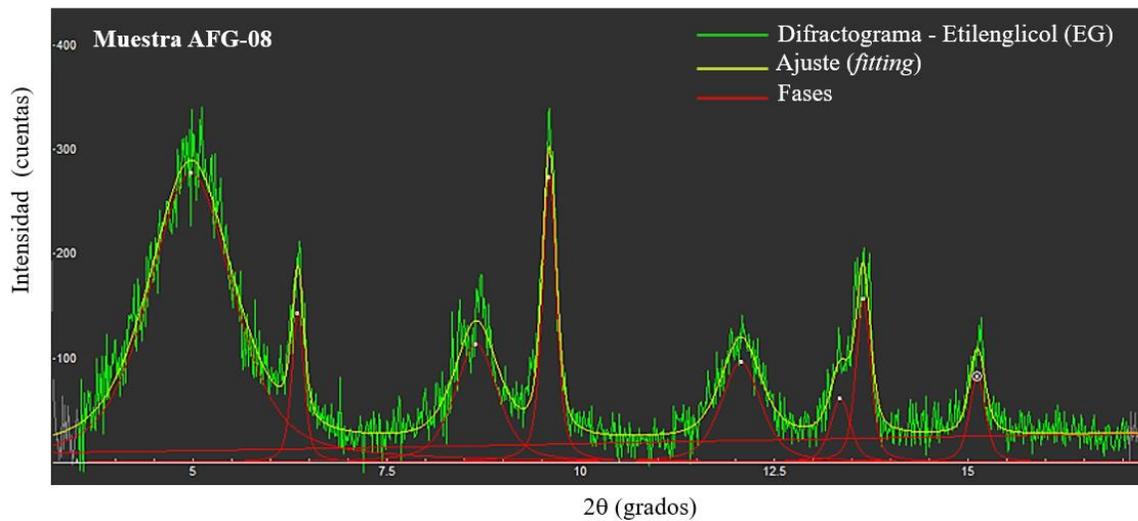


Figura 6-52: Diffractograma con análisis de parámetros de picos muestra AFG-8 cantera ALFAGRES en lamina orientada (etilenglicol). La señal en verde representa el difractograma en natural (N) y las curvas rojas los picos principales y secundarios identificados en el programa Fictyk 0.9.8.

Un total de 23 muestras fueron analizadas mediante el método de deconvolución matemática aplicada a los difractogramas de la muestra natural (N) y con etilenglicol (EG). En la (Tabla 6-11) se presentan los datos obtenidos para la muestra AFG-8 incluyendo los parámetros de área, altura y anchura del pico.

Tabla 6-11: Datos obtenidos a partir del proceso de deconvolución matemática de los difractogramas de la muestra AFG-08 en natural y etilenglicol

Pico	Centro	Área	Altura	FWHM
Muestra natural				
12	9.645	84.190	331.56	0.193
13	5.904	497.428	142.861	2.642
14	13.642	59.0726	145.456	0.308
15	8.636	95.0634	103.203	0.699
16	12.021	118.62	82.1678	1.095
17	13.323	19.1095	68.8129	0.210
18	6.211	5.14439	36.8906	0.106
19	6.402	29.4308	136.527	0.164
20	13.755	8.94429	116.214	0.058
21	8.768	11.578	79.1013	0.111
Preparación con etilenglicol				
1	9.586	79.038	276.671	0.217
2	4.963	468.11	277.848	1.279
3	13.342	24.598	61.2396	0.304
4	8.644	97.805	113.629	0.653
5	20.107	953.137	28.364	25.50
6	6.342	35.416	144.884	0.185
7	12.059	77.263	96.4649	0.608
8	13.636	46.423	157.331	0.224
9	15.109	26.827	82.7512	0.246

6.6 Clasificación geoquímica de las rocas y cálculo de los índices de meteorización química (CWI)

En esta tesis se cuantifico el grado de intemperismo de las rocas utilizando el índice de alteración química (CIA) según Nesbitt y Young, 1982 y el índice de alteración de las plagioclasas (PIA) según Fedo et al., 1995, a partir de los datos de geoquímica de roca total para diecisiete muestras realizados en el trabajo de Rueda-Gutiérrez (2017) para las rocas de domos de los sectores Alto de los Godos, Alto de los Volcanes y Quebrada Honda. Los resultados de la cuantificación de los índices CIA y PIA para los sectores mencionados se muestran en los diagramas ternarios de las figuras (Figura 6-53 y Figura 6-54); los valores de los índices CIA en los tres sectores varían entre 60 y 70%, que indican un grado intermedio de intemperismo, y los valores de PIA varían entre 64 y 74% indicando una moderada alteración química.

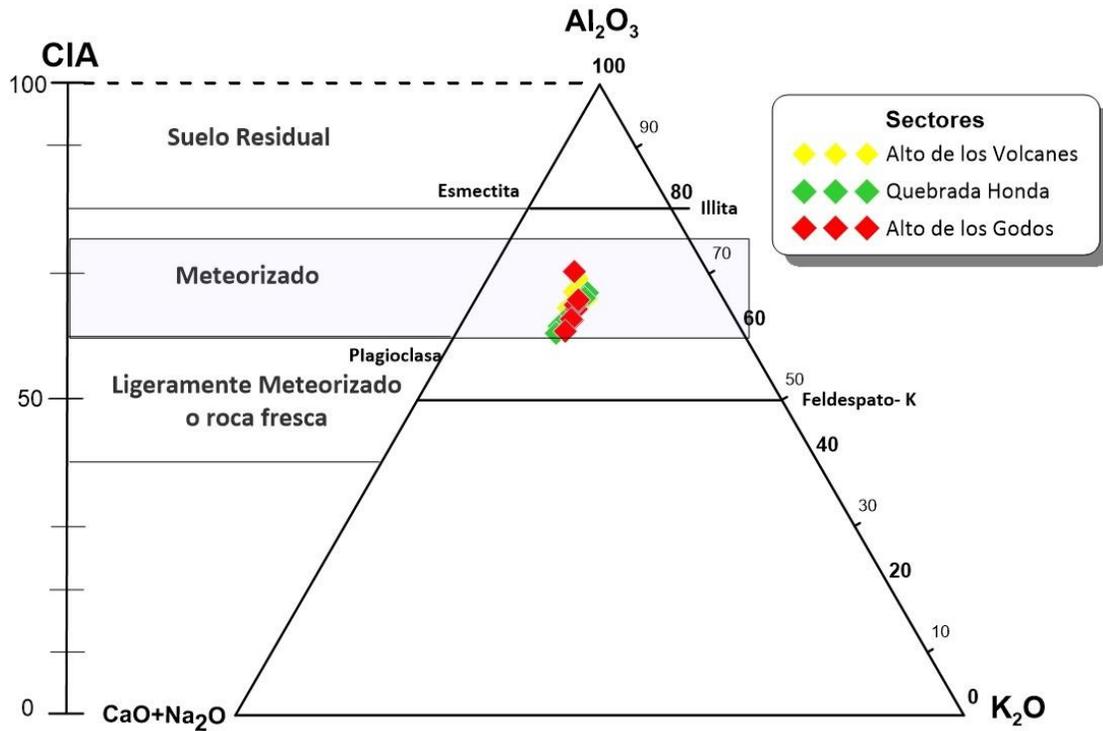


Figura 6-53: Diagrama de clasificación según el Al_2O_3 , K_2O y $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ con cuantificación del índice CIA de los sectores Alto de los Volcanes, Quebrada Honda y Alto de los Godos. Los datos utilizados fueron los de Rueda-Gutiérrez (2017).

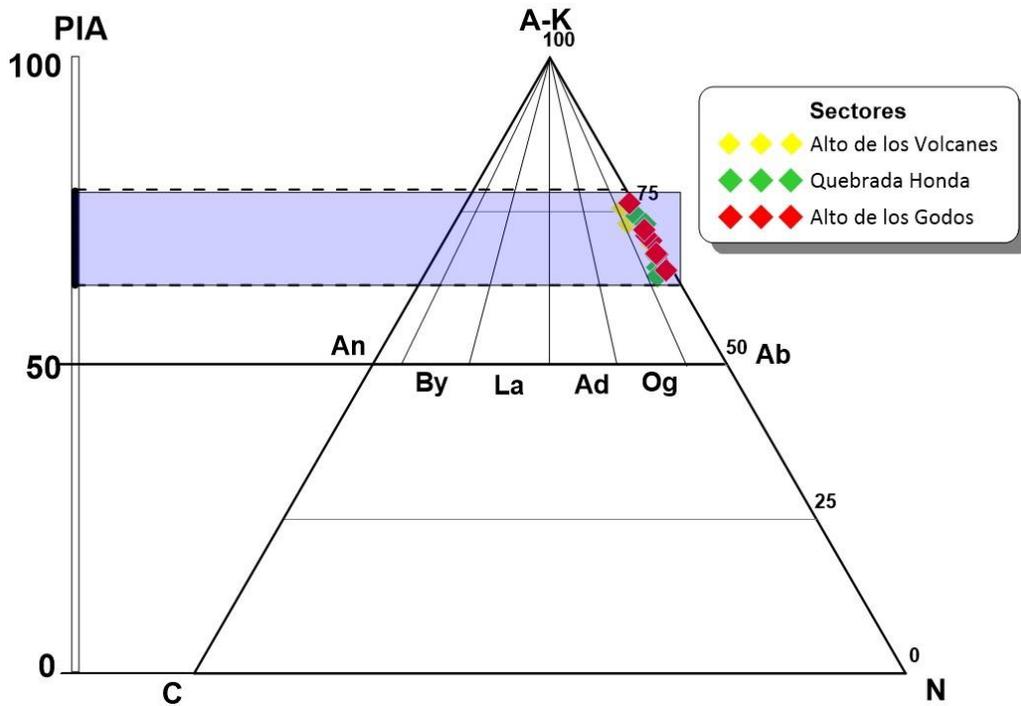


Figura 6-54: Diagrama de clasificación según el A-CN-K y AK-C-N. A: Al_2O_3 , CN: $\text{CaO}^+ + \text{Na}_2\text{O}$; K: K_2O (proporción molar), con cuantificación del índice PIA. Los datos utilizados fueron los de Rueda-Gutiérrez (2017).

6.7 Análisis semicuantitativo de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos

Las ubicaciones y configuraciones de las descripciones geomecánicas realizadas para tres secciones de afloramiento en el domo SE del Alto de los Godos se muestran en la Figura 6-55; estas descripciones se realizaron siguiendo la metodología de Jerram y Petford (2011), basada en los criterios generales para estimar la resistencia del macizo rocoso de Hoek y Brown (Brown, 1981).

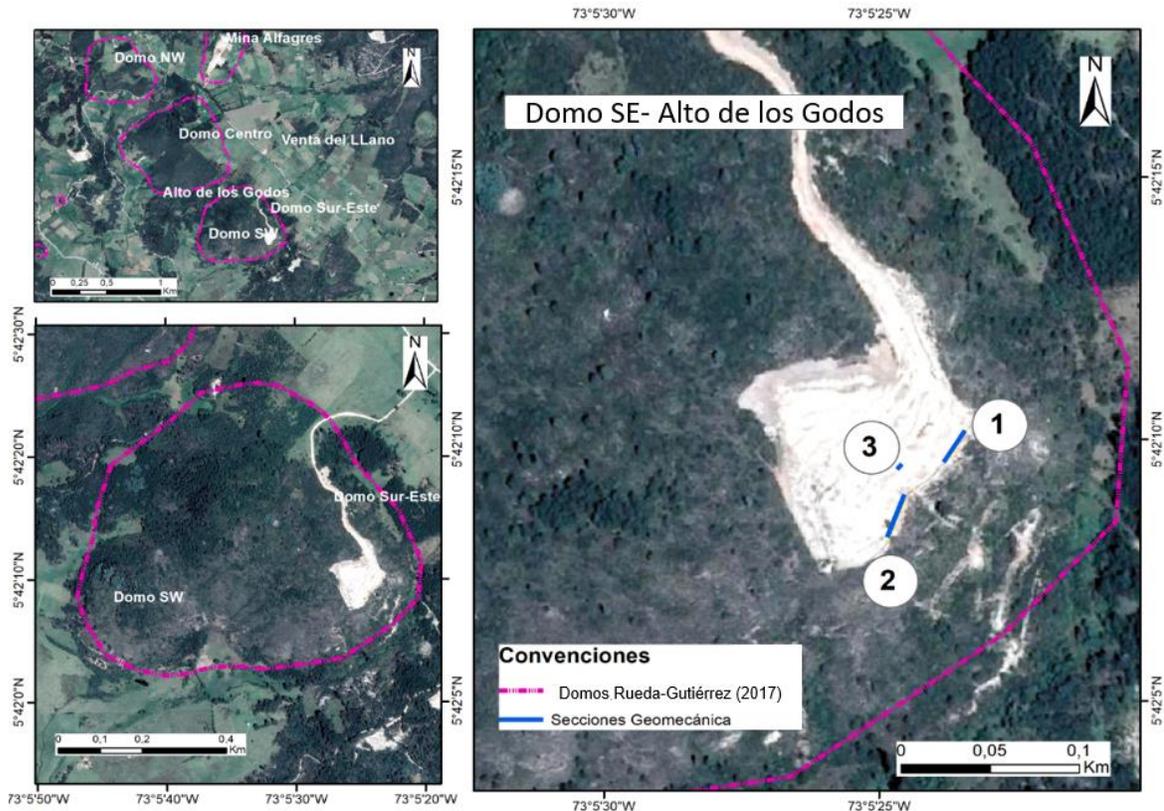


Figura 6-55: Localización de secciones caracterizadas geomecánicamente del domo SE sector Alto de los Godos.

6.7.1 Sección 1

Este afloramiento se describió en una longitud de 20 m en dirección NE-SW en donde se identificaron una serie de discontinuidades (fracturas) con presencia de zonas de alteración

hidrotermal de colores grises oscuros y rojizos a lado y lado de las fracturas; algunas de las discontinuidades se encuentran rellenas de materiales arcillosos. En las Figura 6-56 a, b y c se muestra la sección del afloramiento resaltando la configuración, posición y halos de alteración de las discontinuidades.

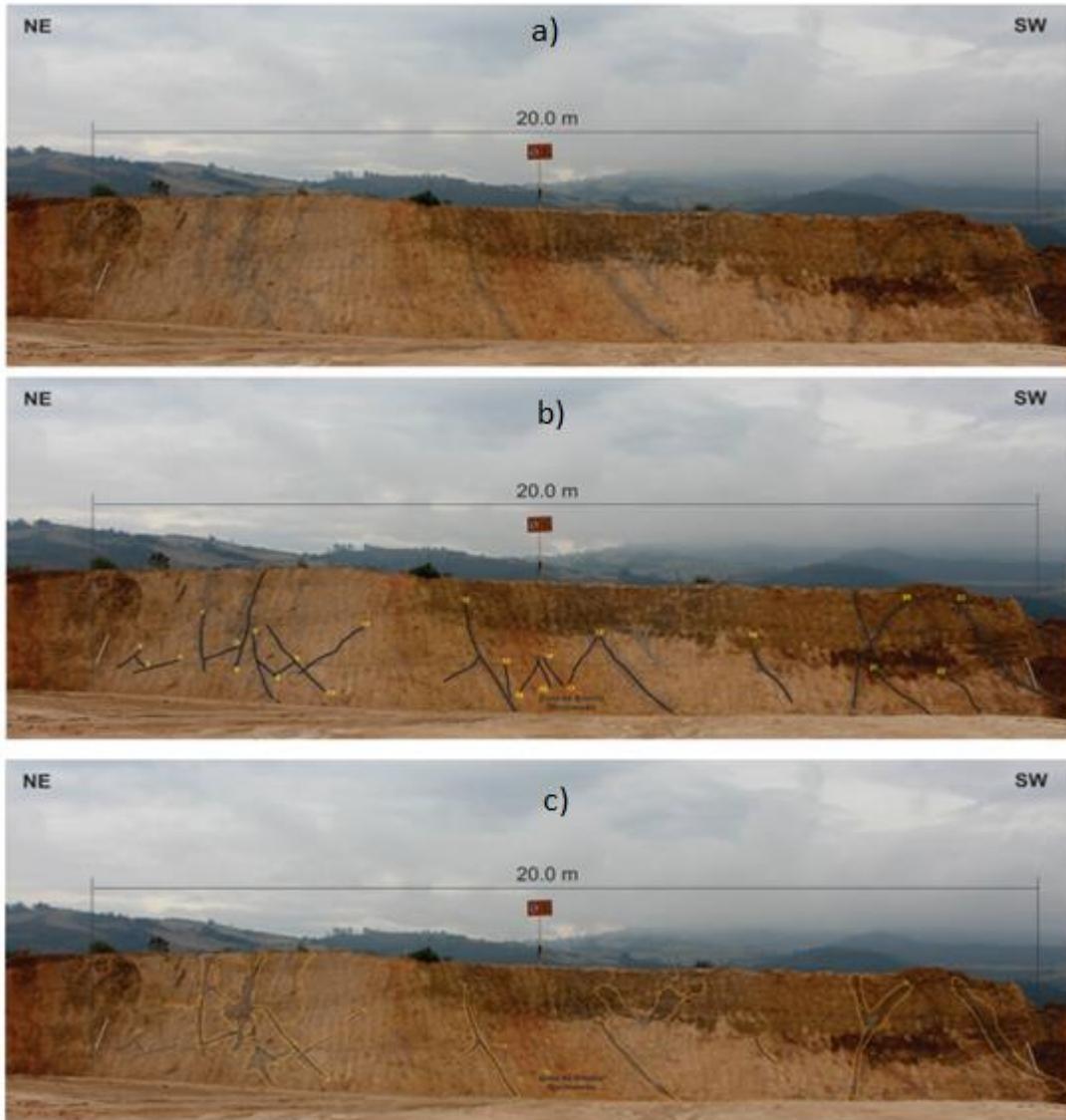


Figura 6-56: Fotografías de una sección de afloramiento del domo SE - Alto de los Godos indicando: b) configuración de las fracturas, venas rellenas de material arcilloso a escala 1:100 c) halos de alteración de las rocas color gris a lado y lado de zonas de fractura delimitado por líneas color naranja.



Figura 6-57: Detalle en zonas de alteración alrededor fracturas, venas rellenas de material arcilloso color blanco del domo SE - Alto de los Godos. Escala: 1:20.

6.7.2 Sección 2

Este afloramiento se encuentra aproximadamente a 5 m de la sección 1, la descripción se realizó en una longitud de 26.10 m en dirección NE-SW en donde fue característico encontrar vetillas en patrón enrejado (*stock work pattern*) de color rojizo rellenas de material arcilloso atravesando de forma diagonal esta sección del domo SE del Alto de los Godos. En la Figura 6-58 se presenta la sección de afloramiento descrita y en la Figura 6-59 la textura de las vetillas en enrejado.



Figura 6-58: Fotografía de la sección 2 para descripción geomecánica del domo SE - Alto de los Godos

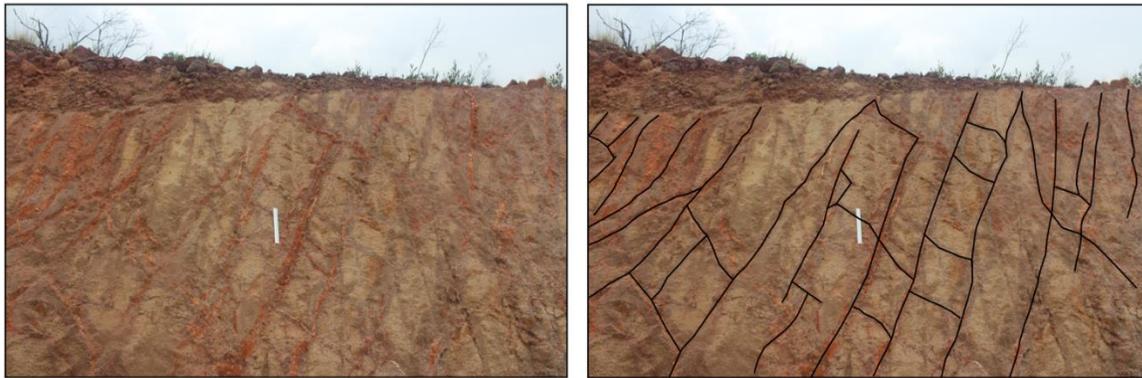


Figura 6-59: Detalle de las fracturas en enrejado y zonas de alteración de la sección 2 del domo SE - Alto de los Godos. Las líneas negras indican la configuración y posición de las discontinuidades. Escala: 1:20.

6.7.3 Sección 3.

Este afloramiento es una de las zonas moderada compactación y dureza de las rocas volcánicas del domo SE Alto de los Godos; la descripción se realizó en una longitud de 66 cm en dirección NE-SW como se indica en la Figura 6-60.

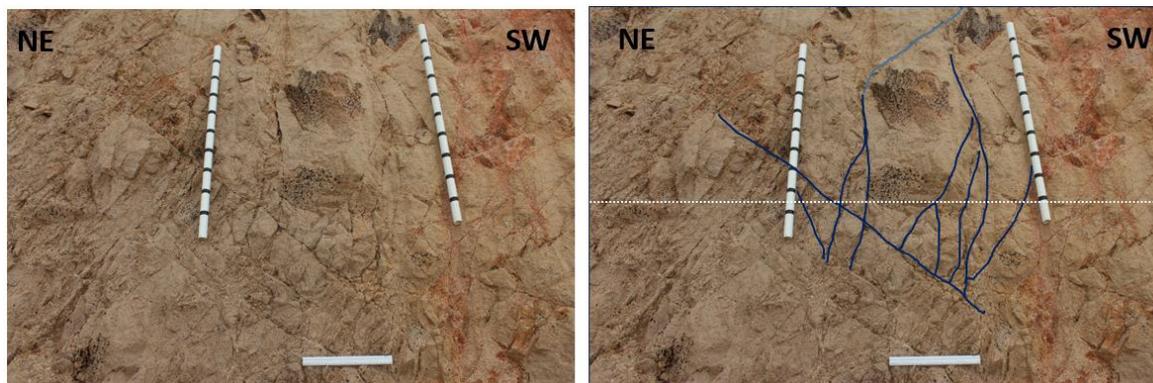


Figura 6-60: Sección 3 para descripción geomecánica en el sector domo SE - Alto de los Godos. Las escalas en blanco con líneas negras representan un metro de longitud y cada línea esta separa cada 10 cm.

La información de las anteriores descripciones fueron el insumo para estimar la calidad de las rocas con la metodología de Jerram y Petford (2011). Para esto primero se tomó el valor de la resistencia a la compresión simple estándar propuesto por Brown (1981), que en el caso de las riolitas es de 175 (MPa), y con este parámetro se calculó el RMR. Para el cálculo del RQD, que es el segundo parámetro de clasificación, se sumaron las longitudes de las separaciones entre las discontinuidades mayores a 1 m en las secciones 1 y 2, y en la sección

3 aquellas mayores a 10 cm, luego se dividió por la longitud total de la sección y se multiplicó por 100. El porcentaje de calidad de la roca % RQD obtenido, según el procedimiento anterior, fue de 71 % en la sección 1, 30 % en la sección 2 y 48 % en la sección 3. A continuación, en la Tabla 6-12 se presenta el resumen de los valores asignados a cada uno los parámetros para la clasificación del macizo rocoso (RMR).

Tabla 6-12: Valoraciones asignadas en el sistema de clasificación RMR según las características de cada sección

Parámetros	Sección 1	Sección 2	Sección 3
1. Resistencia a compresión uniaxial (MPa)	15	15	8
2. (% RQD)	13	8	8
3. Espaciamiento de discontinuidades	15	15	8
4. Condición de las discontinuidades	25	25	30
5. Condición general del agua	25	25	30
RMR	90	85	78

En cuanto a los valores relativos de los esfuerzos principales durante la fractura, se necesitó calcular los parámetros m y s , que se obtienen utilizando las ecuaciones 5 y 6 relacionadas en la sección de datos y métodos. Los valores de m y s para cada una de las secciones estudiadas se muestran en la Tabla 6-13.

Tabla 6-13: Valores de m y s para las secciones de estudio

Parámetro	Sección 1	Sección 2	Sección 3
m	17.49	14.63	11.39
s	0.33	0.19	0.09

Nota. Elaborado con base en los parámetros de Hoek-Brown.

Estos parámetros se usaron para determinar dos de las principales propiedades mecánicas y geotécnicas de una masa rocosa: la resistencia compresiva del macizo rocoso (σ_{cm}) y la resistencia tensional del macizo rocoso (σ_{tm}), mediante las 7 y 8 Los valores de σ_{cm} y σ_{tm} obtenidos de las tres secciones se muestran en la Tabla 6-14.

Tabla 6-14: Resistencia compresiva y tensional del macizo rocoso de las secciones analizadas

Propiedades mecánicas y geotécnicas	Sección 1	Sección 2	Sección 3
σ_{cm}	100	76	52
σ_{tm}	-3.3	-2.3	-1.3

7. Discusión

En esta sección se presenta la integración de resultados de los estudios de los minerales de alteración en litologías volcánicas (depósitos piroclásticos y domos) en sectores específicos del sistema geotérmico de Paipa. Primero se describen, correlacionan e interpretan los resultados de los análisis petrográficos (apartado 6.1), química mineral (6.3), difracción de rayos X (DRX) (6.5), caracterización geomecánica de macizos rocosos (apartado 6.7) y finalmente se identifican los minerales de alteración dentro del contexto de las alteraciones hidrotermales del SGP (Capítulo 5-tablas 5.1 y 5.2).

7.1 Petrografía

Las observaciones petrográficas de las secciones delgadas de las muestras de domos y depósitos piroclásticos permitieron identificar la mineralogía principal. En general, todas las muestras preservan grandes megacristales de feldespatos alcalinos, en conjunto con anfíboles y cuarzo dentro de una masa fundamental criptocristalina alterada con presencia de minerales arcillosos. Las muestras fueron obtenidas en sitios espacialmente separados, correspondientes a afloramientos existentes, algunos con evidencia de alteración hidrotermal, como canteras en explotación, cortes de carretera, depósitos y domos, en los sectores Alto de los Godos, cantera ALFAGRES, cantera CEMEX y el Durazno. De acuerdo a las descripciones petrográficas con base en el contenido de fenocristales propuesta por Le Maitre et al. (2002) (Ver figura 6-14), la clasificación se encuentra en el rango de las latitas y traquitas como se describe a continuación para cada sector: feno-traquita feldespática alcalina (domo SE Alto de los Godos), feno-traquita cuarzo feldespática alcalina (domo centro y domo NW Alto de los Godos), feno-traquitas (domo centro, domo SE- Alto de los Godos y domos ALFAGRES) y feno-latitas (domo y depósito ALFAGRES). Estos resultados

se relacionan y complementan con los análisis petrográficos realizados por Rueda-Gutiérrez (2017) quien clasificó la mineralogía de los domos (SE, NW) del Alto de los Godos y domo ALFAGRES como traquitas alcalinas.

7.2 Química mineral

Los análisis de química mineral permitieron ajustar las descripciones petrográficas a nivel microscópico de cristales de feldespato alcalino, plagioclasas y anfíboles. Según los análisis cuantitativos, los feldespatos alcalinos son principalmente del tipo anortoclasa, ocasionalmente tipo sanidina y las plagioclasas son de tipo albita. Una de las características diferenciadas de la mineralogía primaria analizada, es la presencia de fenocristales euhedrales de feldespatos alcalinos. Algunos de estos megacristales presentan texturas de reabsorción, zonaciones y núcleos de reacción, que puede interpretarse como una población de cristales correspondiente a antecristales (cristales heredados), los cuales han sido “reincorporados” en el magma final y por lo tanto están directamente relacionados con el sistema magmático activo.

Por otro lado, los cristales de feldespato sin texturas de reabsorción, con superficies claras y sin zonación pueden considerarse como una segunda población de fenocristales cristalizados a partir de un magma involucrado en la erupción más reciente, estando en equilibrio con la masa fundida. Esta distinción entre poblaciones de fenocristales según su origen es propuesta por Jerram y Martin (2008).

Finalmente, a partir de las descripciones petrográficas realizadas en las muestras del sector Alto de los Godos, se definieron como minerales esenciales: feldespatos alcalinos tipo anortoclasa y sanidina, plagioclasas y cuarzo; como minerales secundarios: anfíboles, magnetita, apatito y circón; y como minerales de alteración: arcillas, óxidos de hierro, hematita y calcita (Capítulo 6-apartado 6.1.1). Con el fin de precisar el análisis en minerales arcillosos, en estas muestras se aplicó el análisis de difracción de rayos X (DRX) cuyos resultados se discuten a continuación.

7.3 Difracción de rayos

A partir de los análisis DRX y las técnicas de agregado desorientado y lámina, se identificaron minerales arcillosos tales como caolinita, montmorillonita, illita, halloisita 7A y halloisita 10A (aparatado 6.5). La proporción de cada una de las fases minerales es diferente para cada uno de los sectores analizados. Por ejemplo, para los depósitos piroclásticos del sector de cantera CEMEX 8 -frente el Guarrúz- se encontró una mayor proporción del grupo de la esmectita en relación con las otras muestras analizadas. A continuación, se detallan las principales fases minerales para cada uno de los sectores, su relación con trabajos anteriores y su interpretación en esta tesis.

7.3.1 Depósitos piroclásticos frente Guarrúz sector CEMEX

En las muestras de los depósitos piroclásticos del frente Guarrúz se identificaron feldespatos (albita, anortoclasa y en menor proporción sanidina), cuarzo, caolinita, illita y montmorillonita-14A, y ocasionalmente de halloisita 7A. En el ensayo en lámina orientada se constató la presencia de arcilla esmectita (montmorillonita), que se expande al impregnarse con etilenglicol. La agudeza e intensidad de las señales del difractograma evidencian un alto grado de cristalinidad. Las muestras obtenidas se pueden correlacionar con las unidades Cruz de Murcia (Ucm) y Quebrada Honda (Uqc) descritas por Suárez (2016). Según el autor, estas unidades están fuertemente argilizadas y están cortadas por “inyecciones hidrotermales”, las cuales presentan halos de alteración color naranja y rojo; estas unidades son interpretadas como depósitos de Corrientes de Densidad Piroclástica concentrada (CDP), ricas en pómez cuyo origen se dio por rebosamiento. La alteración de las rocas según Suárez (2016) es producto de procesos de meteorización a los que han estado expuestos los fragmentos vítreos y cristalinos (solo feldespatos potásicos), que se han transformado en minerales del grupo de la arcilla como la caolinita. No obstante, aunque se ha relacionado la alteración de los depósitos piroclásticos a procesos de meteorización, según la caracterización de los minerales de arcilla del sector de CEMEX- frente Guarrúz, se puede inferir una alteración hidrotermal. La asociación mineralógica en estas muestras corresponde a albita (A), cuarzo (Q), caolinita (K), Illita 2M1 (I), esmectita (Sm); teniendo en cuenta el diagrama de clasificación de la mineralogía de alteraciones en sistemas

hidrotermales propuesta por Corbett y Leach (1997), esta asociación mineralógica puede clasificarse dentro del grupo de illita – caolinita (I-K), que está relacionada con fluidos que tienen un pH en el rango 4-6; en este grupo los minerales de illita coexisten con minerales del grupo caolín de pH 4-5 dependiendo la temperatura y salinidad del fluido.

Por otro lado, la presencia de illita 2M1 en mayor porcentaje que la esmectita (montmorillonita) en las muestras (ver apartado 6.5, figuras 6-36 y 6-37), puede relacionarse con una transformación del politipo de illita 1Md (rico en esmectita I/S) en el politipo (2M1), rico en illita (Dong y Peacor, 1996). El aumento en la dominancia de la illita 2M1 influye directamente en el espaciamiento de los cristales y por lo tanto en el índice de cristalinidad. Por esta razón, el contenido de esmectita dentro de las intercalaciones de illita- esmectita disminuye progresivamente al aumentar la temperatura en el rango de 100-200 °C (Harvey y Browne, 1991). Adicionalmente, los depósitos piroclásticos de la cantera CEMEX - frente el Guarrúz se encuentran cortados por fracturas que están rellenas de material arcilloso, con halos de alteración de colores grises, cuyas características indican una relación con procesos de alteración hidrotermal por circulación de fluidos, que se correlacionan con la presencia de minerales arcillosos del grupo de la esmectita, illita y caolinita, característicos de las zonas de alteración tipo argílico.

7.3.2 Depósitos piroclásticos sector ALFAGRES

Los depósitos piroclásticos del sector ALFAGRES se caracterizan por tener una alteración superficial que varía de colores blancos-grises a amarillos-rojizos en algunas zonas de fracturas. Según el análisis de DRX en agregado desorientado, las principales fases cristalinas corresponden a cristales de feldespato (albita, sanidina, anortoclasa), cuarzo y en menor porcentaje halloisita, en todas las muestras. En el tratamiento de lámina orientada se logró confirmar la presencia de halloisita 7Å, halloisita 10Å y caolinita, con excepción de la muestra AFG-8 que fue tomada en la zona de alternación color blanco-amarillento que atraviesa de forma vertical los depósitos analizados; en este punto se identificaron otros minerales tales como mordenita, illita 2M1, montmorillonita y clorita.

Una de las características en este sector es la presencia de halloisita- 7Å (deshidratada) y la halloisita 10Å (hidratada); esta última es una estructura metaestable, por lo que es llamada meta-halloisita. Según Jouseein et al. (2005) esta deshidratación puede producirse parcial o totalmente durante el transporte y depositación del mineral. Se ha demostrado que la deshidratación de la halloisita ocurre entre 70-100°C, y que el colapso de la estructura se presenta aproximadamente a 400°C (Cheng y col., 2010; Brigatti y col., 2006). Mediante el tratamiento de calcinación a 500°C en lámina orientada se identifica el colapso de la estructura en los tipos de halloisita, lo cual indica que la presencia de halloisita en estos depósitos piroclásticos está relacionada con un origen hidrotermal de baja temperatura (Harvey y Browne, 1991). Hacia la parte central de la cantera de explotación ALFAGRES se identifica un paleocanal, el cual ha sido rellenado por material piroclástico, en contraste con el resto de los depósitos que se encuentran altamente alterados en la superficie, exhibiendo colores naranjas, rojizos y amarillos. Los difractogramas resultantes para esta área se caracterizan por la presencia de cuarzo, caolinita, halloisita -7Å, halloisita 10Å e illita 2M1.

7.3.3 Rocas porfiríticas provenientes del sector ALFAGRES

Las rocas porfiríticas presentan la misma mineralogía identificada en las muestras de los depósitos piroclásticos del sector ALFAGRES; un alto porcentaje de feldespatos (21-71%), cuarzo (4-11%), halloisita 10Å (4.8%), halloisita 7Å (3.2 %) y en algunas muestras dickita (3.6%). Tanto la información petrográfica como los análisis de difracción de rayos X (DRX) en estas rocas complementan las descripciones petrográficas realizadas por Rueda-Gutiérrez (2017), quien identifica que la composición de estas rocas es de feldespatos potásicos, plagioclasas, anfíboles y óxidos.

Según el autor, estas rocas constituyen un cuerpo volcánico (criptodomo) teniendo en cuenta la geomorfología y posición de los depósitos piroclásticos que lo suprayacen. El autor también menciona que, según los estudios geofísicos realizados en el área, se puede sugerir que cuerpo ígneo es una ramificación de una estructura más grande, compartida con el Domo Central o domo NW, existiendo también la posibilidad de que sea un cuerpo independiente.

7.3.4 Rocas porfiríticas domo SE-Alto de los Godos

Una característica especial de las rocas de este domo es que presentan vetillas pequeñas que interceptan las rocas (*stockwork*). En algunos sectores estas vetillas están rellenas de materiales arcillosos color café-rojizo, acompañadas de halos de alteración de color gris y rosado-rojizo. El primer halo de alteración color gris está constituido por feldespatos, cuarzo, caolinita y halloisita 10Å, mientras el segundo halo color rosado rojizo está constituido por feldespatos, cuarzo, caolinita, montmorillonita, halloisita 7Å y halloisita 10Å.

7.3.5 Depósitos piroclásticos sector el Durazno

Estos depósitos se encuentran aproximadamente a 6 kilómetros al noroeste del sector Alto de los Godos. Según Rodríguez y Alfaro (2015), ésta es un área con altas concentraciones de elementos radioactivos y alteraciones hidrotermales en superficie de tipo argílico y argílico avanzado. Esta área fue descrita por González et al. (2008) como una zona de intensa alteración ácida y según los difractogramas la mineralogía principal corresponde a minerales de sanidina, cuarzo y minerales de alteración como caolinita y alunita. Esta alteración hidrotermal ácida se extiende hasta profundidades de entre 50 y 100 m, en muestras recuperadas de testigos de perforación que evidenciaron, mediante análisis de difracción de rayos X (DRX), la presencia de alunita y caolinita, moscovita, barita, dickita, pirita y tridimita (Rodríguez y Alfaro 2015). Para el desarrollo de esta tesis se tomaron de este sector tres muestras dispersas en la cantera de explotación de El Durazno. En dichas muestras se identificaron, mediante la técnica de agregado desorientado de DRX, la presencia de cuarzo, sanidina, hornblenda, illita, montmorillonita, alunita, pirita, moscovita, hausmanita y talco, lo cual es consistente con y complementa los estudios anteriores en la zona. Es importante mencionar que este depósito se caracteriza por una mezcla de materiales sedimentarios y volcánicos que no permiten definir con claridad en superficie de donde provienen las muestras González et al. (2008).

De acuerdo a lo anterior, teniendo en cuenta los análisis petrográficos y de difracción de rayos X, se puede deducir que los depósitos de la cantera CEMEX tienen un mayor grado de alteración hidrotermal, dado por la presencia de minerales de esmectita e illita que pueden

haberse formado en temperaturas entre los 100-200°C en condiciones de pH neutro. Esto puede estar relacionado con la edad de los materiales, ya que en las dataciones (huellas de fisión) realizadas por Bernet (2016), se asignan dos edades, una de 3.8 Ma y otra de 9.9 Ma, siendo más antiguos y por lo tanto presentando un mayor tiempo de actividad de los procesos de alteración y meteorización en comparación con las rocas del sector ALFAGRES y Alto de los Godos, que según las dataciones Ar-Ar de Rueda- Gutiérrez (2017) tienen edades de 2.6 Ma y 2.8 Ma respectivamente.

7.4 Caracterización geomecánica de macizos rocosos

La descripción del macizo rocoso, desde el punto de vista geomecánico, se estructuró a partir de tres secciones del domo SE del Alto de los Godos, que exhiben con mayor claridad fracturas rellenas de material arcilloso con halos de alteración y vetillas en patrón enrejado (*stockwork pattern*). Estas texturas en muchos casos están relacionadas con efectos de hidrofracturamiento durante emplazamiento de cuerpos ígneos y la circulación simultánea o posterior de fluidos geotermales y su interacción con las rocas porfiríticas del domo. Los valores de RMR de las secciones descritas están en el orden de 78 a 90, consideradas según la clasificación Bieniawski (1989) de tipo II, es decir buena calidad. El material arcilloso presente en las principales fracturas y halos de alteración (ver figura 6.44 apartado 6.5) también fue analizado por difracción de rayos X (DRX), identificando como principales fases cristalinas feldespato, cuarzo y como minerales de alteración illita, montmorillonita, halloisita 7Å, halloisita 10Å y caolinita (ver tabla 6-10, apartado 6.5)

7.5 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal superficial en el área geotérmica de Paipa (AGP) está relacionada en principio con la interacción entre fluidos acuosos y rocas o depósitos, que involucra aguas ácidas de baja temperatura (Alfaro et al., 2020). Uno de los sectores que presenta intensa alteración ácida es la zona conocida como El Durazno. Estos depósitos piroclásticos incluyen minerales de sanidina y cuarzo, así como minerales hidrotermales como caolinita

y alunita (González et al., 2008). Trabajos anteriores de caracterización de las litologías volcánicas y alteraciones hidrotermales en las áreas Alto de los Godos, cantera CEMEX y ALFAGRES (Cepeda y Pardo, 2004; Alfaro, 2005; Suárez, 2016; Rueda-Gutiérrez, 2017) hacen mención de procesos de alteración de tipo argílico, en depósitos piroclásticos, inferidos por la presencia de caolinita, además de una alteración de mayor temperatura reportada por Alfaro (2005) y deducida a partir de minerales como la epidota, adularia, clorita e illita, encontrados en xenolitos (capítulo 5; tabla 5-2). Con la información obtenida en esta tesis es posible complementar la información y validar que los depósitos piroclásticos del sector CEMEX se encuentran alterados hidrotermalmente, específicamente presentan alteración de tipo argílica con base en la presencia de minerales tales como esmectita, illita, caolinita y cuarzo, llegando a tener temperaturas de formación para el grupo esmectita-illita en el rango de 100-200°C. Por el contrario, para el sector ALFAGRES, la presencia de halloisita 7Å y halloisita 10Å puede estar relacionada con condiciones de formación de pH neutro y temperaturas más bajas, del orden de 70-100°C, al igual que las litologías en el sector domo SE del Alto de los Godos. Los minerales de alteración identificados en superficie en cada uno de los sectores se muestran en la figura 7-1. Finalmente en esta tesis se presenta una propuesta integrada de la mineralogía de alteración hidrotermal del AGP (figura 7-2) que incluye los minerales de alteración reportados por Alfaro (2005) a partir de análisis en xenolitos metamórficos en el sector Alto de los Volcanes que representarían la alteración propilitica (320°C) y refina la mineralogía de alteración tipo argílica que había sido inferida por la presencia de caolinita en superficie; incluyendo nuevos minerales tales como hallosita (hidratada y deshidratada), dickita de pH ácido, esmectita-motmorillonita, illita de pH neutro y la adularia y mordenita de pH alcalino.

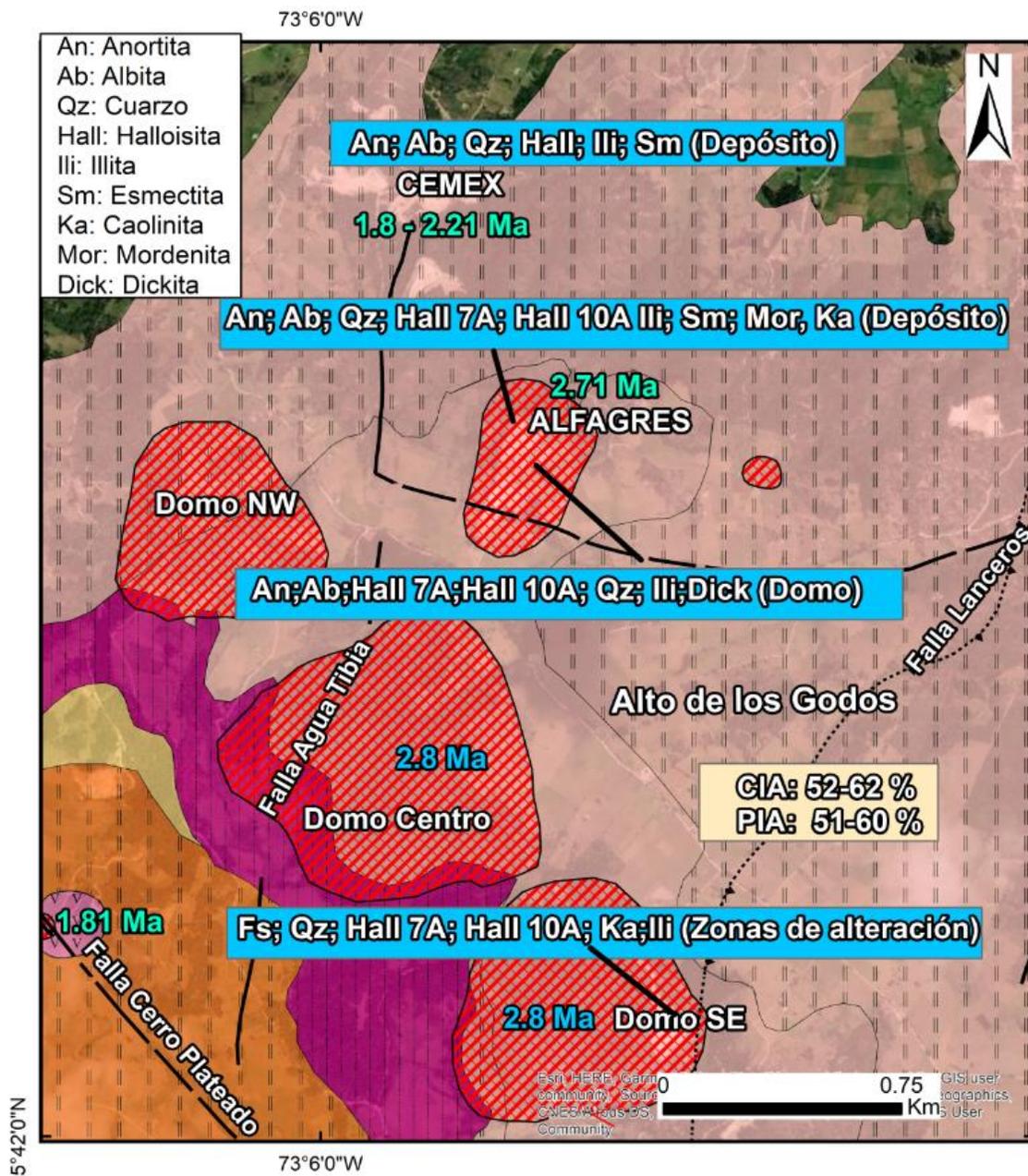


Figura 7-1: Mapa de distribución de minerales de alteración en domos y depósitos del sector Alto de los Godos del Area Geotérmica de Paipa.

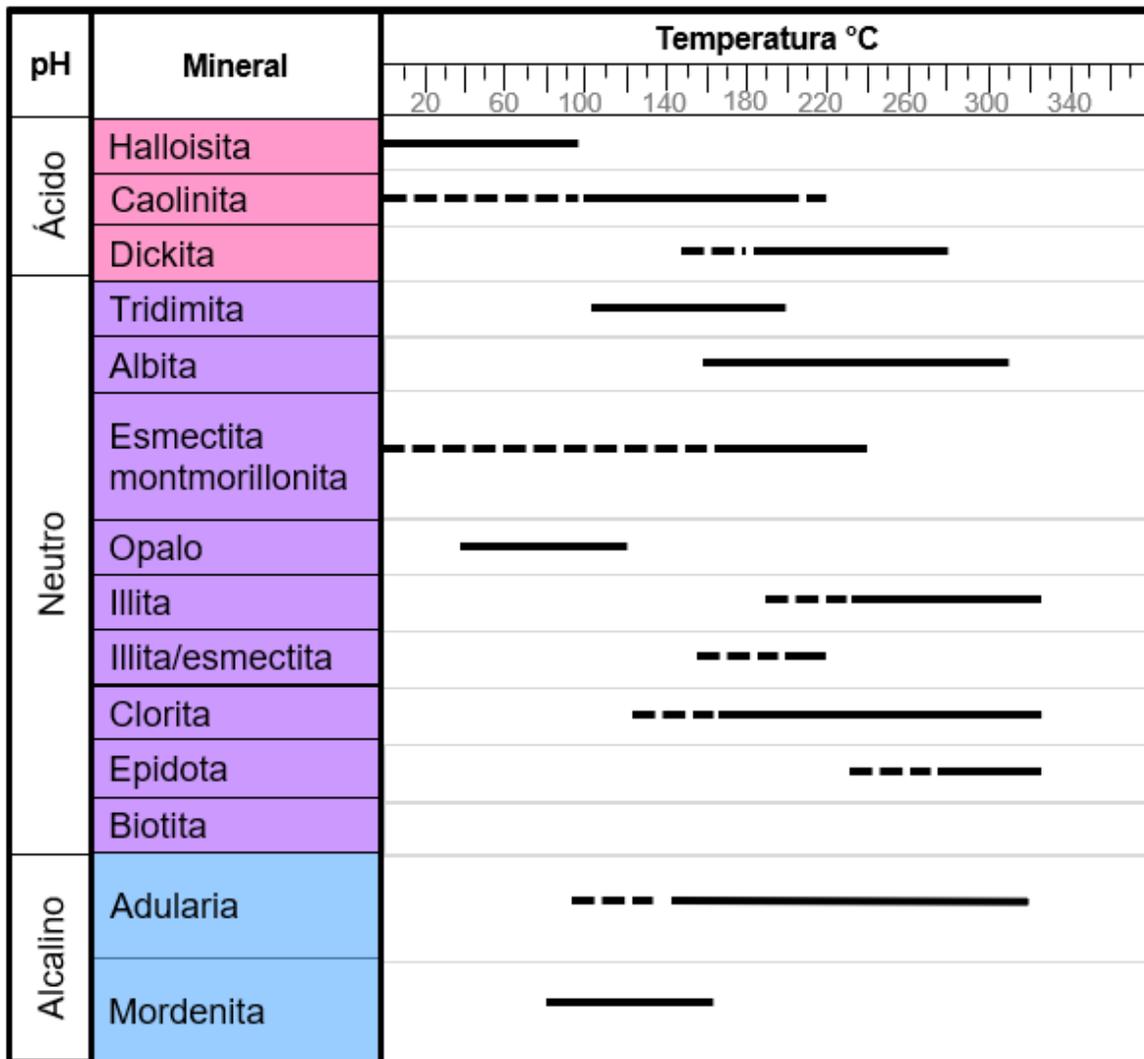


Figura 7-2: Minerales de alteración hidrotermal en el Area Geotérmica de Paipa. Alfaro (2005), esta tesis.

8. Conclusiones

Durante las observaciones en campo fue posible identificar zonas de alteración hidrotermal en depósitos y domos del AGP, por las variaciones de color (desde los tonos rojizos, amarillos y blancos hasta grises) de las litologías en superficie, y la presencia de minerales arcillosos en las fracturas que cortan los depósitos piroclásticos de los sectores canteras CEMEX y ALFAGRES, que presentan patrones de vetillas en enrejado (*stockwork pattern*). Estos dos aspectos relevantes, pues ambos son una evidencia de actividad hidrotermal.

Después de realizar los respectivos análisis petrográficos, se confirma que la litología principal del AGP (depósitos y domos) corresponde al rango de las latitas y traquitas, con una mineralogía principal característica compuesta por feldespatos tipo anortoclasa y sanidina; plagioclasas tipo albita, y cuarzo; y minerales accesorios como anfíboles, magnetita, apatito y circón.

La característica principal de las litologías volcánicas analizadas es la textura porfirítica, con grandes cristales de feldespato alcalino en masa fundamental criptocristalina alterada a minerales arcillosos. Algunos de los macrocristales de feldespato analizados en microsonda electrónica tienen zonaciones, texturas de sobrecrecimiento, bordes de reacción y algunas superficies limpias sin texturas de alteración asociadas. De esto se concluye que existen dos poblaciones de cristales: la primera, correspondiente a antecristales (cristales heredados), los cuales han sido reincorporados (en un magma final) y, por lo tanto, están relacionados con el sistema magmático activo, y otra población sin texturas de reabsorción y superficies claras sin zonación que pueden considerarse como cristalizados a partir del magma involucrado en la erupción más reciente estando en equilibrio con la masa fundida.

Los minerales primarios (feldespatos alcalinos) no se transforman completamente a minerales arcillosos y preservan sus formas euhedrales. El nivel de alteración más alto se

identifica en la masa fundamental microcristalina. La composición de los fenocristales de feldespatos alcalinos es principalmente de tipo anortoclasa, en menor proporción sanidina y las plagioclasas identificadas dentro de los fenocristales son de composición albitica.

Los minerales arcillosos estudiados a nivel petrográfico, en la masa fundamental microcristalina, presentan colores de interferencia intermedios de segundo orden, por su tamaño y grado de cristalización. Su caracterización se refinó con el análisis de difracción de rayos X (DRX): mediante la preparación de lámina orientada se lograron identificar minerales del grupo de la esmectita, illita, caolinita, illita, halloisita hidratada y deshidratada. La formación de este tipo de minerales se relaciona con procesos de alteración hidrotermal dada la buena cristalinidad de los minerales arcillosos, identificada en la agudeza y simetría de las señales en los difractogramas.

Al integrar las observaciones en campo, los análisis petrográficos y de difracción de rayos X (DRX), se identificó la existencia de asociaciones mineralógicas de los grupos del caolín e illita- caolinita, típicas de una alteración argílica y argílica intermedia con fluidos de pH moderadamente bajo.

La presencia de halloisita hidratada y deshidratada es un producto de intemperismo supergénico. Sin embargo, su presencia en zonas específicas de alteración como fracturas y halos de alteración puede relacionarse con condiciones hidrotermales de muy baja temperatura menores a 100° C.

Los depósitos piroclásticos del sector de la cantera CEMEX- frente Guarrúz exhiben una alteración hidrotermal de tipo argílica, caracterizada por una mayor proporción de minerales del grupo de la esmectita. La asociación mineralógica para este sector es: albita, cuarzo, caolinita, Illita 2M1, y esmectita, asociación típica de fluidos con pH en el rango 4-6.

Los depósitos piroclásticos del sector de la cantera ALFAGRES poseen una alteración superficial de colores blancos-grises a amarillos-rojizos, caracterizada por la presencia de minerales tales como esmectita, illita, y caolinita, asociados con temperaturas de formación de esmectita- illita en el rango de 100-200°C.

9. Recomendaciones

- Realizar la caracterización de minerales de alteración a una mayor profundidad a partir de perforaciones exploratorias, utilizando las técnicas de polvo desorientado y lámina orientada en difracción de rayos X (DRX) para reconocer la existencia de zonas de alteración de mayor temperatura que puedan dar indicaciones de las condiciones fisicoquímicas de fluidos geotermales pasados y presentes.
- Caracterizar minerales de alteración hidrotermal en unidades sedimentarias, en la formación Churuvita y en unidades arcillosas de la formación Une, con el fin de correlacionar si se encuentran los mismos minerales de alteración identificados en las litologías volcánicas analizadas.
- Identificar otros sitios de muestreo de litologías volcánicas en el AGP, específicamente, en frentes de explotación minera a pequeña escala no reconocidos en este trabajo, para refinar y alimentar la existencia de zonas de alteración argílica superficial u otros tipos de alteración.
- Realizar en detalle la caracterización de los depósitos piroclásticos de piroclásticos identificados en trabajos de otros autores en la cantera ALFAGRES y en los alrededores del Alto de los Godos y Alto de los Volcanes.
- Profundizar en el análisis de sensoramiento remoto para el mapeo de las alteraciones hidrotermales mediante la aplicación de técnicas de análisis digital, tomando como insumo de calibración las zonas caracterizadas y los minerales de alteración identificados en esta tesis.
- Realizar análisis de minerales de alteración en las zonas de mayor anomalía termal con o sin expresión superficial de manantiales calientes.
- Realizar análisis de inclusiones fluidas durante la caracterización litológica en profundidad.
- Generar un nuevo modelo de alteración hidrotermal una vez se integren los datos de minerales de alteración superficial con datos de minerales de alteración en profundidad.

10. Referencias

- Alfaro, C. (2005). *Alteración hidrotermal en el sistema geotérmico de Paipa*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía (Ingeominas) y Sistema Geológico Colombiano (SGC).
- Alfaro, C. (2005a). *Geoquímica preliminar de gases del sistema geotérmico de Paipa*. Bogotá: Ingeominas y SGC.
- Alfaro, C. (2016). *Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*. En memorias del Simposio Servicio Geológico Colombiano 100 años de producción científica al servicio de los colombianos (p. 115). Bogotá: SGC.
- Alfaro, C., Matiz, J., Rueda, J., Rodríguez, G., González, C., Beltrán, M., Rodríguez, G., Malo, J. (2017). *Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: SGC.
- Alfaro-Valero, C.M., Rueda-Gutiérrez, J.B., Matiz-León, J.C., Beltrán-Luque, M.A., Rodríguez-Rodríguez, G.F., Rodríguez-Ospina, G.Z., González-Idárraga, C.E. & Malo-Lázaro, J.E. 2020. Paipa geothermal system, Boyacá: Review of exploration studies and conceptual model. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, 36 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.04>
- Alfaro, C., Velandia, F. y Cepeda, H. (2005). *Colombian Geothermal Resources*. Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Anderson, J. L. & Smith, D. R. 1995. The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *AM MINERAL* 80, 549-59.
- Aviña, H., Romo, J. y Rocha, D. (2018). Mapa de Ruta Tecnológica Usos Directos del Calor Geotérmico. <http://cemiegeo.org/>

- Bernet, M., Urueña, C., Amaya, S. y Peña, M. (2016). New thermo and geochronological constraints on the Pliocene-Pleistocene eruption history of the Paipa-Iza volcanic complex, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 299-309.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027316301731>
- Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York.
- Blundy, J. y Holland, T. (1990). Calcic amphibole equilibria and a new amphiboleplagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 208-224.
- Bonilla, G., Sarmiento, G. y Gaviria, S. (2011). Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos del Maastrichtiano-Paleoceno al norte de Bogotá, cordillera Oriental de Colombia. *Geología Colombiana*, 36, 179-196.
- Botero, C. (1950) Reconocimiento Geológico del área comprendida por los municipios de Belén, Cerinza, Corrales, Floresta, Nobsa y Santa Rosa de Viterbo, Depto. Boyacá. *Compo. Est. Geo. Ofic. Colombia*, 8, 245-311,32 Lam., Bogotá.
- Brown, P. (1978). Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 6(1), 229-248.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.06.050178.001305>
- Browne, P. (1997). Hydrothermal Alteration. Geothermal Institute. The University of Auckland.
- Buddington, A.F., and Lindley, D. h., 1994. Iron titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *JPetrol.*, vol 5,2:310-357
- (BRGM, s. f.). Bureau de Recherches Géologiques et Minières-BRGM, s. f
<https://www.brgm.fr/activites/geothermie/geothermie>
- Castellanos, O. y Ríos, C. (2005). Microsonda electrónica; principios de funcionamiento. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(6), 1-6.

- http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home_40/recursos/01_general/revista_6/13102011/01.pdf
- Cediél, F. (1969.). Geología del Macizo de Floresta. I CongresoCol. Geol. Mem. 17-29
- Cepeda, H. y Pardo, N. (2004). *Vulcanismo de Paipa, proyecto de exploración y evaluación de los recursos geotérmicos*. Bogotá: SGC.
- Corbett, G. y Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, (6), 237.
- Deer, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., y Cording, E. J. (1967). *Design of surface and near surface construction in rock, failure, and breakage of rock*. En Proceeding of the 8th Symposium on Rock Mechanics, University of Minnesota, American Institute of Mineral Engineering.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2019). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022*. Bogotá: DNP. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PND-2018-2022.pdf>
- DNP y Enersinc (2017). *2017 Energy demand situation in Colombia* [informe]. DNP y Enersinc. <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>
- Dickson, H. y Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy utilization and technology*. Paris: Unesco. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000133254>
- Droop, G.T.R. (1987). A general equation for estimating Fe 3+ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51: 431-5.
- Ferreira, P. & Hernández, G. 1988. Evaluación geotérmica en el área de Paipa basada en técnicas isotópicas, geoquímica y aspectos estructurales. Tesis pregrado. Universidad Nacional de Colombia, 125 p. Bogotá

- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W. y Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-924. https://www.researchgate.net/publication/230890666_Unraveling_the_effects_of_potassium_metasomatism_in_sedimentary_rocks_and_paleosols_with_implications_for_paleoweathering_conditions_and_provenance
- Fletcher, C. F. (2017). *Physical Geology. The Science of Earth. Third Edition.* Wiley, 600 p.
- García, H., Corredor, A., Calderón, L. y Gómez, M. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. *Fedesarrollo*. https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/331/Reporep_Octubre_2013_Garcia_et_al.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Grant, Marcus & Bixley, P. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering.* 10.1016/C2010-0-64792-4.
- Garzón, T. (2003). *Geoquímica y potencial minero asociado a cuerpos volcánicos en la región de Paipa, departamento de Boyacá, Colombia* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN.
- GEA (2012). *Geothermal Energy Association. Geothermal Basics: Q&A.* https://www.geothermal.org/PDFs/Geothermal_Basics_QandA.pdf
- Gifkins C, Herrmann W, Large R (2005) *Altered volcanic rocks - A guide to description and interpretation.* Centre Ore Depos Res, Univ Tasmania, Hobart
- Gómez, J., Montes, N. E., Nivia, Á. y Diederix, H., (compiladores) (2015). *Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000.* Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Paginas/MapaGeologico.aspx>
- González, L., Vásquez, E., Muñoz, R., Gómez, H., Parrado, G. y Vargas, S. (2008). *Exploración de recursos energéticos, exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca,*

- Chivatá (Boyacá). Bogotá: Ingeominas.
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524354/documento/pdf/2105243541101000.pdf>
- Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutiérrez-Negrín, L., Huenges, E. . . Wratt, D. (2011). Energía geotérmica. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, S. Kadner, T. Zwickel, et al. (Eds.), Fuentes de energía renovable y mitigación del cambio climático: Informe especial del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (págs. 401-436). Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017 / CBO9781139151153.008
- Ghiorso, Mark & Evans, Bernard. (2008). Thermodynamics of Rhombohedral Oxide Solid Solutions and a Revision of the FE-TI Two-Oxide Geothermometer and Oxygen-Barometer. American Journal of Science - AMER J SCI. 308. 10.2475/09.2008.01.
- Hedenquist, J., Izawa, E., Arribas, A. y White, N. (1996). *Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. Special Publication Number 1*. The Society of Resource Geology.
- Hernández, G. & Osorio, O. 1990. Geología, análisis petrográfico y químico de las rocas volcánicas del suroriente de Paipa, Boyacá, Colombia. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia, 100 p. Bogotá.
- Hochstein, M. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. En M. Dickson y M. Fanelli (eds.), *Small geothermal resources - A guide to development and utilization* (pp. 31-59). Roma: UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Source.
- Hoek, E. y Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136516099780069X>
- Holland, T., Blundy, J. (1994). Interacciones no ideales en anfíboles cálcicos y su relación con la anfíbol-plagioclas. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>

- IGA (2013). *Geothermal exploration best practices: a guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects*. Bochum: IGA y Service GmbH. <http://decarboni.se/sites/default/files/publications/138043/geothermal-exploration-best-practices-guide-resource-data-collection-analysis-presentation-geothermal-projects.pdf>
- IDAE, 2008. Manual de geotermia. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía- IDAE, 2008, p. 129
- International Geothermal Association (IGA) (2018). *Cool the earth, stay hot with geothermal quick guide, explore the treasure under your feet*. IGA. <https://www.geothermal-energy.org/download/209/>
- Jerram, D. y Petford, N. (2011). *The field description of igneous rocks*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Jiménez, C. (2016) Caracterización petrológica y geoquímica de la unidad Ortoneis, macizo de Santander, Colombia [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/55162/7/carolinajimeneztriana.2016.pdf>
- Lagat, J. (2010, octubre-noviembre). *Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria domes geothermal field, Kenya* [ponencia]. Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP, GDC y KenGen, Kenya. <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-11-02.pdf>
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Lee, K. (2001). Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 431-442. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00056-0).

- Llopis, G., Angulo, V. (2008). Guía de la energía geotérmica. Proyectos Ingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Melgarejo, J., Proenza, J., Galí, S. y Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- McLennan, SM (1993) Meteorización y denudación global. *Revista de geología*, 101, 295-303. <http://dx.doi.org/10.1086/648222>
- Marshall, D. (1996). Ternplot: An excel spreadsheet for ternary diagrams. *Computers & Geosciences*, 22(6), 697-699. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00012-X](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00012-X).
- Martínez, (2013). Factibilidad de aprovechar la geotermia como uso directo, para la fabricación de leche en polvo. Tesis pregrado. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de México.
- McLennan, S. M. (1993). Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101(2), 295-303. <http://www.jstor.org/stable/30081153>.
- Ministerio de Minas y Energía (MME o Minminas) y Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2016). *Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017 – 2022. Una realidad y oportunidad para Colombia* [document en línea]. Minminas y UPME. http://hbcorp.co/wp-content/uploads/2017/09/PAI_PROURE_2017-2022-Final.pdf
- Misra, K. (2000). *Understanding mineral deposits*. Knoxville: Springer.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Mojica, J. y Valentino, M. T. (2009). *Alteración hidrotermal del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.

- Moreno, S. (2018). *Caracterización geológica de un depósito de avalancha de escombros localizado al nororiente del volcán Azufral (Nariño, Colombia)* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/71929/2/SilviaMoreno.2018.pdf>
- Navia, A. & Barriga, A. 1929. Informe sobre las aguas termo medicinales de Paipa, Colombia. Gobernación de Boyacá, 76 p. Bogotá.
- Nesbitt, H. W. y Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite. *Nature*, 299, 715–717. 10.1038/299715a0
- Nyandigisi, J. y Katana, C. (2016, noviembre). *High temperature hydrothermal alteration in active geothermal systems a case study of Olkaria domes* [publicación]. African Rift Geothermal Conference, Gobierno de Etiopía, Adís Abeba. <http://theargeo.org/fullpapers/HIGH%20TEMPERATURE%20HYDROTHERMAL%20ALTERATION%20IN%20ACTIVE%20%20GEOOTHERMAL%20SYSTEM%20A%20CASE%20STUDY%20OF%20OLKARIA%20DOMES.pdf>
- Organización Latinoamericana de Energía (Olade) (2018). *Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 2(1),
- Pearce, J. A. y Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2), 290-300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5).
- Peña, Y. (2016). Evaluación petrológica de las rocas de Paipa, Boyacá [tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN.
- Pérez, D. y Chaparro, J. (2018, diciembre). *Apropiación y usos comunitarios de la energía geotérmica y recursos asociados al Sistema Geotérmico de Paipa, Boyacá, en el marco del Distrito de Manejo Integrado, DMI, del Lago de Sochagota y la cuenca hidrográfica que lo alimenta*. Reunión Nacional de Geotermia, Asociación Geotérmica Colombiana, Bogotá.

<https://www.ageocol.org/app/download/17832625325/32.ConstanzaDiana.pdf?t=1548211600>

Peccerillo, A. & Taylor, S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>

Pirajno, F. (2010) *Hydrothermal processes and mineral systems*. Perth: Springer.

Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala, Decreto 1073 de 2015. Presidencia de la República (2017). <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20348%20DEL%2001%20DE%20MARZO%20DE%202017.pdf>

Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala,

Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, Ley No. 1715 del 13 de mayo de 2014. Congr. (2014). https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

Renzoni, G., Rosas, H. y Etayo, F. (1998). *Geología de la plancha 191 Tunja*. Bogotá: Ingeominas.

Robles, W., Romero, W., León, M. (2015) Diseño y construcción de un prototipo de sistema para pasteurizar leche utilizando fluidos geotérmicos de baja entalpia. [tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio UES. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/20716/>

Rodríguez, G. y Valero, C. (2015) *Caracterización de núcleos de perforación en las zonas de El Durazno, Paipa y criptodomo de Iza*. Bogotá: SGC.

- Rodríguez, G. y Vallejo, E. (2013). *Sondeos térmicos superficiales en el área geotérmica de Paipa (Boyacá)*. Bogotá: SGC.
- Rollinson, H. (1993) *Using the geochemical data, evaluation, presentation, interpretation*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Rueda-Gutiérrez, J. (2017). *Cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: SGC.
- Rueda-Gutiérrez, J.B. (2020). Nuevas evidencias del magmatismo asociado con el sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 51-79. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020002>
- Sanyal, S. (2005, 31 de enero-2 de febrero). *Classification of geothermal system: a possible scheme* [ponencia]. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University.
- Sener (2018). *Mapa de ruta tecnológica usos directos del calor geotérmico*. Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo).
- Stelling, P., Shevenell, L., Hinz, N., Coolbaugh, M., Melosh, G. y Cumming, W. (2016). Geothermal systems in volcanic arcs: volcanic characteristics and surface manifestations as indicators of geothermal potential and favorability worldwide. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 324, 57-72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.018>.
- Stefánsson A., Kleine BI (2018) Alteración hidrotermal. En: White WM (eds) *Encyclopedia of Geochemistry*. Serie Enciclopedia de Ciencias de la Tierra. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_65
- Stoltman, J. (1989). A quantitative approach to the petrographic analysis of ceramic thin sections. *American Antiquity*, 54(1), 147-160. doi:10.2307/281336

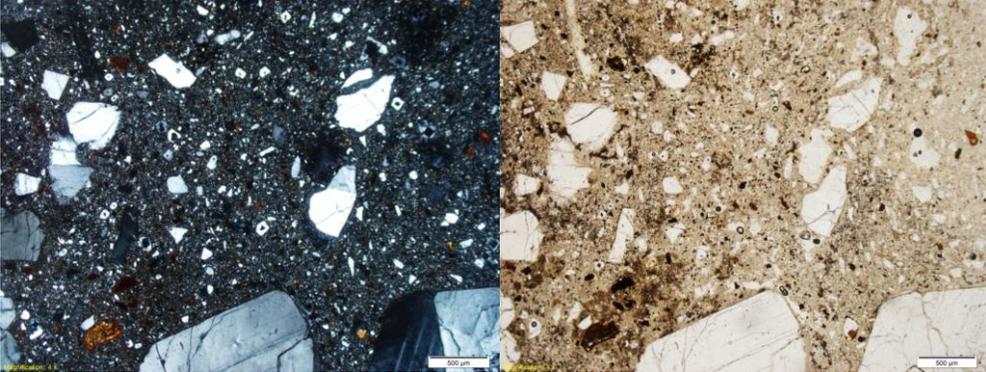
- Streckeisen, A. L. y Le Maitre, R. W. (1979). A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen*, 136, 169-206.
- Suárez, J. (2016) *Mecanismos de transporte y acumulación durante las erupciones piroclásticas más explosivas, registradas al sur de Paipa, en la Cordillera Oriental de Colombia* [tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes. <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto201699.php?id=11833.pdf>
- Torres, F. (2015) viabilidad de un proyecto de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía al sector industrial [tesis de maestría, Universidad de Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/76621>
- Tapia, E. (1997) Aplicaciones petrogenéticas de los minerales magnéticos en rocas ígneas (1997). Unión Geofísica Mexicana, <https://ugm.org.mx/>.
- Thorez, J. (1976), *Practical identification of clay minerals. A handbook for teachers and students in clay mineralogy*. Dison, Bélgica: Institute of Mineralogy, Liege State University.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. y Rodríguez, G. I. (1998). *Geología de la plancha 172 Paz de Río – Memoria explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá: UPME. http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Velandia, F. (2003). *Informe técnico. Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa*. Ingeominas. doi: 10.13140/RG.2.1.4741.2720
- White, D. y Truesdell, A (1973). Production of superheated steam from vapor-dominated geothermal reservoirs. *Geothermics*, 2(3-4), 154-173. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(73\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(73)90022-9)

- White, N. C. y Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. *SEG newsletter*, 23(1), 9-13.
https://www.researchgate.net/profile/Jeffrey_Hedenquist/publication/268274871_Epithermal_gold_deposits_Styles_characteristics_and_exploration/links/54e78b720cf2f7aa4d4d9f94.pdf
- Winter, J. D. (2014). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Pearson Education Limited, 729 p
- XM (2019). *Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2019*. XM, https://informeannual.xm.com.co/demo_3/pages/xm/21-capacidad-efectiva-neta.html

Anexos

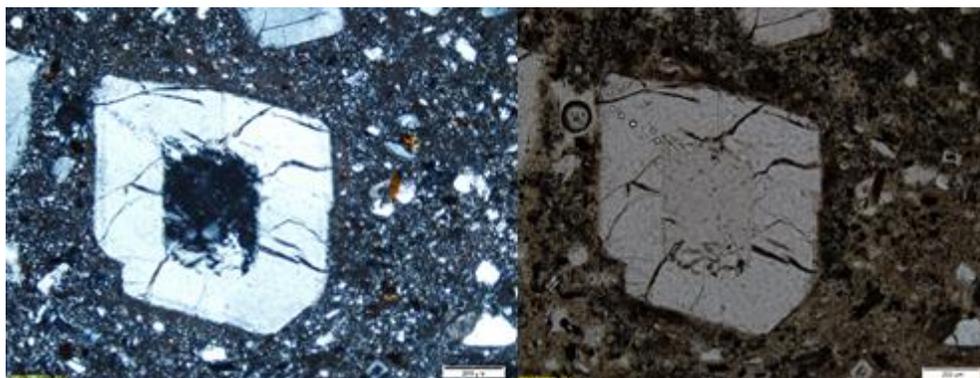
A. Anexo: formatos de descripción petrográfica

- Descripción petrográfica sector domo SE-Alto de los Godos, muestra VGP-09

Información general	
	Muestra: VGP-09
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 364
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: grueso 3-5 mm
Descripción macroscópica:	
Roca volcánica con variaciones en el color debido a la diferencia en la intensidad de la agilización y la presencia de óxidos de hierro. Fenocristales de sanidina y plagioclasas son encontrados en medio de una matriz afectada por la agilización. Los puntos de color rojizo de la muestra se relacionan con cristales de magnetita, que han sido reemplazados por hematita en el proceso de alteración hidrotermal.	
Descripción microscópica	
Textura general: porfirítica.	
Otras texturas o texturas especiales: texturas de tipo fragmentario.	
Descripción de la masa fundamental: es dominada en esta muestra por el vidrio volcánico que, a la vez, se transforma a arcillas en el proceso de agilización.	
	
Microfotografía de cristal matriz. Muestra VGP-09, izquierda XP, 4X y Derecha PP, 4X.	
Descripción microscópica de minerales	
Feldespato potásico (sanidina): fenocristal predominante en la muestra. Se caracteriza por la ocurrencia de maclado simple con la presencia de microfracturamientos rellenos parcialmente por la presencia de vidrio volcánico. Al interior de algunos cristales se encuentran inclusiones de cuarzos y plagioclasas. Ocasionalmente algunos de los cristales se reconocen como astillas producto, posiblemente, de los eventos de tipo explosivo que dieron origen a este tipo de roca. Se presentan en tamaños desde 5.6 mm hasta 0.12 mm.	



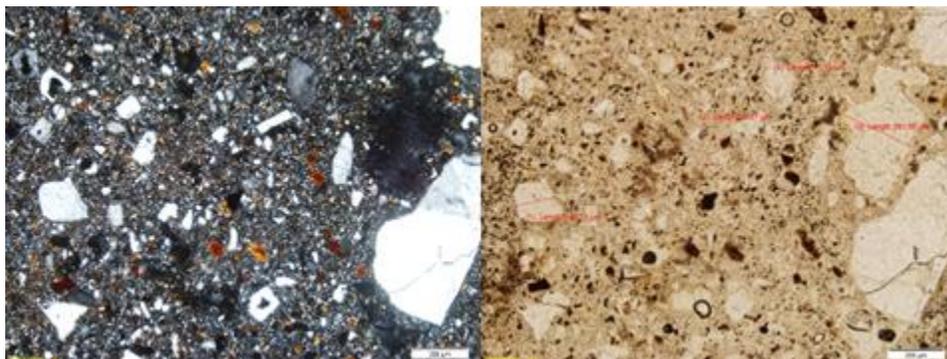
Microfotografía de cristal de feldespato potásico (sanidina) microfracturado con inclusiones de cristales de cuarzo. Izquierda XP objetivo 4x, derecha PP objetivo 4X.



Microfotografía de cristal de feldespato potásico (sanidina) microfracturado con núcleo vacío por alteración. Izquierda XP objetivo 4x, derecha PP objetivo 4X.

- **Plagioclasa:** se reconoce por el maclado de tipo polisintético y los bajos colores de interferencia de primer orden. Su presencia es subordinada en relación con la abundancia de cristales de sanidina. Algunas fracturas en este mineral están rellenas por vidrio volcánico producto de los eventos de fusión parcial. Se presentan en tamaños desde 4.4 mm hasta 0.04 mm.
- **Cuarzo:** presente por la forma fragmentaria de los fenocristales que se caracterizan por el color de birrefringencia en tonos bajos de primer orden y por la presencia de microfracturamientos. Se presenta en tamaños desde 0.4 mm hasta 0.008 mm.
- **Anfíbol (hornblenda):** ocurre como fenocristales con un moderado a fuerte pleocroísmo, debido posiblemente al contenido en titanio. Tiene algunas inclusiones de opacos posiblemente óxidos de hierro diseminados. Se presentan en tamaños desde 4.4 mm hasta 0.04 mm.
- **Óxidos de hierro:** se presenta en medio de las zonas con otros óxidos como hematita y magnetita en donde tiene un color rojizo anaranjado y sigue el contorno de minerales máficos como hornblenda.
- **Hematita:** encontrada en los planos cristalográficos de la magnetita, en forma alargada y con un pleocroísmo fuerte gris claro a oscuro. Los abundantes reflejos internos de color rojo la diferencian de la goethita.
- **Magnetita:** en esta muestra la magnetita se presenta en medio de los cristales de hematita, en donde tiene un color gris a café claro en luz reflejada. Casi todos los cristales están parcial o totalmente reemplazados por hematita.
- **Masa fundamental:** está conformada principalmente por vidrio volcánico y algunos microcristales, en una proporción de 70 % a 30 %. Sobre la parte de vidrio se localizan algunas arcillas de color pardo.
- **Arcillas:** se presentan diseminadas en medio de la muestra particularmente en la zona de la matriz donde adquieren un color café claro.

- **Circón:** caracterizado por la forma poligonal de los cristales, con frecuencia se encontrada como prismas bien desarrollados en cristales con un tamaño menor a 20 μm . Excepcionalmente se encuentran algunos cristales, que tienen una forma parcialmente redondeada, posiblemente cristales heredados.
- **Apatito:** presente en bajas cantidades. Se encuentra incluido en los cristales de plagioclasas, donde tiene una forma de barril y bajos colores de interferencia.
- **Plagioclasa:** reconocida por el maclado de tipo polisintético y los bajos colores de interferencia de primer orden. Su presencia es subordinada respecto a la abundancia de cristales de sanidina. Algunas fracturas en este mineral están rellenas de vidrio volcánico producto de los eventos de fusión parcial. Se presentan en tamaños desde 4.4 mm hasta 0.04 mm.
- **Cuarzo:** presente por la forma fragmentaria de los fenocristales que se caracterizan por el color de birrefringencia en tonos bajos de primer orden y la presencia de microfracturamientos. Se presentan en tamaños desde 0.4 mm hasta 0.008 mm.
- **Anfíbol (Hornblenda):** Ocurren como fenocristales con un moderado a fuerte pleocroísmo posiblemente debido al contenido en titanio. Presenta algunas inclusiones de opacos posiblemente óxidos de hierro diseminados. Se presentan en tamaños de 4.4 mm a 0.04 mm.
- **Óxidos de hierro:** se presenta en medio de las zonas con otros óxidos como hematita y magnetita, en donde tiene un color rojizo anaranjado y sigue el contorno de minerales máficos como hornblenda.
- **Hematita:** encontrada en los planos cristalográficos de la magnetita con forma alargada y un pleocroísmo fuerte gris claro a oscuro. Los abundantes reflejos internos de color rojo la diferencian de la goethita.
- **Magnetita:** en esta muestra la magnetita se presenta en medio de los cristales de hematita con un color gris a café claro en luz reflejada. Casi todos los cristales están parcial o totalmente reemplazados por hematita.
- **Matriz:** está conformada principalmente por vidrio volcánico y algunos microcristales, en una proporción de 70 % a 30 %. Sobre la parte de vidrio se localizan algunas arcillas con color pardo.
- **Arcillas:** están diseminadas en medio de la muestra, particularmente en la zona de la masa fundamental donde adquieren un color café claro.
- **Circón:** caracterizado por la forma poligonal de los cristales, con frecuencia encontrado como prismas bien desarrollados en cristales de tamaño menor a 20 μm . Excepcionalmente se encuentran algunos cristales los que se tienen una forma parcialmente redondeada, posiblemente cristales heredados.
- **Apatito:** presente en bajas cantidades y encontrado en forma de inclusión en los cristales de plagioclasas, donde tiene una forma de barril y bajos colores de interferencia.



Microfotografía detalle de masa fundamental con presencia de microcristales, óxidos de hierro y cristales de feldespato potásico fracturados y afectados por procesos de fusión parcial en el núcleo. Izquierda XP objetivo 10x, derecha PP objetivo 10X.

Muestra de roca volcánica, caracterizada por la predominancia de la masa fundamental por sobre los fenocristales. En la masa fundamental se identifica la abundancia del vidrio el cual sufre el proceso de

agilización. Algunos de los fenocristales son identificados como fragmentos, posiblemente formados en el proceso de tipo extrusivo.

- Composición mineralógica (% Vol.) – VGP-09

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Plagioclasa	3.6		3.6		
Cuarzo	1.1		1.1		
Sanidina	18.7	18.7			
Hornblenda	1.6			1.6	
Magnetita	1.1			1.1	
Minerales accesorios					
Apatito	0.3			0.3	
Circón	0.3			0.3	
Minerales de alteración					
Arcillas	1.9			1.9	
Óxidos de hierro	4.9			4.9	
Hematita	0.3			0.3	
Rutilo	0.8			0.8	
Porosidad	2.5			2.5	
Masa fundamental		Observaciones: presencia de alteración argílica			
Fracción criptocristalina	18.9				
Vidrio	44				
% de cristales	34.6	% de masa fundamental	62.9	% porosidad	2.5

Nota: Para el porcentaje (%) total de masa fundamental se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales.

Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): cuarzotraquita con alteración argílica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

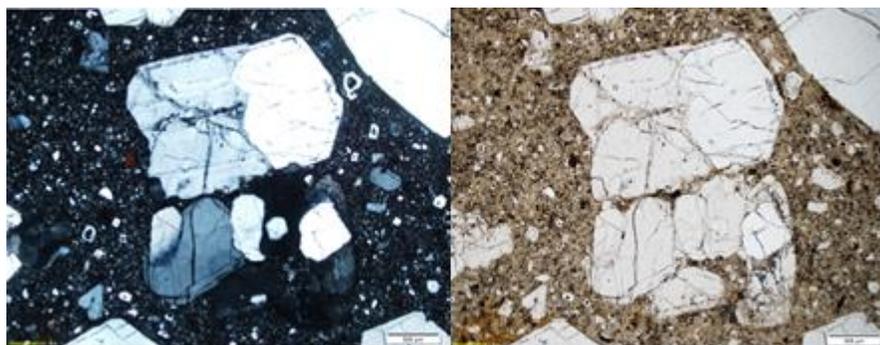
- Descripción petrográfica sector domo SE-Alto de los Godos, muestra VGP-08

Información general	
	Muestra: VGP-08
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 386
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: grueso 3-5 mm
<p>Descripción Macroscópica: Roca volcánica de color café claro con la presencia de fenocristales de plagioclasas y sanidina en medio de una masa fundamental moderadamente argilizada. Algunas zonas de color rojizo a anaranjado corresponden a la presencia de óxidos de hierro amorfos y esporádicamente a la ocurrencia de hematita. Zonas con porosidad se relacionan a fragmentos faltantes de fenocristales, debido a la naturaleza friable de la masa fundamental alterada.</p>	
Descripción microscópica	
<p>Textura general: porfirítica. Otras texturas o texturas especiales: texturas fragmentarias por la presencia de cristales de plagioclasas y sanidinas rotos, posiblemente por procesos de tipo eruptivo. Descripción de la masa fundamental: se encuentra conformada en gran parte por vidrio volcánico y microcristales de sanidina, plagioclasa y en menor proporción cuarzo. Presenta procesos de alteración hidrotermal relacionados con agilización.</p>	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Feldespato potásico (sanidina): presente con forma poligonal y disseminada en medio de la masa fundamental que se reconoce por la ocurrencia de maclado simple y bajos colores de interferencia. Generalmente forma agregados en compañía de cristales de plagioclasa. Ocasionalmente se reconocen zonas de exsolución peritica y zonación. Algunas fracturas dentro de los cristales presentan rellenos de vidrio volcánico. Con frecuencia son reconocidas inclusiones fluidas, posiblemente asociadas al proceso de fusión parcial. • Plagioclasa: identificada por la presencia de maclado polisintético y subordinada a la presencia de feldespato potásico. Generalmente forma agregados en compañía de la sanidina que se diferencia principalmente por el tipo de maclado. Al igual que la sanidina muestra algunas fracturas parcialmente rellenas por vidrio volcánico. • Cuarzo: son fragmentos de cristales que se reconocen, principalmente, como microcristales con formas anhedral a subredondeadas, posiblemente por los eventos relacionados con fusión parcial. • Anfíbol (hornblenda): tienen una forma anhedral fragmentaria, posiblemente, por los eventos eruptivos. Posee un pleocroísmo fuerte verde a café oscuro; patrones de clivaje a 60 o 120 grados, y colores de interferencia parcialmente enmascarados por el fuerte pleocroísmo. Algunos cristales son encontrados como inclusión en medio de fenocristales de plagioclasas y sanidinas. • Óxidos de hierro: se identificaron en sectores, particularmente, en la zona de la masa fundamental con un color rojizo anaranjado. También están asociados a la alteración de cristales de máficos como hornblenda. • Hematita: identificada en algunos planos cristalográficos en medio de la magnetita en donde se caracteriza por presentar una moderada a alta reflectividad y abundantes reflejos internos de color rojizo. 	

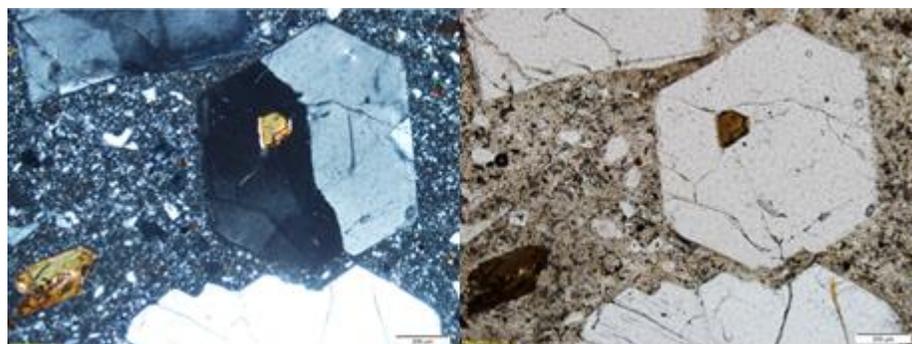
- **Magnetita:** se reconocen por el color gris pardo y sus características isotrópicas en nicoles cruzados. Generalmente se presenta alterada a hematita, en especial hacia los bordes de los cristales y en algunas microfracturas.
- **Masa fundamental:** es conformada en gran parte por microcristales de la misma de composición de los fenocristales anteriormente descritos, y por vidrio volcánico parcialmente transformado a arcillas. La proporción de microcristales y vidrio es de 35 % y 65 % respectivamente.
- **Arcillas:** asociada a la alteración de la masa fundamental de la roca, donde tiene una forma de pequeñas hojuelas con baja birrefringencia y dan el color ligeramente pardo a algunas zonas en la masa fundamental.
- **Circón:** observado a menara de inclusión en medio de los cristales de plagioclasas y sanidina, en donde tiene una forma de cristales bien desarrollados, con relieve alto y altos colores de interferencia de segundo orden.

Observaciones:

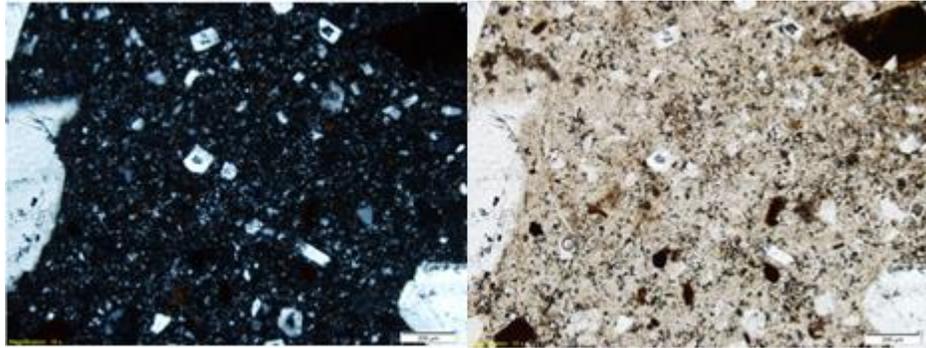
Muestra de roca volcánica con algunos fenocristales parcialmente asimilados y rotos por los eventos de asimilación parcial y de tipo eruptivo. Adicionalmente presenta una alteración de tipo argílica, la cual afecta principalmente la masa fundamental de la roca.



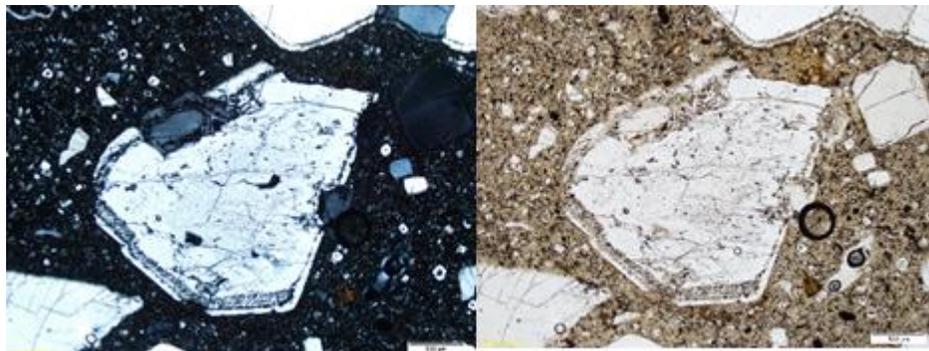
Microfotografía de cristal de sanidina en medio de la masa fundamental con fragmentos de microcristales; Izquierda XP objetivo 4x, derecha PP objetivo 4X.



Microfotografía de cristal de sanidina con inclusión de un cristal de anfíbol; Izquierda XP objetivo 10x, derecha PP objetivo 10X.



Microfotografía masa fundamental de microcristales de sanidina, presencia de óxidos de hierro; Izquierda XP objetivo 4x, derecha PP objetivo 4X.



Cristal de sanidina con borde alterado; Izquierda XP objetivo 10x, derecha PP objetivo 10X.

- Composición mineralógica (% Vol.) – VGP-08

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2-0.05 mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Minerales principales					
Plagioclasa	0.8		0.8		
Cuarzo	0.5		0.5		
Sanidina	13.2	13.2			
Hornblenda	3.9			3.9	
Magnetita	1.8			1.8	
Minerales accesorios					
Circón	0.3			0.3	
Minerales de alteración					
Arcillas	3.4			3.4	
Óxidos de hierro	9.8			9.8	
Hematita	0.3			0.3	
Porosidad	4.1			4.1	
Masa fundamental		Observaciones			
Fracción criptocristalina	21.5				
Vidrio	39.9				
% de cristales	34.5	% de masa fundamental	61.4	% porosidad	4.1

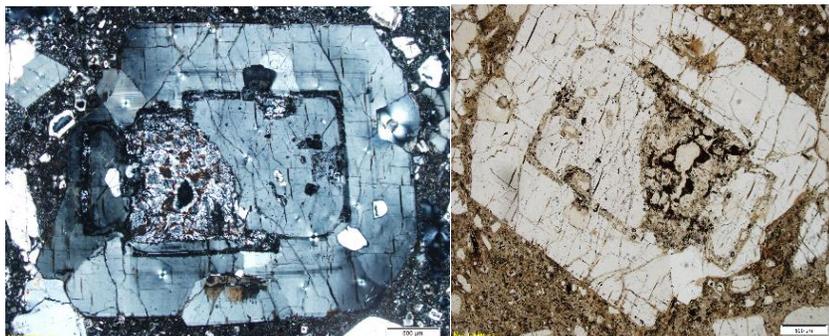
Nota: Para el porcentaje (%) total de masa fundamental se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales.

Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): traquita alcalina con alteración argílica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

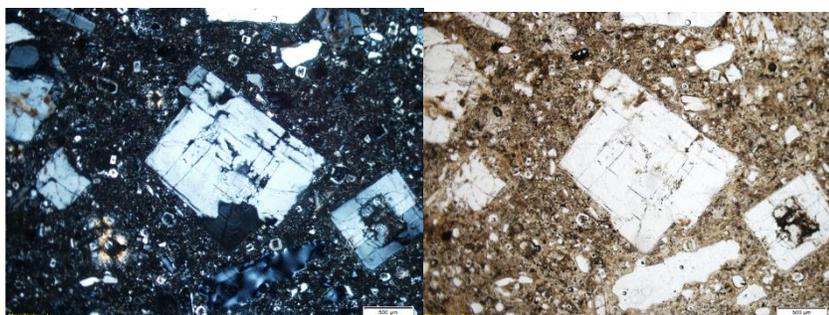
- Descripción petrográfica sector Quebrada Honda, muestra VGP-05

Información general	
	Muestra: VGP-05
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 386
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: grueso 3-5 mm
Descripción macroscópica: Roca volcánica de color gris claro con presencia de fenocristales de sanidinas y plagioclasas en medio de una masa fundamental con un leve proceso de agilización. Se reconocen además la presencia de óxidos de titanio y sulfuros los que se presentan diseminados y relacionados al proceso de alteración hidrotermal del tipo agilización. Los óxidos de hierro amorfos predominan en franjas hacia la parte inferior de la muestra. La porosidad móldica se relaciona a la ausencia de algunos fenocristales de sanidina y ocurrencia de microfracturamientos.	
Descripción microscópica	
Textura general: porfiritica. Otras texturas o texturas especiales: texturas de asimilación parcial de algunos fenocristales especialmente de plagioclasas y sanidinas. Máficos totalmente reemplazados por óxidos de hierro amorfos y óxidos de titanio como brookita. Descripción de la masa fundamental: reemplazamiento parcial por arcillas	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Feldespato potásico (sanidina): se presenta en feno y microcristal, donde se caracteriza por tener bajos colores de interferencia, maclado simple y ausencia de maclado polisintético. Muestra evidencias de procesos de fusión parcial, reconocida por la formación e introducción de vidrio volcánico. Se presenta en tamaños de 14 mm a 0.04 mm. • Plagioclasa: diferenciada por el maclado de tipo polisintético y la ocurrencia de zonación en los fenocristales. Con frecuencia en este tipo de cristales se reconocen inclusiones de cuarzo, además otros cristales de plagioclasas. Como en la sanidina, se reconocen fracturas rellenas de vidrio volcánico. Ocasionalmente, en algunas de estas fracturas se forman arcillas producto de los eventos de agilización • Cuarzo: presente como un fragmento parcialmente asimilado por el proceso de alteración hidrotermal que se reconoce por el bajo color de interferencia y la abundancia de bahías en los bordes de los cristales. • Óxidos de hierro: presentes en algunas zonas de alteración de los cristales de máficos, acompañados de brookita. Se caracterizan por su color rojizo intenso. • Brookita: se identificó por la forma alargada de los cristales, normalmente localizados en zonas de alteración total de los cristales de máficos ricos en titanio, posiblemente hornblendas. Sus características ópticas distintivas son el color gris claro de los cristales y la abundancia de reflejos internos de color amarillo en luz reflejada. • Pirita: se identifica por el color amarillo de los cristales en luz reflejada, normalmente se encuentra incluida en cristales de plagioclasa. • Masa fundamental: está conformada en gran parte por vidrio volcánico, en un 70 % y 30 % de microcristales de plagioclasa, sanidina y cuarzos. Es alterada parcialmente por las arcillas que tienen bajos colores de interferencia. • 	

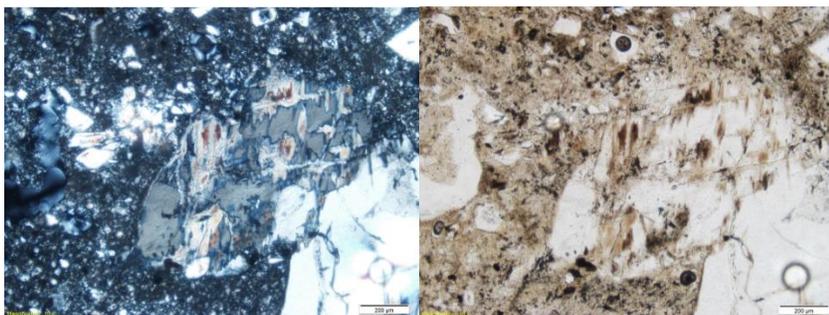
- **Arcillas:** son encontradas en algunas zonas en la masa fundamental y en zonas de microfracturamientos, donde tienen un hábito fibroso posiblemente relacionado con la presencia de mayor cristalización en dichas arcillas.
- **Circón:** se encuentra incluido en medio de los cristales de plagioclasas, donde tiene forma de prismática con doble terminación.
- **Apatito:** presente en bajo porcentaje e incluido en los fenocristales de plagioclasas y sanidinas, donde se reconoce por los bajos colores de interferencia y forma de barril.



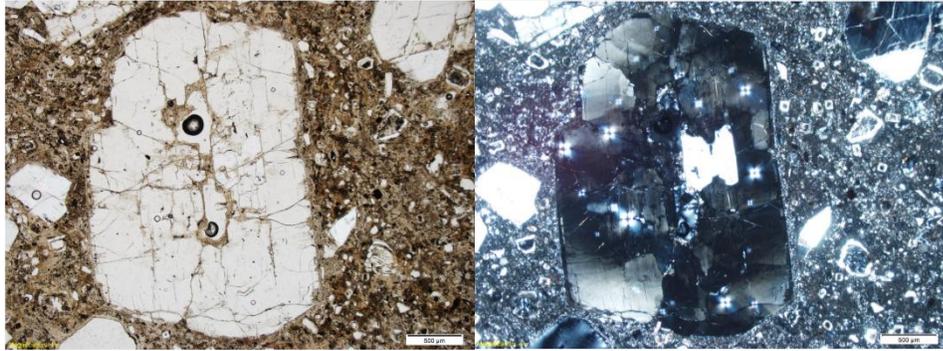
Microfotografía XPL de cristal de sanidina con zonamiento y alteración parcial en el núcleo, con inclusión de cristales de diferente composición. XPL Izquierda 10x y derecha PPL 10x.



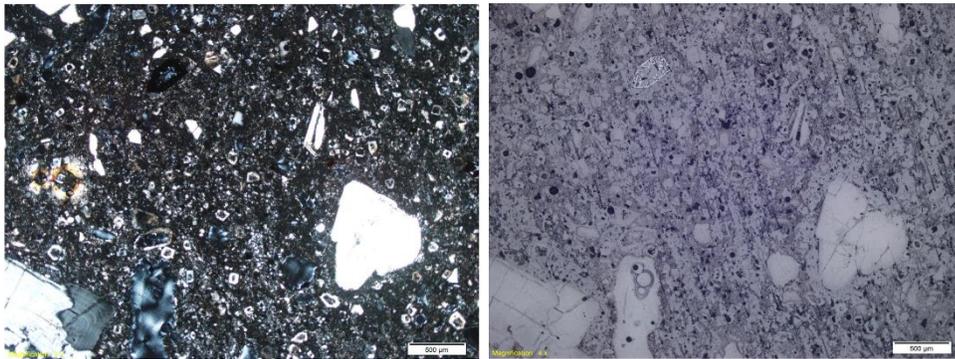
Microfotografía XPL de cristal de sanidina con zonamiento y microfracturas, alrededor masa fundamental de microcristales. XPL Izquierda 10x y derecha PPL 10x.



Microfotografía cristal alterado, presencia de óxidos de hierro. XPL Izquierda 4x y derecha PPL 4x.



Microfotografía cristal de sanidina, microfracturas, pérdida del núcleo del cristal. XPL Izquierda 10x y derecha PPL10x.



Microfotografía masa fundamental microcristalina, y presencia de opacos. XPL izquierda 4x y derecha luz reflejada 4x.

- Composición mineralógica (% Vol.) – VGP-05

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Minerales principales					
Plagioclasa	5.8		5.8		
Cuarzo	0.7		0.7		
Sanidina	20.3	20.3			
Minerales accesorios					
Apatito	0.2			0.2	
Circón	0.7			0.7	
Minerales de alteración					
Arcillas	4.8			4.8	
Óxidos de hierro	1.2			1.2	
Brookita	3.4			3.4	
Pirita	0.2			0.2	
Porosidad	4.6			4.6	
Masa fundamental		Observaciones			
Fracción criptocristalina	17.4	Presencia de alteración argílica			
Vidrio	40.5				
% de cristales	37.5	% de masa fundamental	57.9	% porosidad	4.6

Nota: Para el porcentaje (%) total de masa fundamental se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales

Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): traquita con alteración argílica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

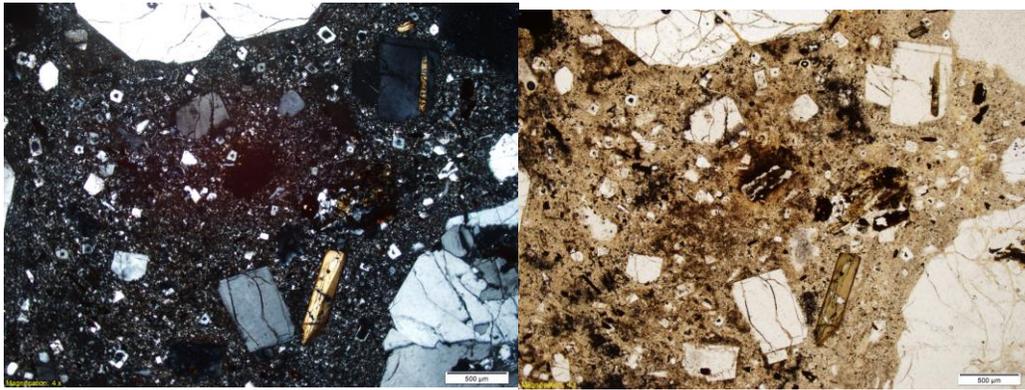
- Descripción petrográfica sector domo SE-Alto de los Godos, muestra VGP-07

Información general	
	Muestra: VGP-07
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 338
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: grueso 3-5 mm
Descripción Macroscópica:	
Roca volcánica de color café claro debido a la presencia de fenocristales de sanidina y plagioclasas en medio de una masa fundamental agilizada. En la muestra se reconocen hornblendas de color oscuro y los anfíboles alterados con un halo anaranjado debido a la presencia de óxidos de hierro amorfos. Cristales de magnetita se reemplazan por hematita en los puntos de color rojizo distribuidos por toda la muestra. La porosidad se relaciona a moldes de fenocristales destruidos por el proceso de alteración hidrotermal.	
Descripción microscópica:	
Textura general: porfirítica.	
Otras texturas o texturas especiales: texturas fragmentarias por la naturaleza efusiva de la roca, y de reemplazamiento selectivo en la masa fundamental, donde se transforma parcialmente a arcillas.	
Descripción de la masa fundamental: en gran parte es integrada por vidrio volcánico, que se transforma en arcillas, y por microcristales parcialmente destruidos por eventos de fusión parcial.	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos potásico (sanidina): presente en toda la muestra, en donde los fenocristales son poligonales con la ocurrencia frecuente de exsoluciones de tipo peritico. Con frecuencia se observan algunas microfracturas que se encuentran parcialmente rellenas de vidrio volcánico debido a los eventos de fusión parcial. Algunas esferulitas integradas, en su mayoría, por vidrio volcánico se reconocen en medio de las fracturas. Inclusiones de circones son observadas con frecuencia. • Plagioclasas: subordinada a la presencia de sanidina que se diferencia por el maclado de tipo polisintético y, ocasionalmente, por la ocurrencia en algunos cristales con zonación. • Anfíbol (hornblenda): gran parte de los fenocristales se encuentran en forma poligonal romboédrica con un fuerte pleocroísmo verde claro a café oscuro y moderados colores de interferencia enmascarados por el fuerte pleocroísmo. Generalmente tienen bordes con óxidos amorfos, posiblemente, por los procesos de ascenso a superficie. • Óxidos de hierro: se presentan de color anaranjado, afectando a algunos cristales de máficos como hornblendas. • Hematita: relacionada con la alteración de la magnetita con color gris claro intenso y moderada anisotropía en luz reflejada. • Magnetita: reconocida por el color gris a café claro de los cristales, en luz reflejada. En los bordes y algunas fracturas, la magnetita es reemplazada por hematita. • Masa fundamental: está conformada en un 60 % por vidrio volcánico y 40 % por microcristales sanidina y plagioclasas. En algunos sectores el vidrio llega a ocupar casi el 90 % de espacio en la masa fundamental. • Vidrio volcánico: se identifica por el color café anaranjado del vidrio, comúnmente, con un comportamiento de tipo isotrópico en nicols cruzados. Microfracturamientos son comúnmente rellenos por este tipo de vidrio. 	

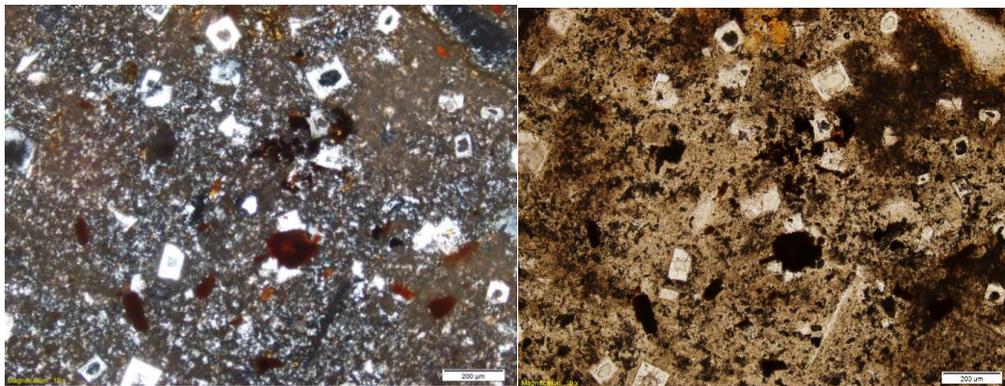
- **Arcillas:** encontrada principalmente afectando a la masa fundamental y otorgando a la muestra del color café claro distintivo de la alteración argílica.
- **Circón:** se presenta incluida en los cristales de plagioclasas, en forma prismática, bien definida y con colores de interferencia altos de segundo orden.
- **Apatito:** reconocido por la forma en barriles de los cristales que presentan una extinción recta con birrefringencia baja de primer orden.

Observaciones:

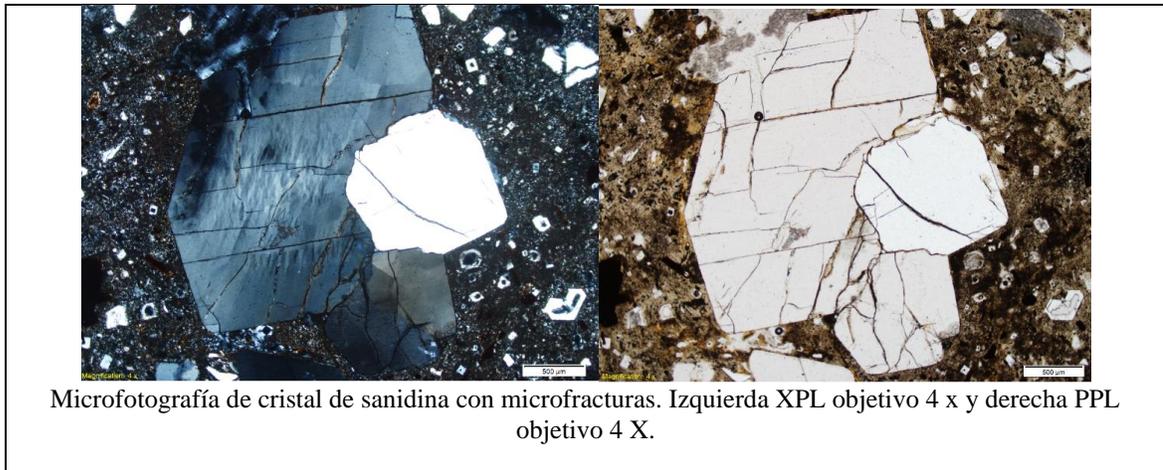
Muestra de roca volcánica con fenocristales de sanidina y en menor proporción plagioclasas, en medio de una matriz dominada por la presencia de vidrio volcánico que se diferencia por el color anaranjado.



Microfotografía matriz de microcristales de sanidina disueltos en el núcleo, cristales de anfíboles (hornblenda), óxidos de hierro alterando la masa fundamental. Izquierda XPL objetivo 10 x y derecha PPL objetivo 10 X



Microfotografía matriz de microcristales de sanidina con núcleos alterados ahora vacíos, presencia de óxidos de hierro. Izquierda XPL objetivo 4 x y derecha PPL objetivo 4 X.



- Composición mineralógica (% Vol.) – VGP-07

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Minerales principales					
Plagioclasa	1.2		1.2		
Cuarzo	1.2		1.2		
Sanidina	14.8	14.8			
Hornblenda	1.5			1.5	
Magnetita	2.4			2.4	
Vidrio Volcánico	2.1			2.1	
Minerales accesorios					
Apatito	0.3			0.3	
Circón	0.6			0.6	
Minerales de alteración					
Arcillas	3.0			3.0	
Óxidos de hierro	6.8			6.8	
Hematita	0.3			0.3	
Porosidad	2.4			2.4	
Masa fundamental		Observaciones			
Fracción criptocristalina	25.4	Presencia de alteración argílica			
Vidrio	38.2				
% de cristales	34	% de masa fundamental	63.6	% porosidad	2.4

Nota: para el porcentaje (%) total de masa fundamental se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales

Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): traquita cuarzo alcalina con alteración argílica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal.

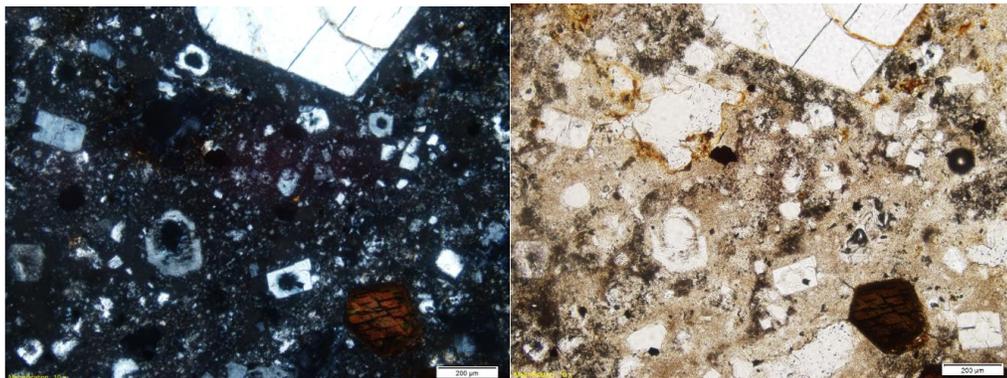
- Descripción petrográfica sector domo SE-Alto de los Godos, muestra: VGP-06

Información general	
	Muestra: VGP-06
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 354
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: gruesa 3-5 mm
<p>Descripción macroscópica: Roca volcánica de color café claro reconocida por los fenocristales de sanidina y plagioclasas, las cuales presentan zonación reconocida por la coloración ligeramente más oscura. La masa fundamental es encontrada afectada por agilización a partir de la alteración del vidrio volcánico. Gran parte de los óxidos primarios se encuentran alterados a hematita identificada por la coloración ligeramente más rojiza y a óxidos de hierro amorfos. La porosidad se asocia principalmente a la presencia de microfracturamientos en fenocristales y en el contacto entre estos y la masa fundamental.</p>	
Descripción microscópica	
<p>Textura general: porfirítica. Otras texturas o texturas especiales: texturas de fusión parcial de los cristales de plagioclasa y sanidina con la formación de vidrio volcánico. Reemplazamiento selectivo mayormente de máficos y óxidos primarios como magnetitas las que se transforman a óxidos amorfos y hematita. Descripción de la masa fundamental: la masa fundamental se presenta en gran parte conformada por vidrio volcánico y en menor proporción por microcristales. Particularmente el vidrio volcánico muestra efectos de reemplazamiento a arcillas lo que define la alteración argílica.</p>	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Plagioclasa: presenta indicios de estar parcialmente fundida, particularmente en algunas microfracturas en donde se reconoce vidrio volcánico. Un rasgo característico en estas muestras es la presencia de inclusiones de plagioclasa dentro de fenocristales de la misma composición, pero con mayor tamaño. Ópticamente identificada por la presencia del típico maclado polisintético y los bajos colores de interferencia. Presenta generalmente inclusiones de circón. • Feldespatos potásico (sanidina): diferenciada por la presencia de maclado de tipo simple y bajos colores de interferencia de los fenocristales. Al igual que la plagioclasa presenta zonación, pero su forma llega a ser poligonal mejor definida. En los cristales más grandes es posible observar las clásicas segregaciones de tipo peritítico, características de este tipo de feldespatos. Solo en pocos cristales se observan indicios de fusión parcial • Cuarzo: en esta muestra, el cuarzo se presenta con una forma poligonal que comúnmente es destruida por fracturamientos o la formación de bahías producto del proceso de fusión parcial. Particularmente abundante en microcristal con una forma mejor definida que los fragmentos como fenocristales. Algunas fracturas dentro de este cristal son rellenas por óxidos de hierro. • Anfíbol (hornblenda): observada con un fuerte pleocroísmo de café claro a oscuro, lo que puede estar relacionado a la presencia de titanio. Muestra patrones de exfoliación a 60° y 120°, característicos de este tipo de minerales. Con frecuencia presenta halos de óxidos de hierro que se acomodan en el borde del cristal y en algunas microfracturas. • Óxidos de hierro: reconocidos en algunas fracturas en medio de la masa fundamental de la muestra y, particularmente, provenientes de la descomposición de óxidos primarios como magnetita. También encontrados en el reemplazamiento de minerales máficos, de los que frecuentemente se observa solo el armazón. En estos sectores los óxidos tienen un mejor pulido, sugiriendo la ocurrencia de variedades cristalinas como goethita o hematita. 	

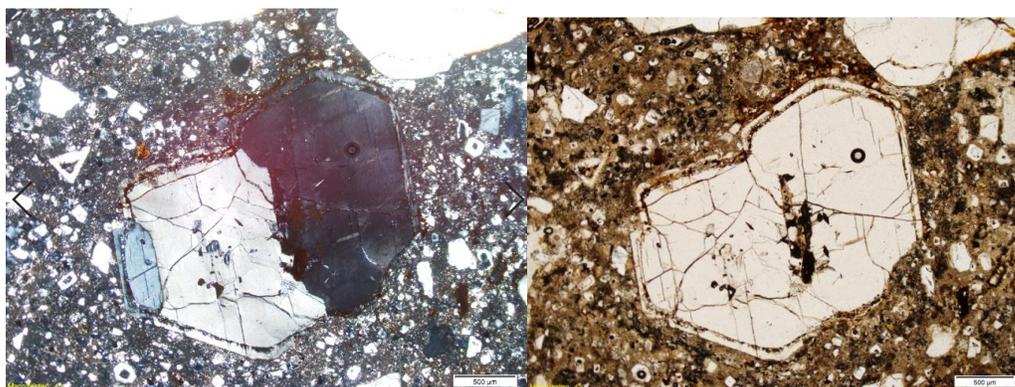
- **Hematita:** se presenta reemplazando los cristales de magnetitas, de las que se diferencia por la presencia de un moderado pleocroísmo, débil anisotropía y abundantes reflejos internos de color rojo.
- **Magnetita:** reemplazada parcialmente por la hematita posiblemente por los procesos de alteración hidrotermal. Dicho proceso se realiza siguiendo algunos planos cristalográficos octaédricos en la magnetita. El color gris ligeramente pardo y el comportamiento isotrópico en luz reflejada son sus características ópticas distintivas.
- **Masa fundamental:** integrada por microcristales en un 40 % y en un 60 % por vidrio volcánico parcialmente reemplazado por arcillas y óxidos de hierro amorfos.
- **Zeolitas:** se caracterizan por presentar formas poligonales similares a hexágonos y tener bajos colores de interferencia de primer orden. Crecen al interior de cristales de plagioclasas o sanidinas acompañadas por arcillas y vidrio volcánico.
- **Arcillas:** identificada en la masa fundamental y particularmente reemplazando el vidrio volcánico. Ópticamente se reconoce por la aparición de colores de interferencia bajos de primer orden, en medio del vidrio isotrópico.
- **Circón:** se presenta incluida en los fenocristales de plagioclasas, en forma prismática con doble terminación; características de las variedades volcánicas relativamente jóvenes.
- **Apatito:** al igual que los circones, los apatitos son encontrados incluidos en las plagioclasas. Se diferencian particularmente por la forma de los cristales a manera de pequeños barriles, con bajos colores de interferencia de primer orden.



Microfotografía XPL de cristales de sanidina con microfracturamientos rellenos por vidrio volcánico;
Microfotografía PPL acercamiento a las zonas con vidrio donde se reconocen zeolitas.



Microfotografía masa fundamental de micro cristales de sanidina.



Microfotografía cristal de sanidina con borde de alteración, inclusiones de cristales de plagioclasa

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Minerales principales					
Plagioclasa	2.8		2.8		
Cuarzo	2.5		2.5		
Sanidina	22.9	22.9			
Hornblenda	1.1		1.1		
Biotita	0.5		0.5		
Magnetita	2.5		2.5		
Minerales accesorios					
Apatito	0.3			0.3	
Circón	0.3			0.3	
Minerales de alteración					
Arcillas	4.2			4.2	
Óxidos de hierro	7.9			7.9	
Hematita	0.3			0.3	
Zeolitas	0.8			0.8	
Porosidad	2.5			2.5	
Masa fundamental		Observaciones			
Fracción criptocristalina	20.7	Presencia de alteración argílica			
Vidrio	31.0				
% de cristales	45.8	% de masa fundamental	51.7	% porosidad	2.5

Nota: Para el porcentaje (%) total de masa fundamental se suman el % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales

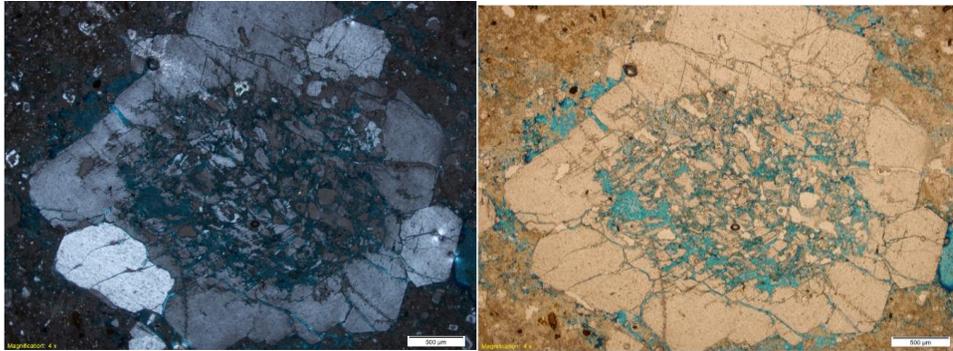
Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): Cuarzotraquita con alteración argílica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

- Descripción petrográfica sector cantera ALFAGRES - Alto de los Godos, muestra VGP-02

Información general	
	Muestra: VGP-02
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 368
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: gruesa 3-5 mm
<p>Descripción macroscópica: Roca volcánica de color café claro, debido a la presencia de arcillas en medio de la masa fundamental que contiene fenocristales de plagioclasas, sanidina y cuarzo. se estima que la muestra tiene una alteración argílica por la presencia de minerales arcillosos. La muestra de mano se presenta friable y se correlaciona con el alto porcentaje de porosidad observado.</p>	
Descripción microscópica	
<p>Textura general: porfiritica Otras texturas o texturas especiales: brechoide, con presencia de algunos fragmentos de fenocristales rotos por el evento eruptivo. Reemplazamiento selectivo de máficos a óxidos de hierro. Descripción de la masa fundamental: se presenta parcialmente meteorizada, se observa con abundante porosidad rellena por la resina de color. Particularmente los límites de los fenocristales son encontrados con abundante microfracturamiento que, también, se rellena por resina de color.</p>	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Plagioclasa: encontrada, en gran parte, como microcristales con abundante microfracturamiento, que aún conservan el típico maclado polisintético y los bajos colores de interferencia. Particularmente en los microcristales se observan algunos efectos de fusión parcial, hacia el centro de los cristales en donde estos son transformados a vidrio. Algunos fenocristales también evidencian procesos de recristalización a lo largo de los microfracturamientos. • Cuarzo: está presente en la muestra en bajas cantidades, con forma angular a subangular. Fracturado y en algunos bordes muestra indicios de fusión parcial. • Anfíbol (hornblenda): estos fenocristales están casi completamente reemplazados a óxidos de hierro, sin embargo, hacia el centro de los cristales se reconocen algunos fragmentos con pleocroísmo. Generalmente este mismo pleocroísmo enmascara los colores de interferencia en estos cristales. Ocasionalmente hay algunos cristales que muestran un tipo de maclado simple. Se encuentran inclusiones de hornblenda en algunos fenocristales de plagioclasas. • Feldespato potásico (sanidina): se diferencia de las plagioclasas por las presencia de exsoluciones de tipo peritico, aunque tienen los mismos colores de interferencia bajos de primer orden. Al igual que otros fenocristales está fracturado y con efectos de fusión parcial en zonas aledañas a microfracturamientos. • Óxidos de hierro: estos cristales so amorfos y se encuentran rodeando a algunos fenocristales de hornblendas en texturas de tipo móldico, en donde tienen un color rojizo a anaranjado. • Masa fundamental: se integra por microcristales y vidrio volcánico de color gris claro. Otra de las características particulares de este componente es el abundante óxido de hierro diseminado. 	

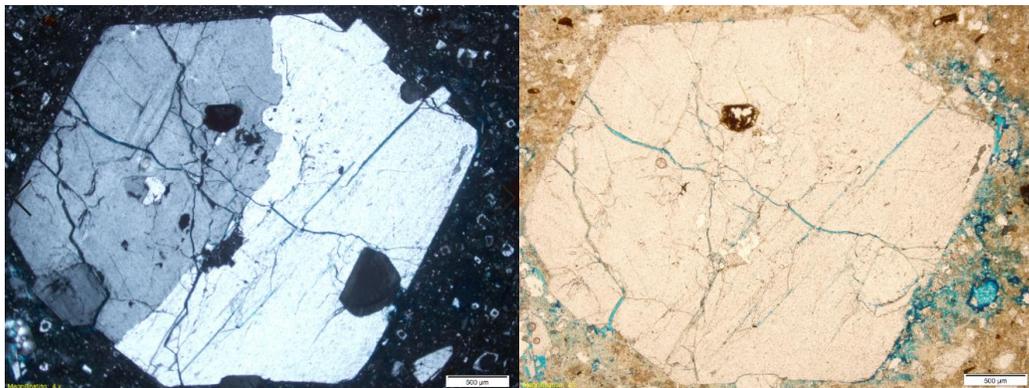
- **Arcillas:** tienen la propiedad de estar bien cristalizadas formando generalmente libros emplazados en medio de la masa fundamental. Los colores de interferencia son intermedios de segundo orden. Por su tamaño parecen ser el producto de eventos hidrotermales.
- **Circón:** se presentan comúnmente incluido en medio de las plagioclasas, con forma subhedral, extinción recta y colores de interferencia moderados de segundo orden.
- **Apatito:** estos cristales están presentes incluidos en las hornblendas con forma de barriles, extinción recta y colores de interferencia bajos de primer orden.

Observaciones:

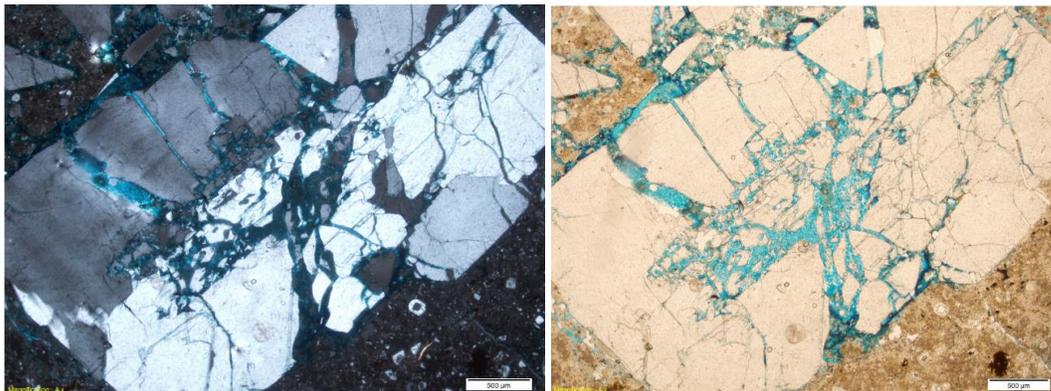


Muestra afectada por la alteración de tipo argílico, el que se representa por la presencia de arcillas, las cuales llegan a formar libros mostrando buena cristalización.

Microfotografía cristal de sanidina alterado en núcleo y borde dejando espacios vacíos, asociado a porosidad secundaria.



Microfotografía cristal de sanidina fracturado, con óxidos de hierro e inclusiones de cristales de diferente composición.



Microfotografía cristal de sanidina fracturado.

- Composición mineralógica (% Vol.) VGP-02

Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)
Minerales principales				
Plagioclasa	12,0		12,0	
Cuarzo	0,5		0,5	
Sanidina	9,2		9,2	
Hornblenda	1,4		1,4	
Minerales accesorios				
Apatito	0,3			0,3
Circón	0,3			0,3
Minerales de alteración				
Arcillas	1,6			1,6
Óxidos de hierro	7,1			7,1
POROSIDAD	11,4			11,4
Masa fundamental		Observaciones		
Masa fundamental	56,3	Presencia de alteración argilica		
% de cristales	32,3	% de masa fundamental	56,3	% de vesículas: 11,4

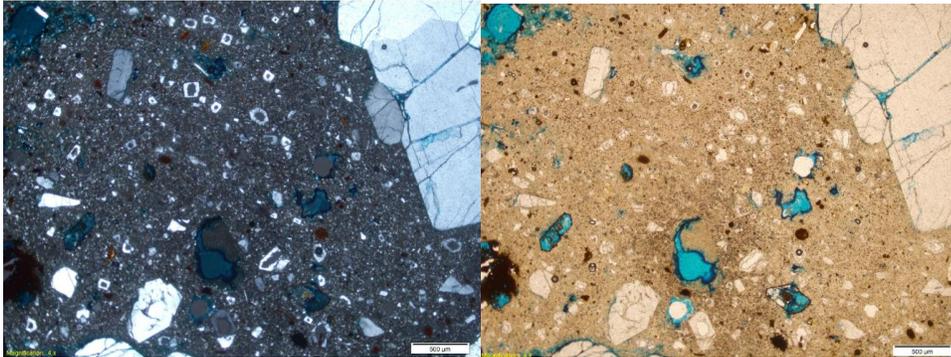
Nota: para el porcentaje (%) total de masa fundamental se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales

Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): latita con alteración argilica (clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

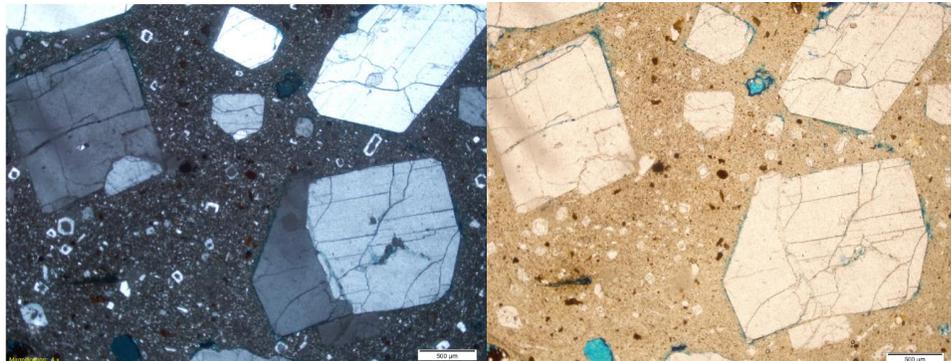
- Descripción petrográfica sector cantera ALFAGRES-Alto de los Godos

Información general	
	Muestra: VGP-04
	Fecha de recolección de la muestra: 28/04/18
	Fecha de análisis petrográficos: 02/05/18
	Número conteo de puntos: 404
	Grado de cristalinidad: hipocristalina
	Tamaño relativo: porfídica
	Tamaño absoluto: gruesa 3-5 mm
<p>Descripción macroscópica: Roca volcánica de color café claro, debido a la presencia de alteraciones hidrotermales, relacionadas con argilización. Se identifican algunos de los cristales de plagioclasas, sanidina y cuarzos. Los ferromagnesianos están casi totalmente reemplazados, sin embargo, se reconocen algunas zonas moldicas que individualizan a los cristales de anfíboles y piroxenos. Algunas zonas porosas se reconocen por las zonas impregnadas de azul en algunos sectores de la muestra.</p>	
Descripción microscópica	
<p>Textura general: porfirítica Otras texturas o texturas especiales: localmente se distinguen formas fragmentarias, en donde algunos de estos fenocristales están fracturados. Descripción de la masa fundamental: se caracteriza por presentar microcristales de plagioclasas y sanidinas que tienen una forma sub a euhedral, frecuentemente presentan efectos de fusión parcial hacia el centro del cristal, con la formación de vidrio.</p>	
Descripción microscópica de minerales	
<ul style="list-style-type: none"> • Plagioclasa: junto con la sanidina son los fenocristales que más abundan en esta muestra. Está diferenciada por la presencia de maclado polisintético y bajos colores de interferencia. Forma ocasionalmente texturas de tipo glomeroporfiriticas en compañía de los cristales de sanidina. • Cuarzo: es encontrado principalmente como fragmento angular con una extinción uniforme y colores de interferencia bajos de primer orden. Ocasionalmente, se presenta con efectos de fusión parcial, en algunos bordes o en algunas microfracturas. • Anfíbol: solo se distinguen por la forma poligonal de seis lados de los cristales, y su forma móldica, reemplazado óxidos de hierro y arcillas. • Piroxenos: de este tipo de minerales solamente se reconocen los moldes de cristales que tienen formas poligonales de ocho lados, al igual que en los anfíboles frecuentemente con alteración a arcillas y óxidos de hierro. • Feldespato potásico (sanidina): este fenocristal se reconoce, principalmente, por las exsoluciones de tipo peritico, en medio de cristales con bajos colores de interferencia en tonos grises. Con frecuencia presenta algunos efectos de fusión parcial, especialmente hacia el centro del cristal. Algunos cristales muestran maclado simple, particularmente cuando están en la forma de microcristales. Normalmente rodean gran parte de los fenocristales de plagioclasas. • Óxidos de hierro: se encuentran diseminados en medio de la masa fundamental, afectando con frecuencia a los minerales opacos como máficos; en donde adopta junto a las arcillas, una forma móldica. • Masa fundamental: es integrada, en gran parte, por vidrio volcánico, algunos microcristales de plagioclasa y sanidina diseminadas. Ocasionalmente se reemplaza por arcillas y óxidos de hierro diseminados. 	

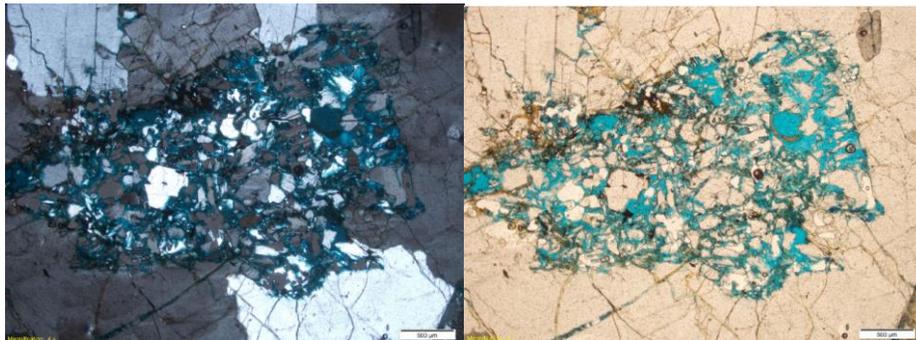
- **Clasto:** se encuentran como fragmentos reemplazados a arcillas, posiblemente derivados de procesos eruptivos previos. Solamente son reconocidos minerales arcillosos y clastos de cuarzo con tamaño limo como constituyentes de estos clastos.
- **Arcillas:** se presentan diseminadas afectando a la masa fundamental, donde se reconocen por tener forma de pequeñas escamas. También se encuentran afectando a algunos cristales de máficos.
- **Circón:** estos cristales se encuentran incluidos en medio de los fenocristales de plagioclasas con forma prismática y, con frecuencia, forma sub a eudedral. Algunos de estos cristales están fracturados.
- **Apatito:** son cristales incluidos en medio de los cristales de plagioclasas. Se diferencian de las inclusiones de circones por sus bajos colores de interferencia.



Microfotografía masa fundamental microcristalina, anfíboles y porosidad secundaria identificada por tinción azul. Izquierda XPL objetivo 4 x y derecha PPL objetivo 4 X.



Microfotografía fenocristales de feldespato potásico, en formas euhedrales en masa fundamental microcristalina. Izquierda XPL objetivo 4 x y derecha PPL objetivo 4 X.



Microfotografía detalle alteración de núcleo de cristal feldespato. Izquierda XPL objetivo 4 x y derecha PPL objetivo 4 X.

- Composición mineralógica (% Vol.) – VGP-04

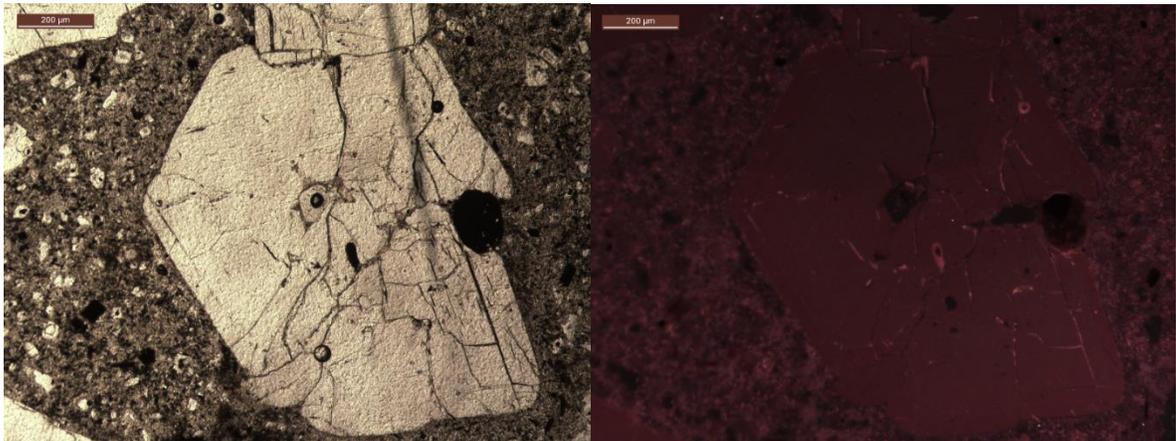
Componentes	Total en roca (%)	Fenocristal (≥ 2 mm)	Microfenocristal (2 – 0,5mm)	Microcristal (< 0,5mm)	
Minerales principales					
Plagioclasa	7,2		7,2		
Cuarzo	0,5		0,5		
Sanidina	20,5		20,5		
Hornblenda	0,2		0,2		
Piroxenos	0,2		0,2		
Clastos	0,5		0,5		
Minerales accesorios					
Apatito	0,2			0,2	
Circón	0,5			0,5	
Minerales de alteración					
Arcillas	2,0			2,0	
Óxidos de hierro	5,0			5,0	
Porosidad	6,2			6,2	
Masa fundamental		Observaciones			
Masa fundamental	56,9	Presencia de alteración argílica			
% de cristales	36,9	% de masa fundamental	56,9	% de vesículas	6,2

Nota: para el porcentaje (%) total de matriz se han de sumar % de fracción criptocristalina + % de vidrio + % microcristales. Para el porcentaje (%) total de cristales se han de sumar el % de fenocristales + % de microfenocristales.

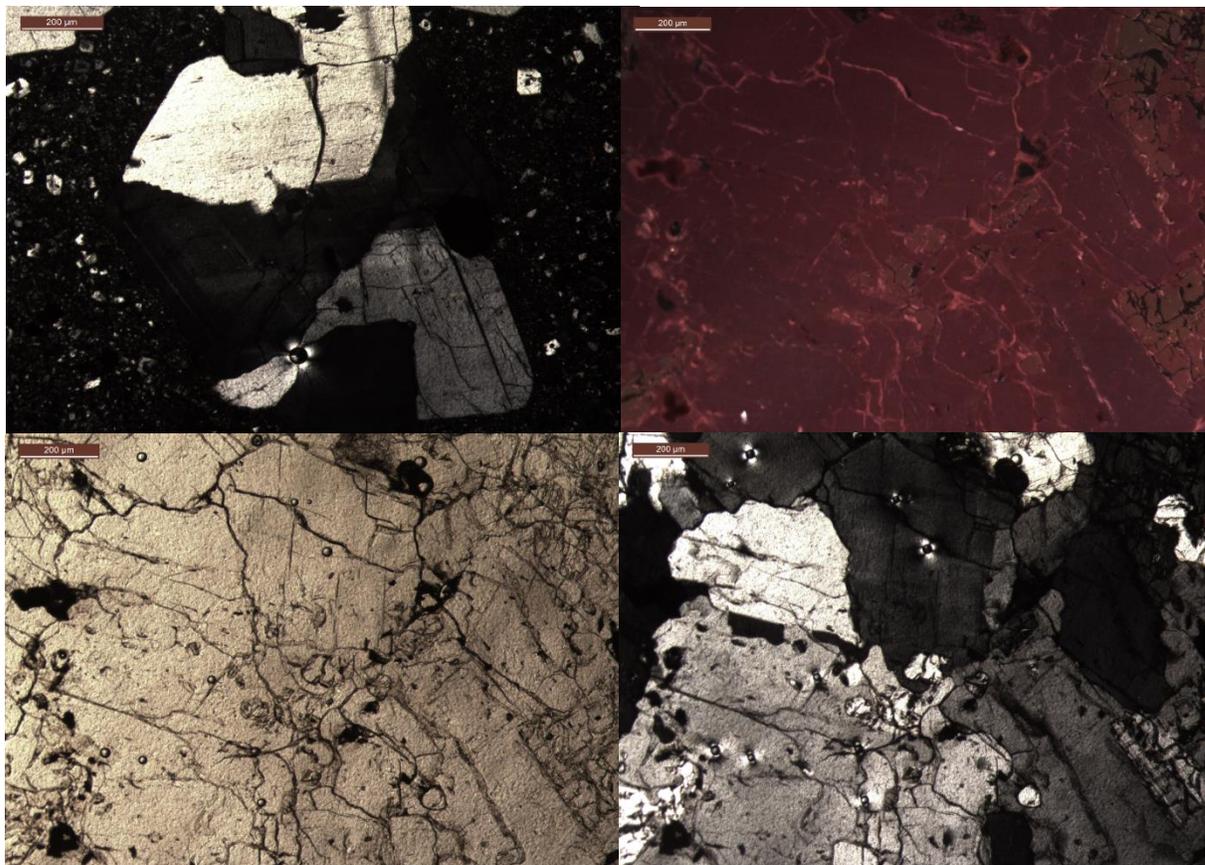
Clasificación de la roca (basada en Streckeisen, 1978): traquita con alteración argílica (Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

B. Anexo: catoluminiscencia

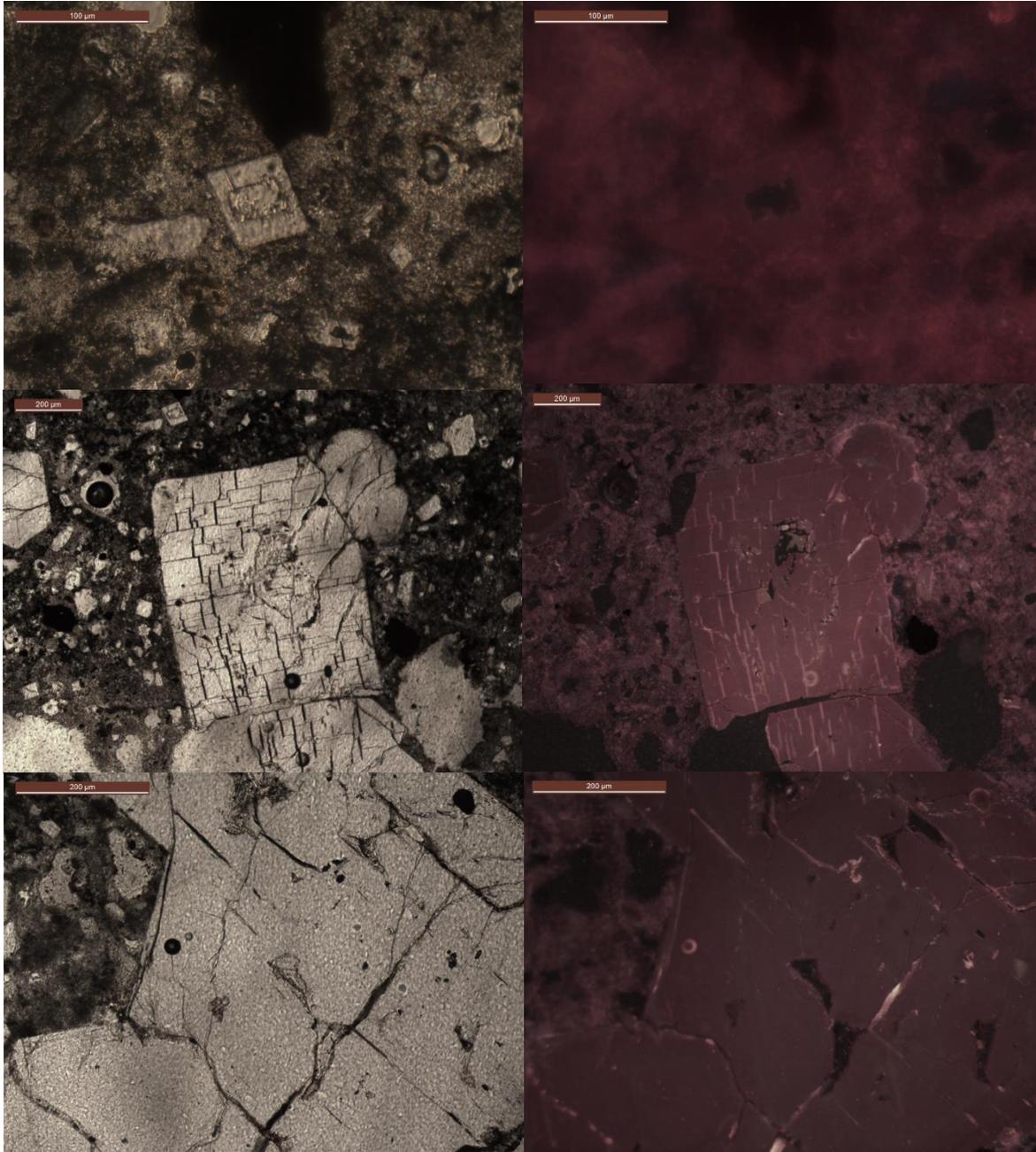
- Imágenes catoluminiscencia muestra VGP-08 Domo SE.

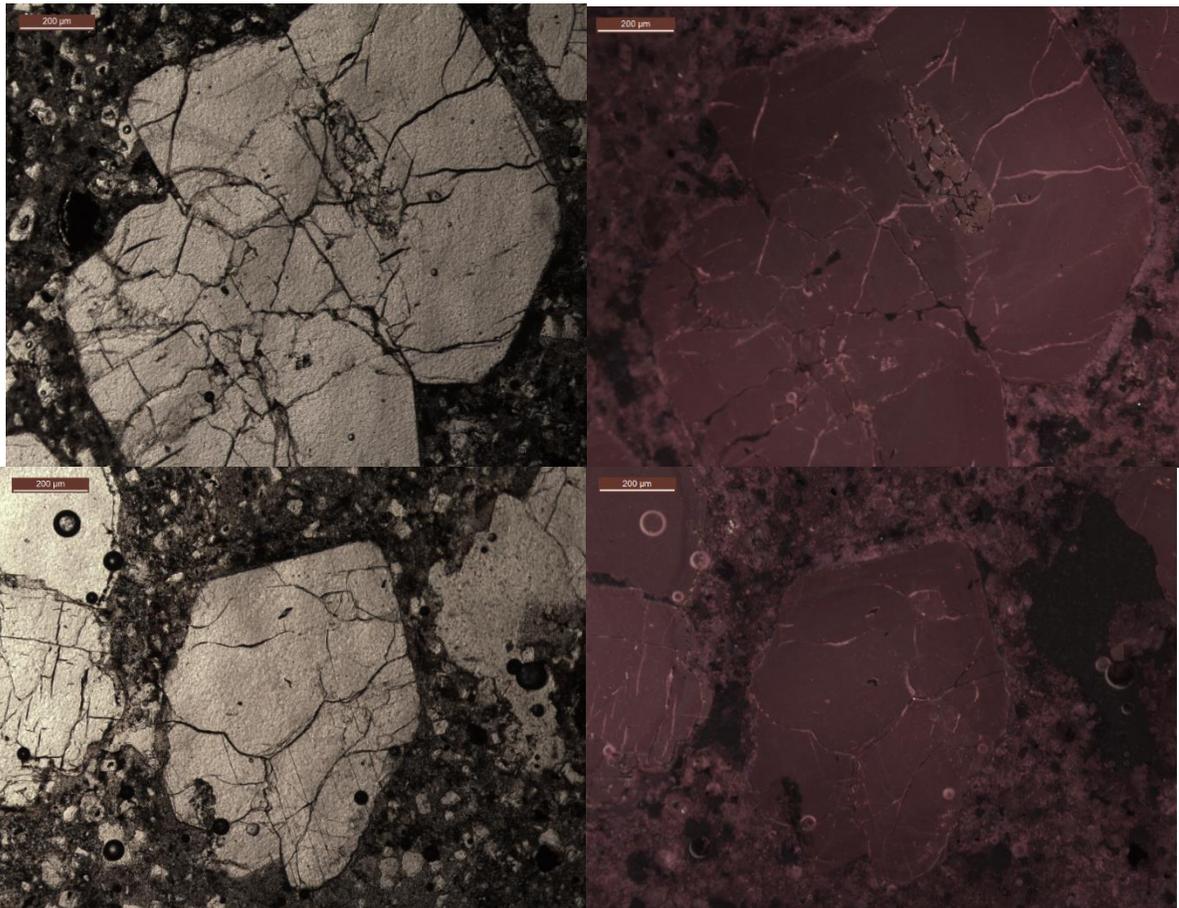
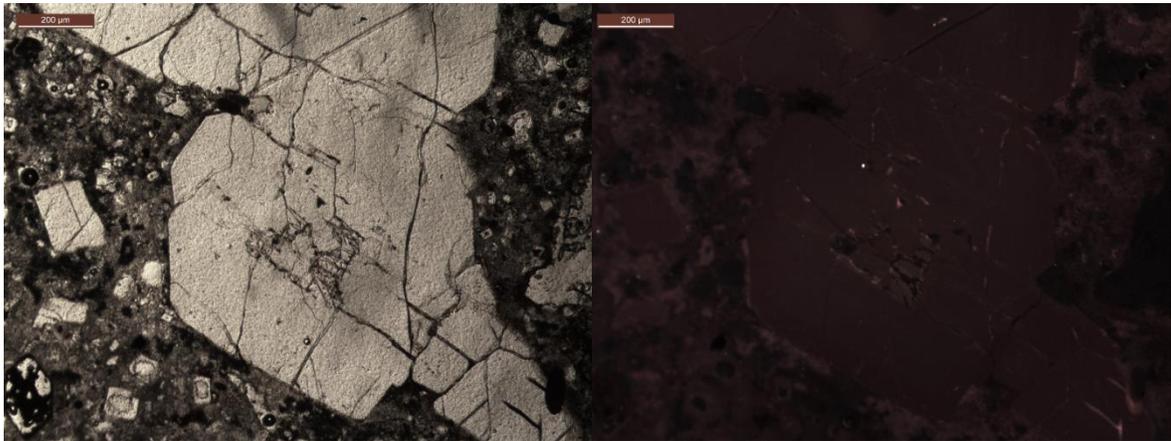


- Imágenes catoluminiscencia muestra VGP-06 Domo NW

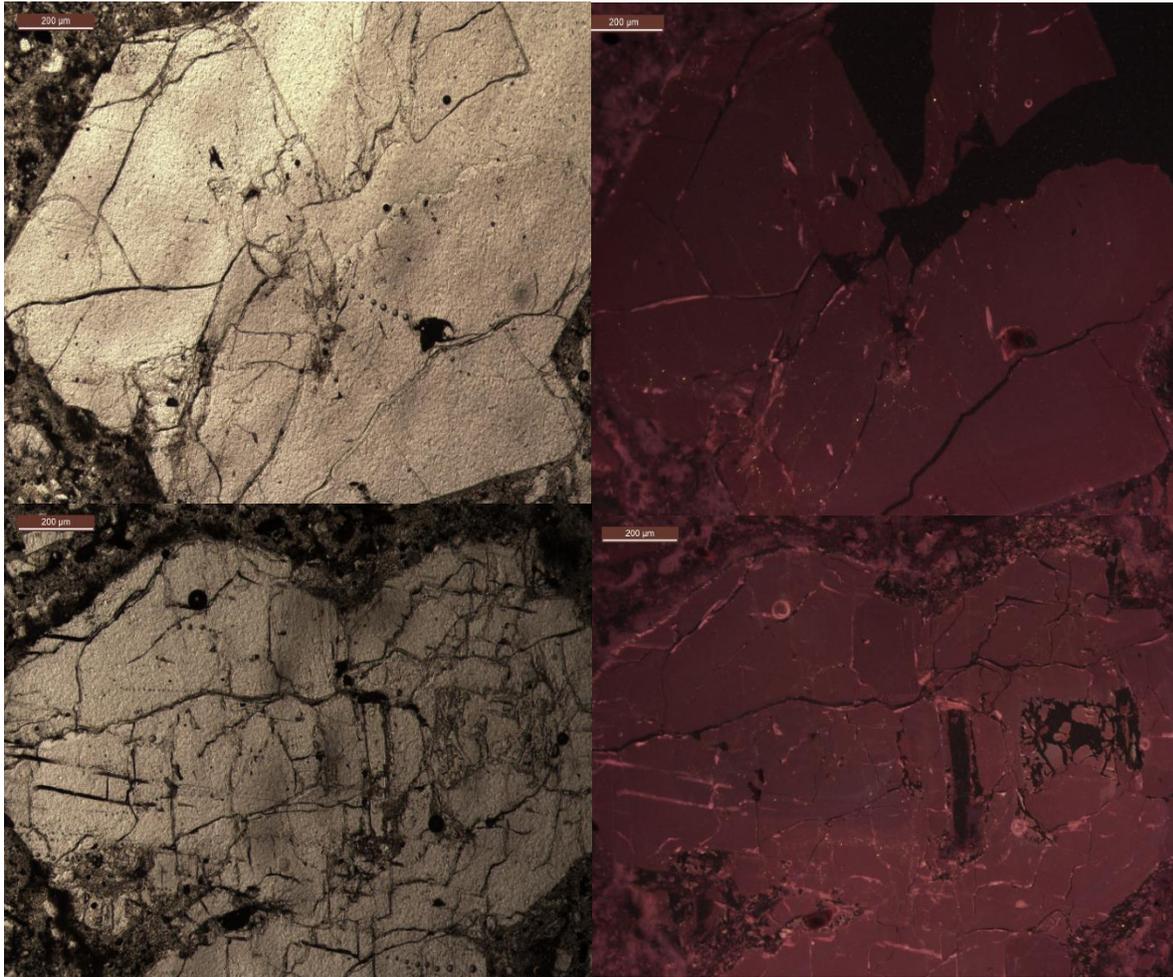


- Imágenes catolumiscencia muestra VGP-06 Domo NW

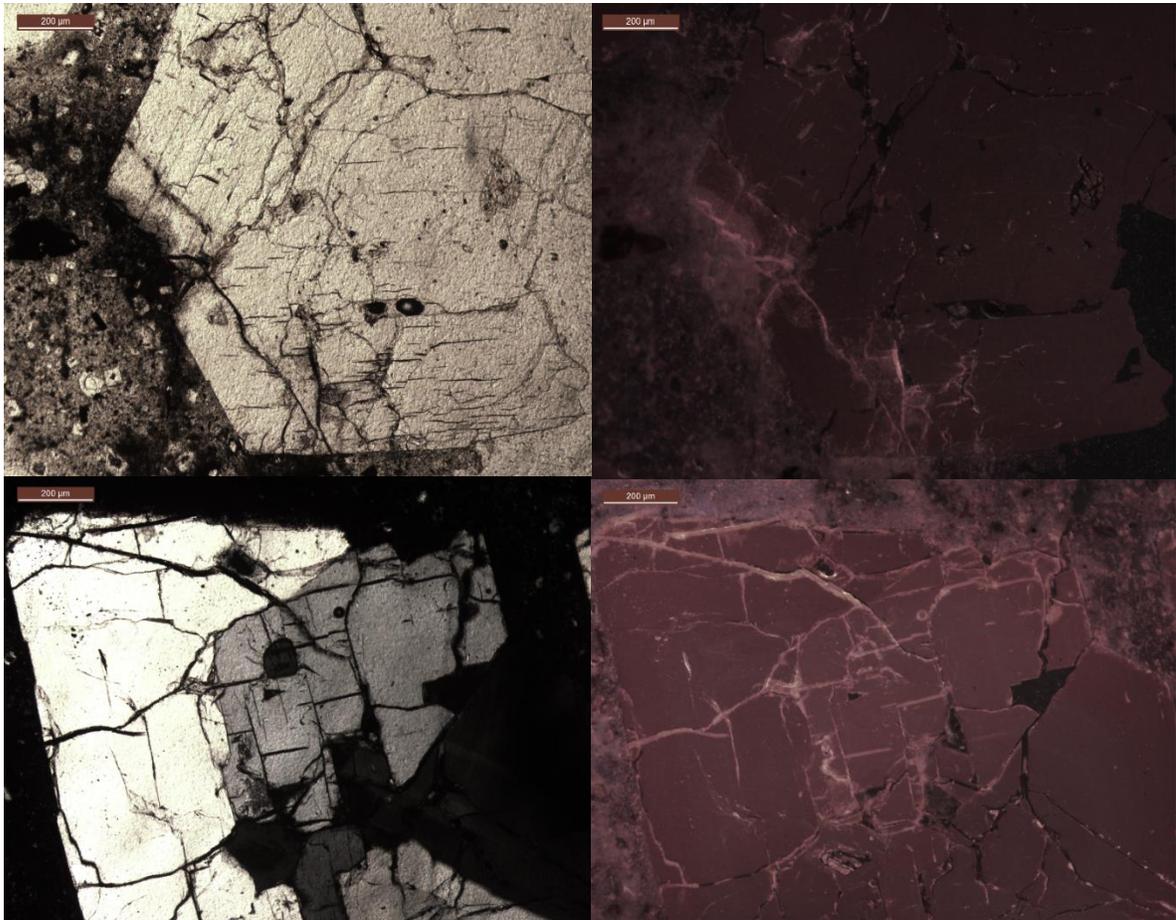




- Imágenes catoluminiscencia muestra VGP-09 Domo SE



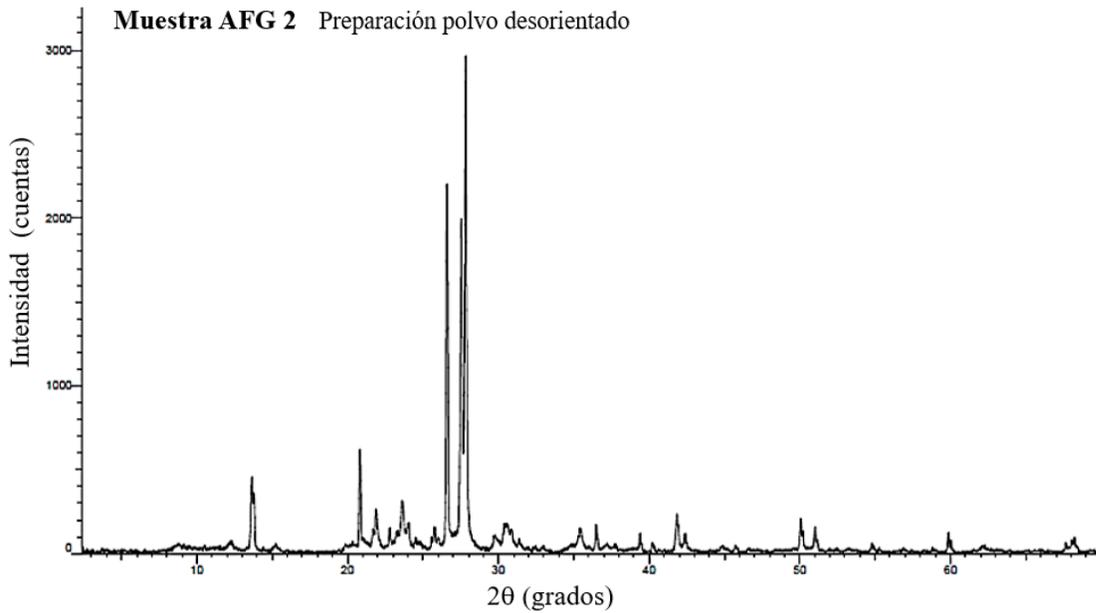
- Imágenes catoluminiscencia muestra VGP-07 Domo centro- sector Alto de los Godos.



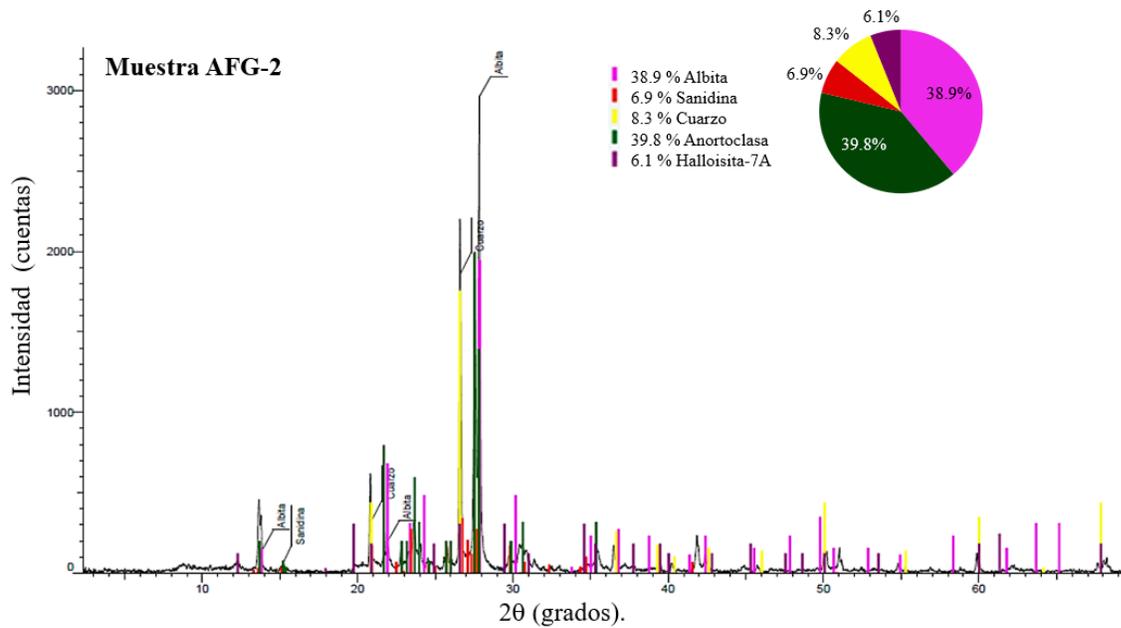
C. Anexo: difracción de rayos X (DRX)

Difracción de rayos X (DRX), sector Matarredonda, cantera ALFAGRES. (Depósitos y domos).

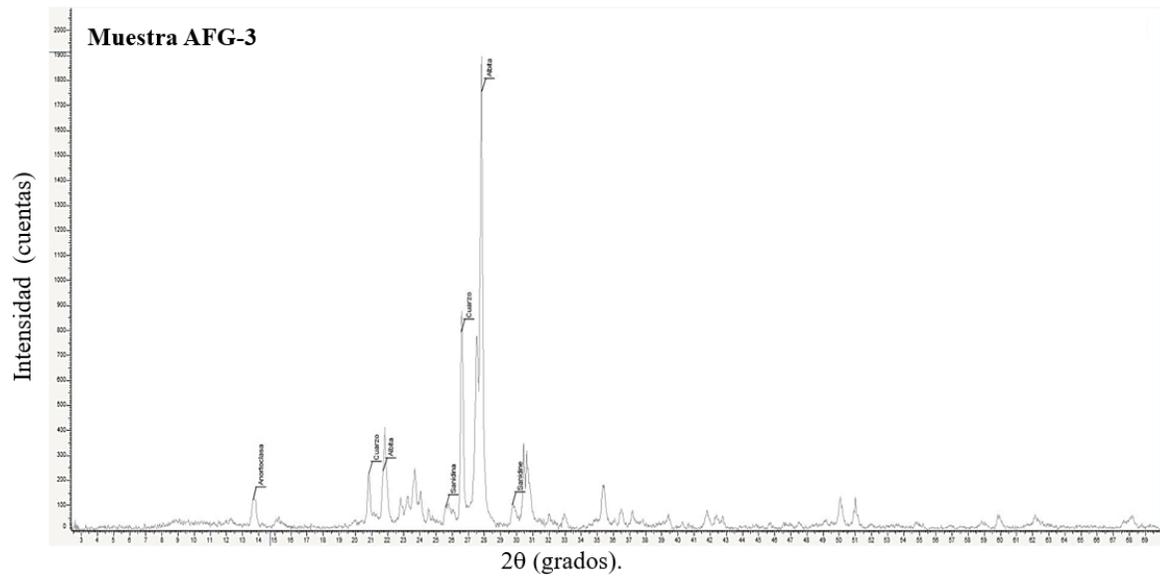
- Difractograma muestra AFG-02 en técnica de polvo desorientado.



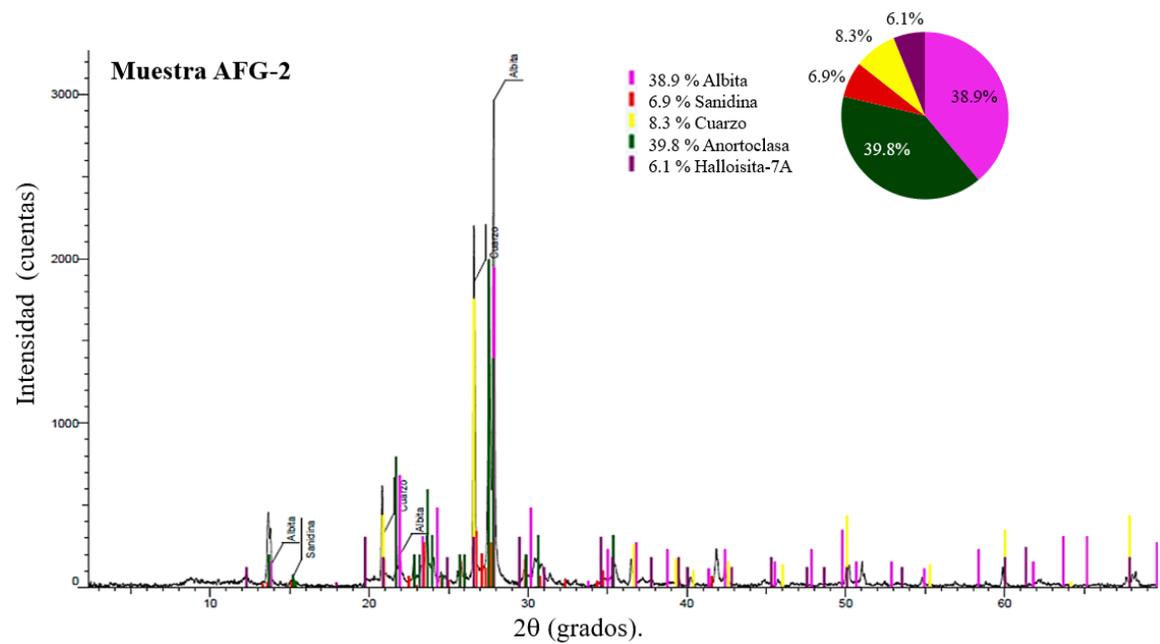
- Difractograma muestra AFG-02 en técnica polvo desorientado, incluyen cuantificación de minerales.



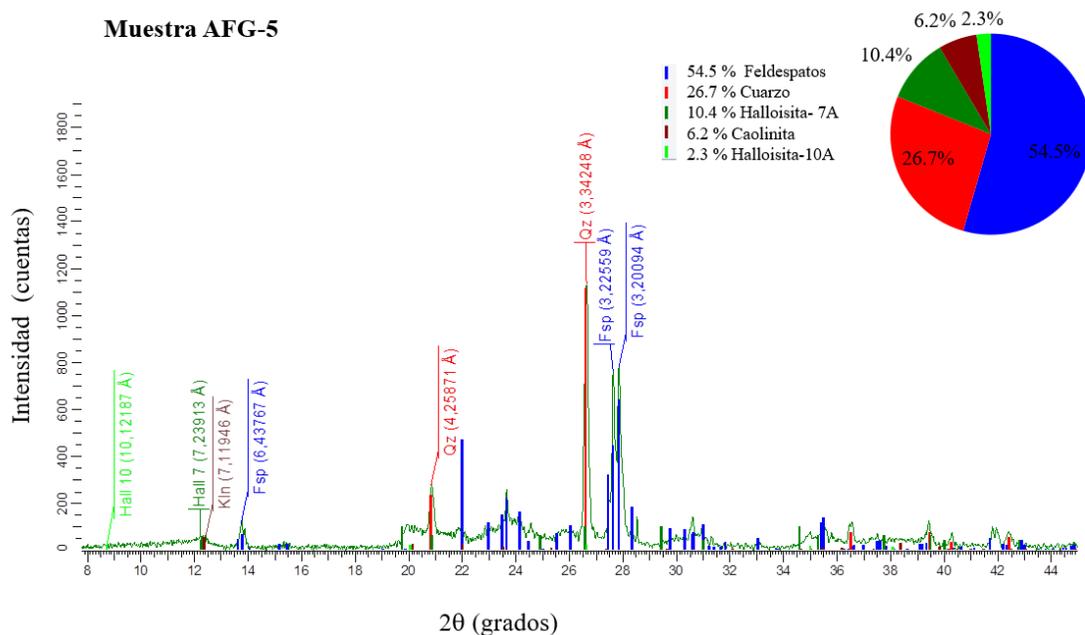
- Difractograma muestra AFG-03 en técnica de polvo desorientado.



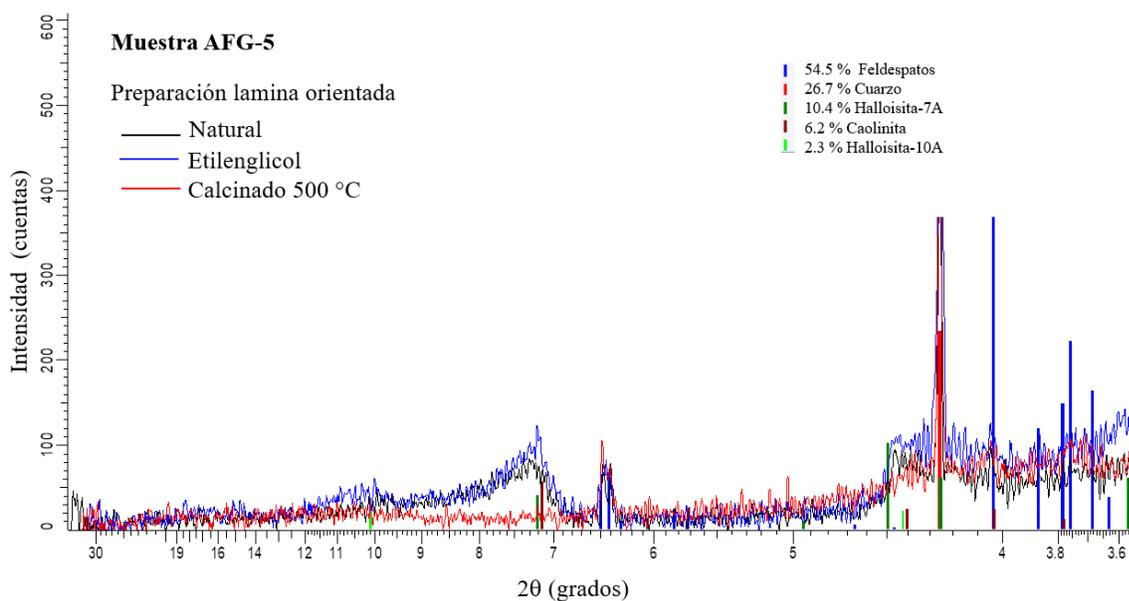
- Difractograma muestra AFG-03 en técnica lámina orientada, incluyen cuantificación de minerales.



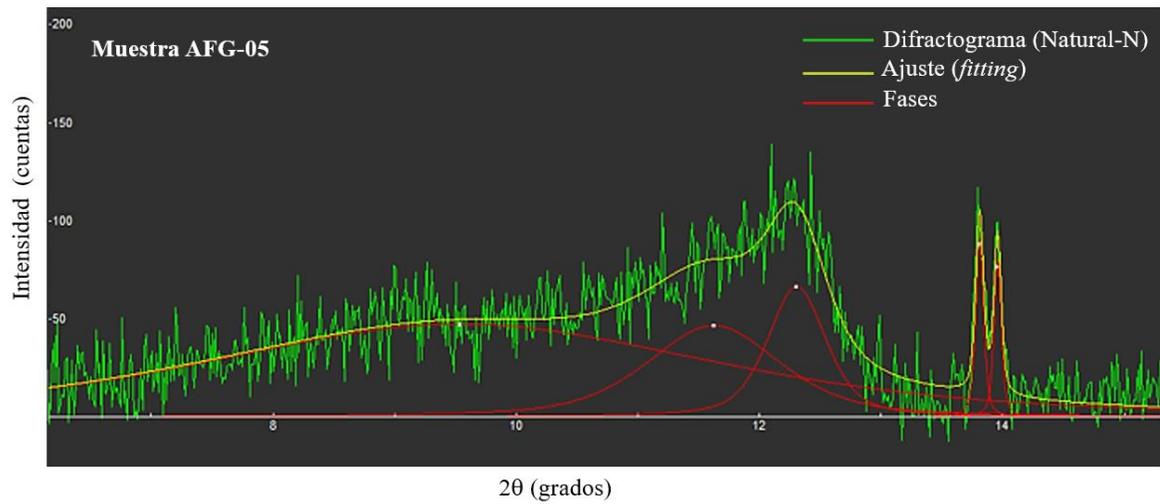
- Difractograma muestra AFG-05 en técnica de polvo desorientado, incluye cuantificación de minerales.



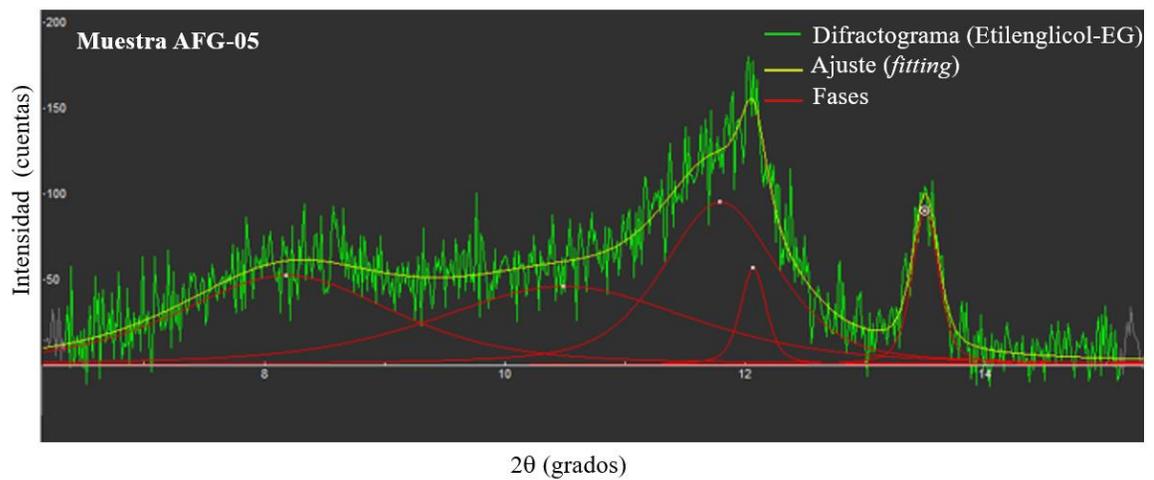
- Difractograma muestra AFG-05 en técnica lamina orientada. Muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



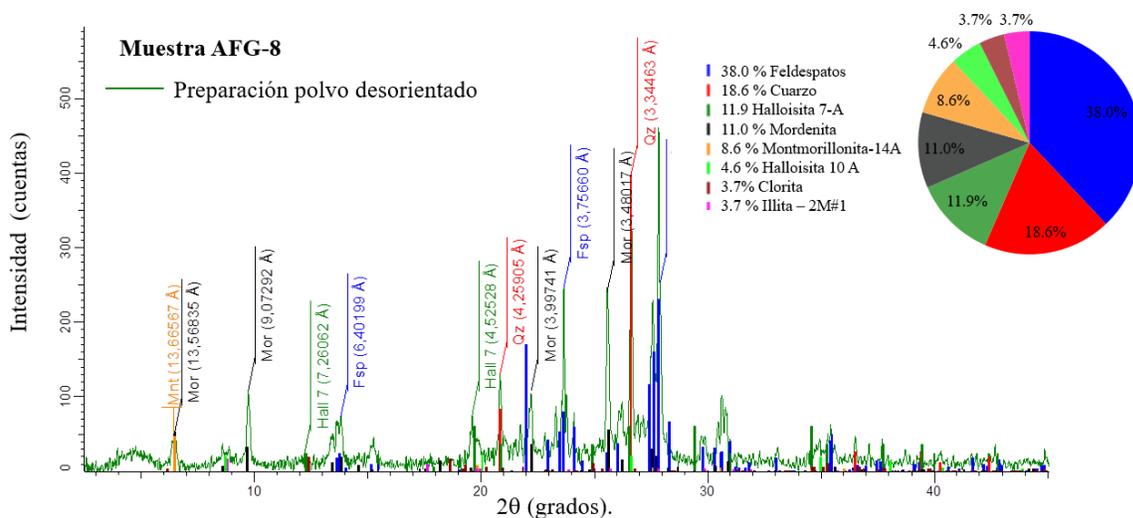
- Difractograma muestra AFG-05 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural N).



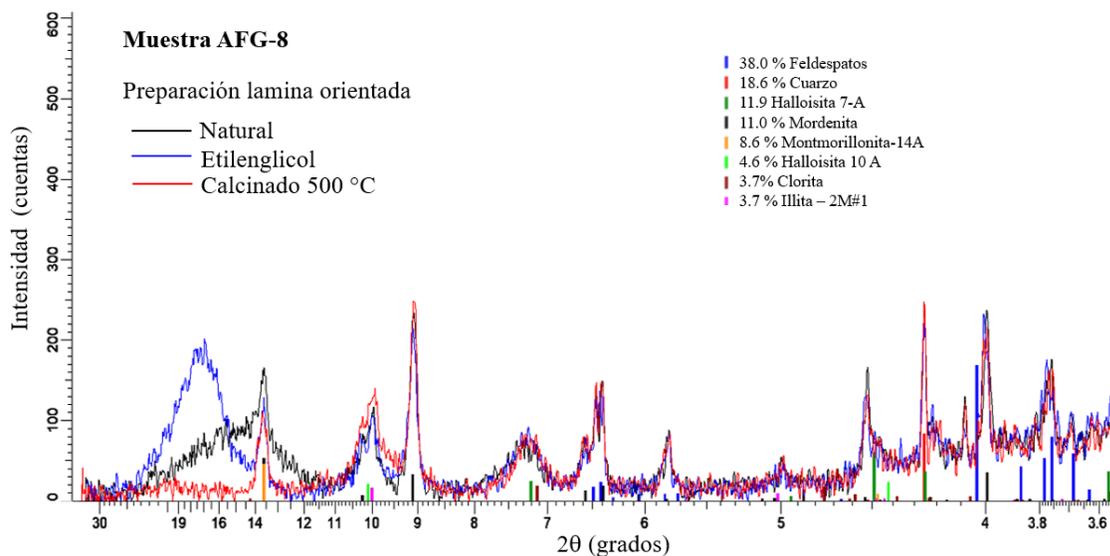
- Difractograma muestra AFG-05 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol N).



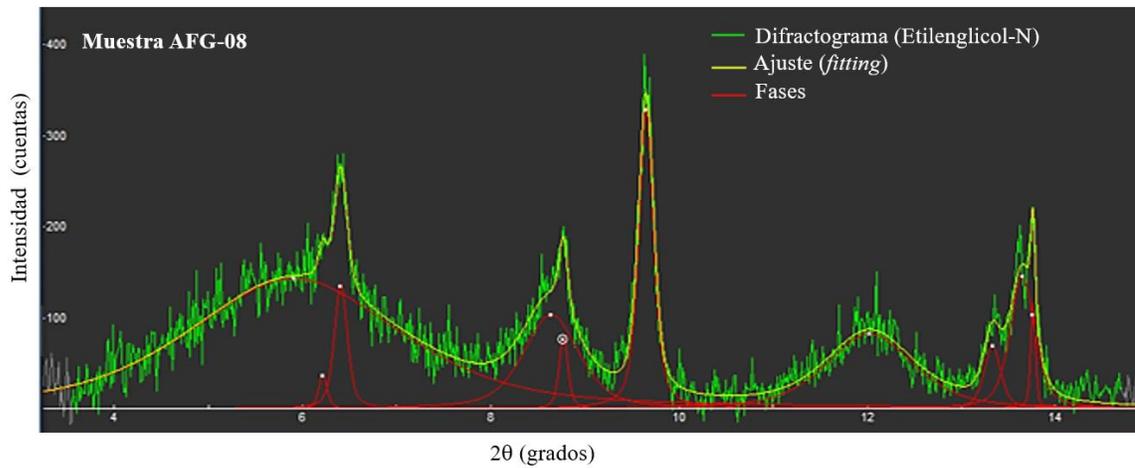
- Difractograma muestra AFG-08 en técnica de agregado desorientado, incluye cuantificación de minerales.



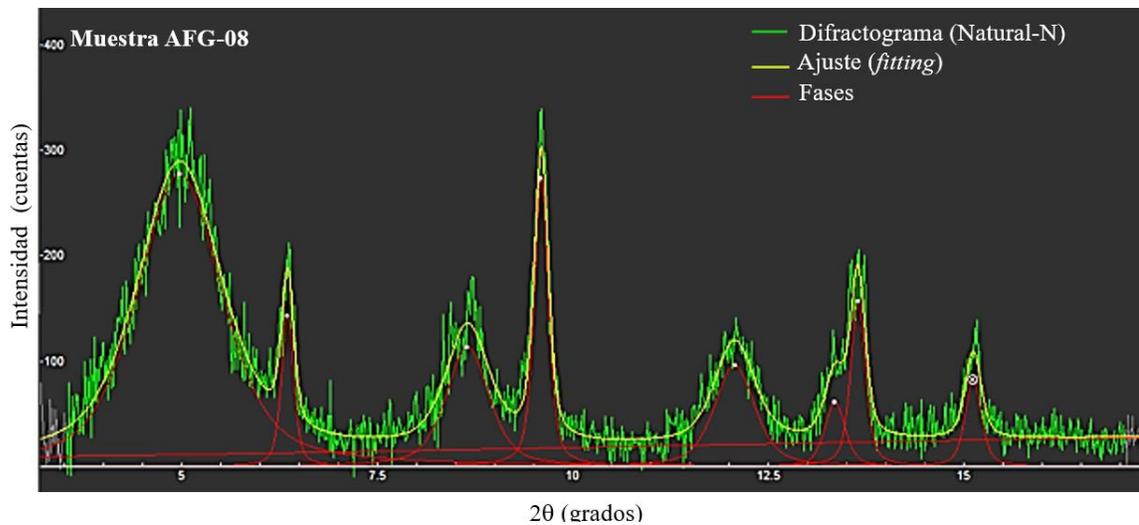
- Difractograma muestra AFG-08 en técnica de lámina orientada. Muestra natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



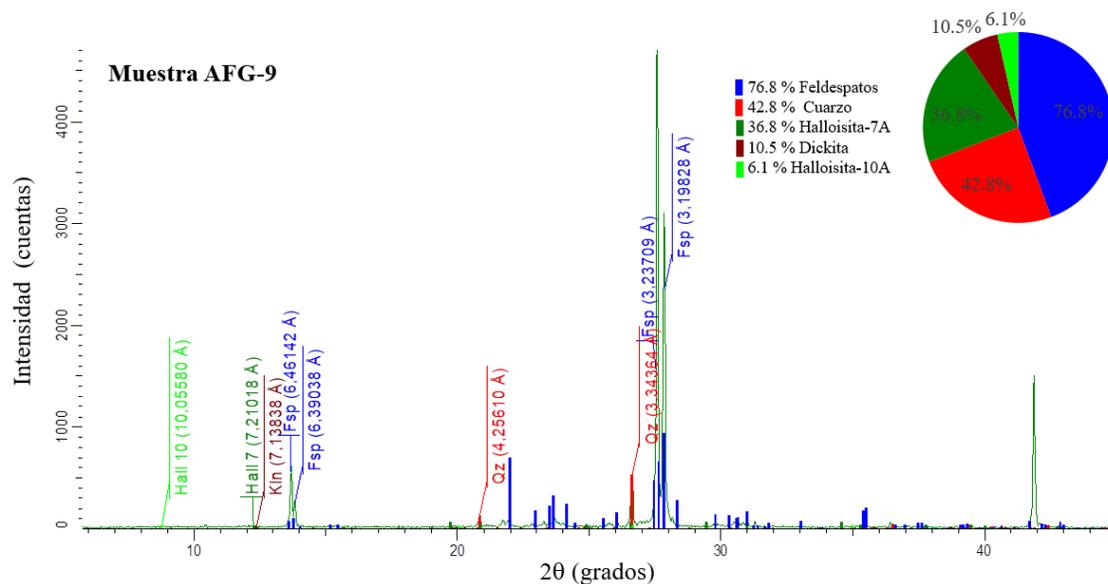
- Difractograma muestra AFG-08 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol N).



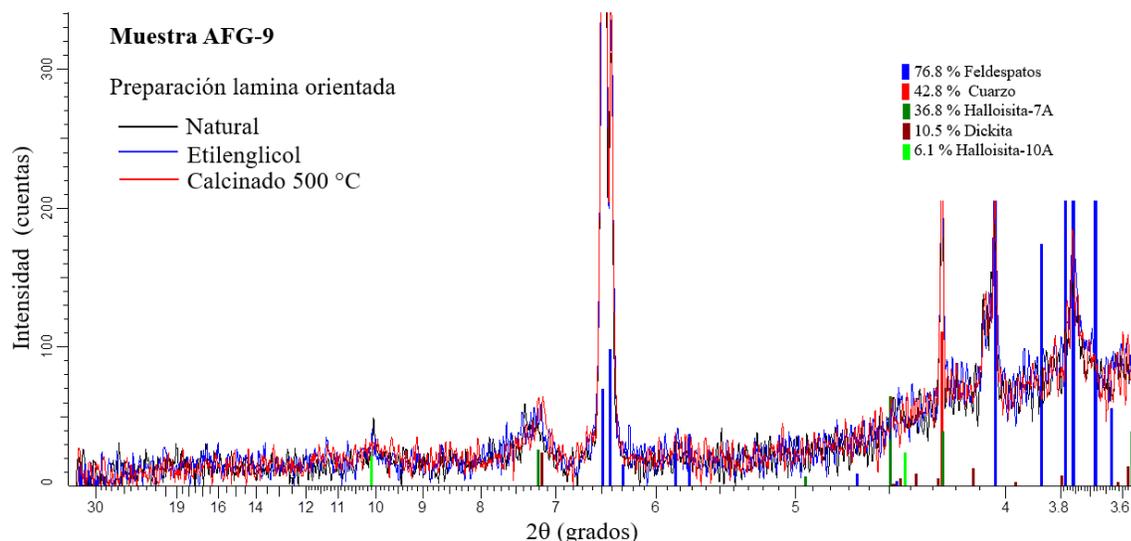
- Difractograma muestra AFG-08 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



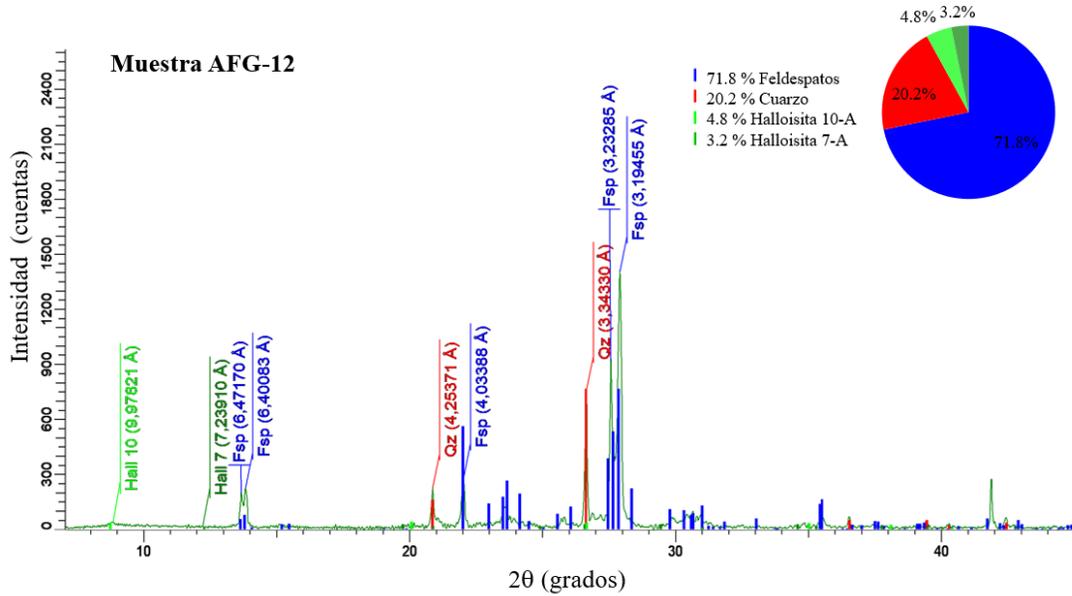
- Difractograma muestra AFG-09 en técnica de agregado desorientado, principales minerales identificados.



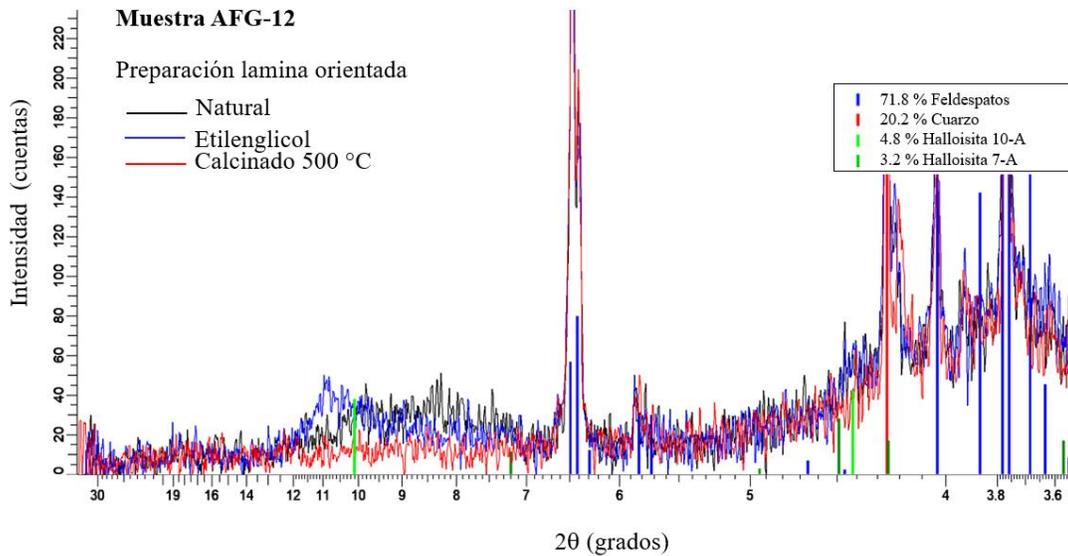
- Difractograma muestra AFG-09 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



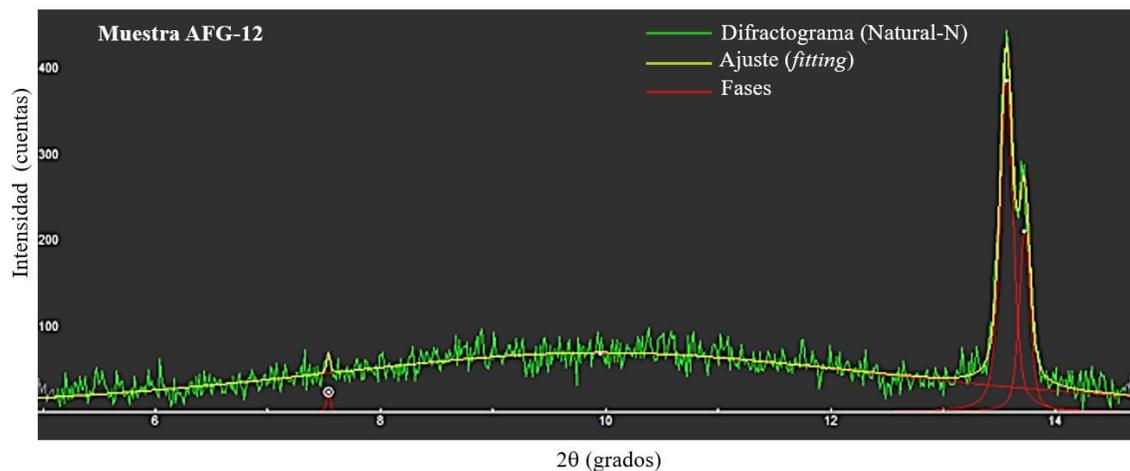
- Difractograma muestra AFG-12 en técnica de polvo desorientado, incluye cuantificación de minerales.



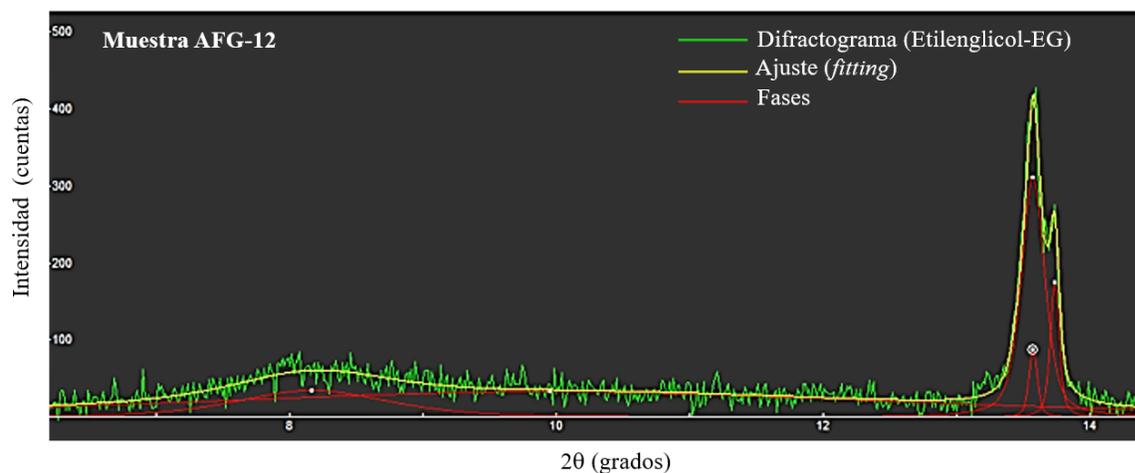
- Difractograma muestra AFG-12 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



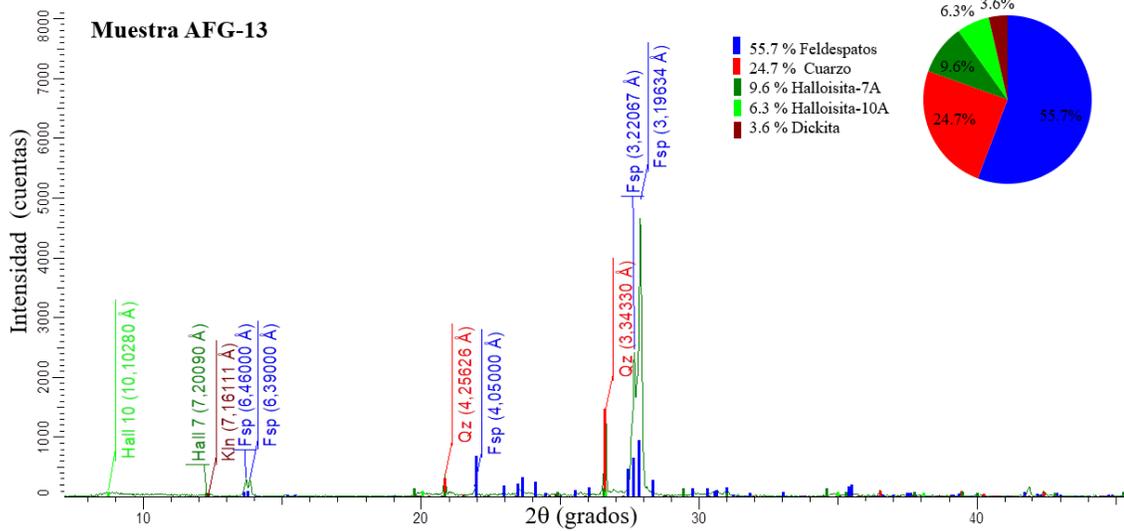
- Difractograma muestra AFG-12 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



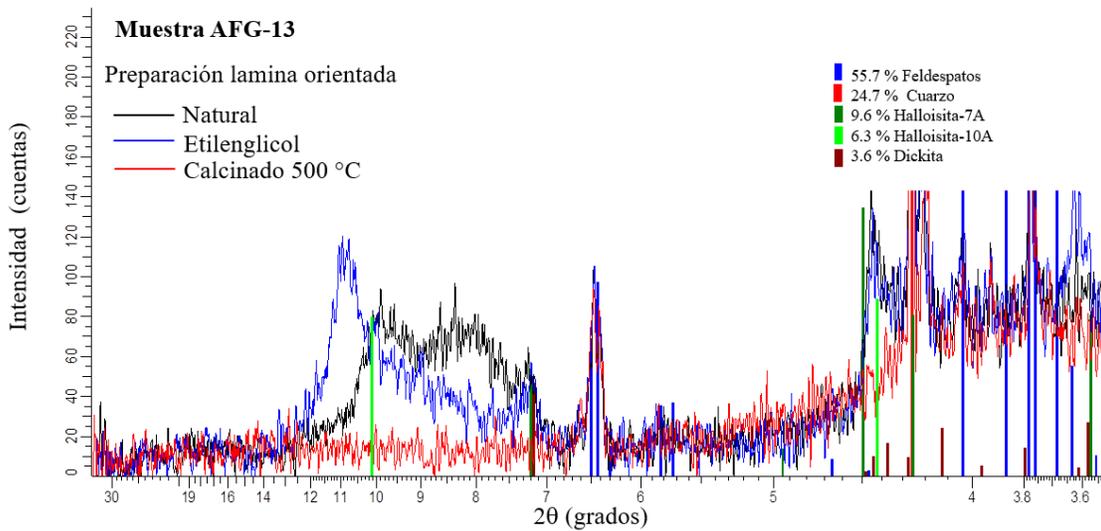
- Difractograma muestra AFG-12 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



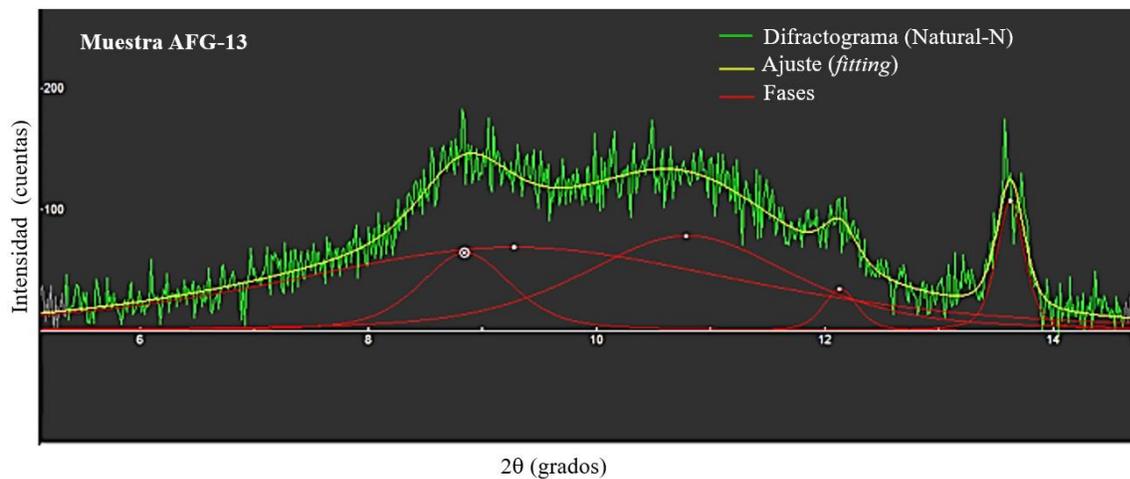
- Difractograma muestra AFG-13 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



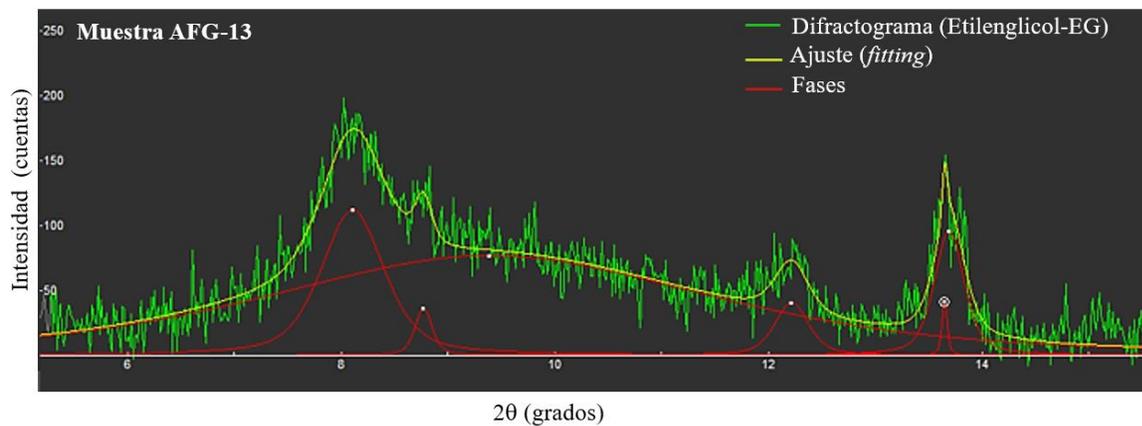
- Difractograma muestra AFG-13 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



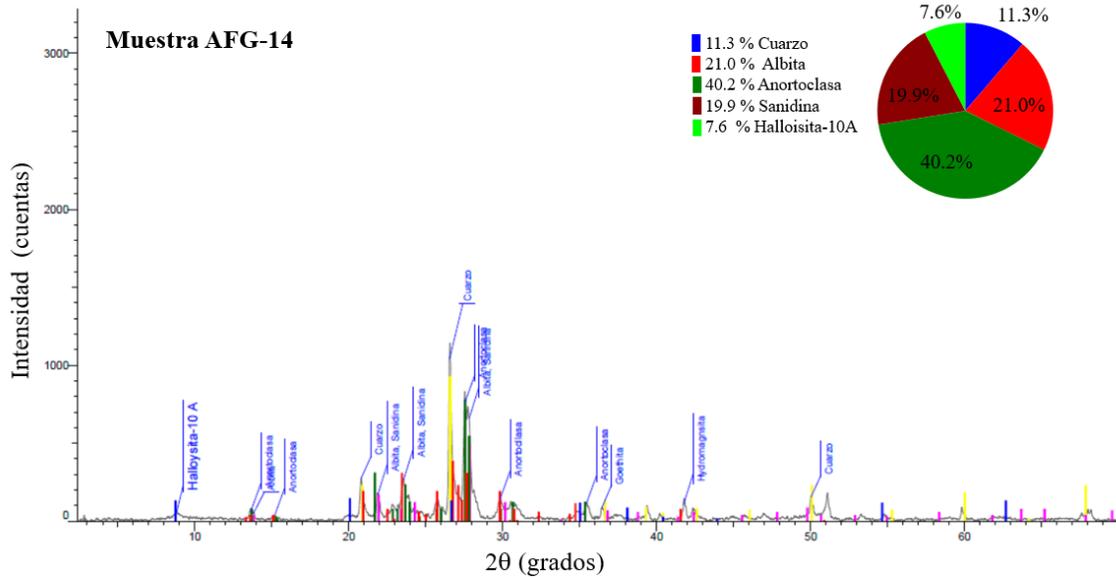
- Difractograma muestra AFG-13 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



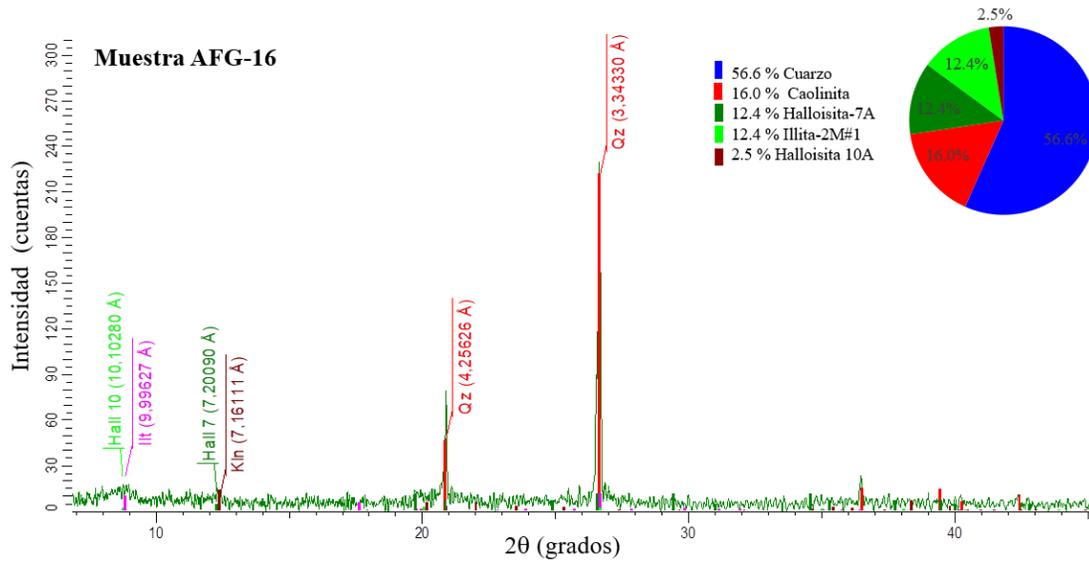
- Difractograma muestra AFG-13 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



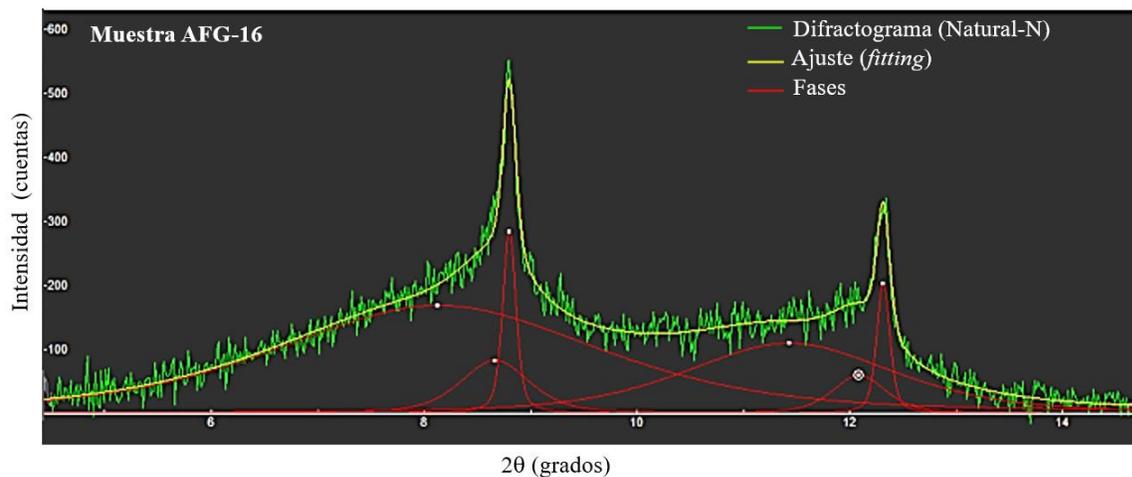
- Difractograma muestra AFG-14 en técnica de polvo desorientado, incluye cuantificación de minerales.



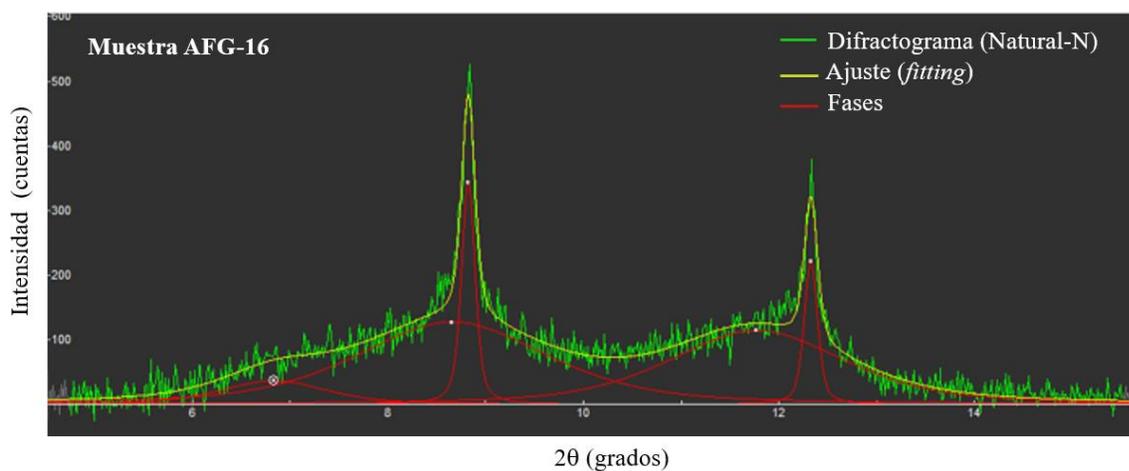
- Difractograma muestra AFG-16 en técnica de polvo desorientado, incluye cuantificación de minerales.



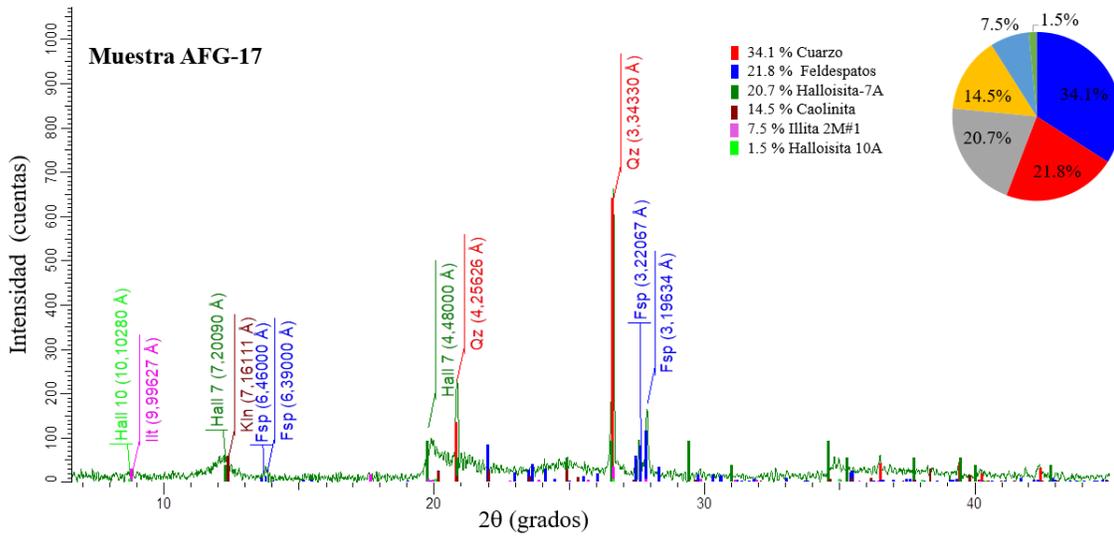
- Difractograma muestra AFG-16 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



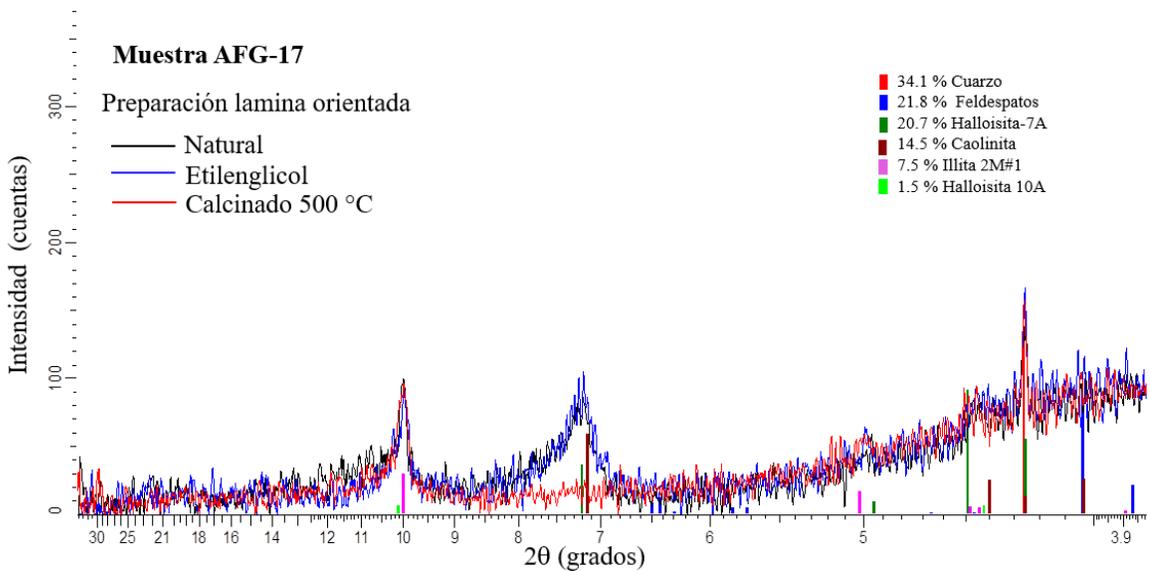
- Difractograma muestra AFG-16 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



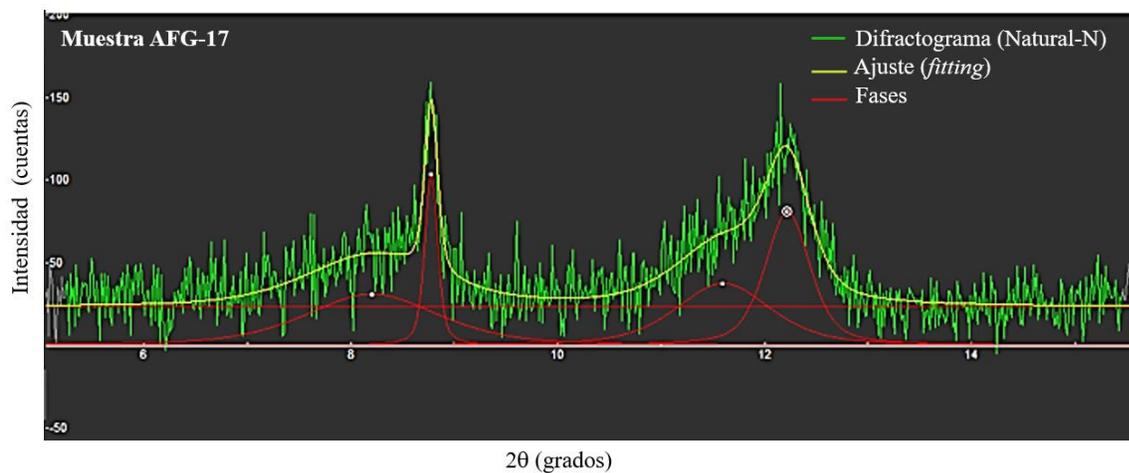
- Difractograma muestra AFG-17 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



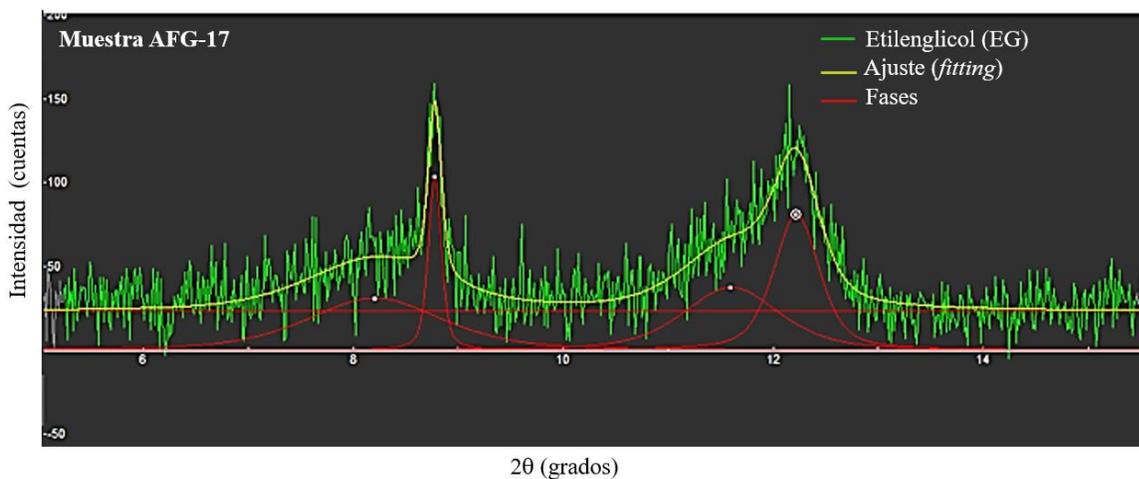
- Difractograma muestra AFG-17 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C. Detalle fracción arcillosa.



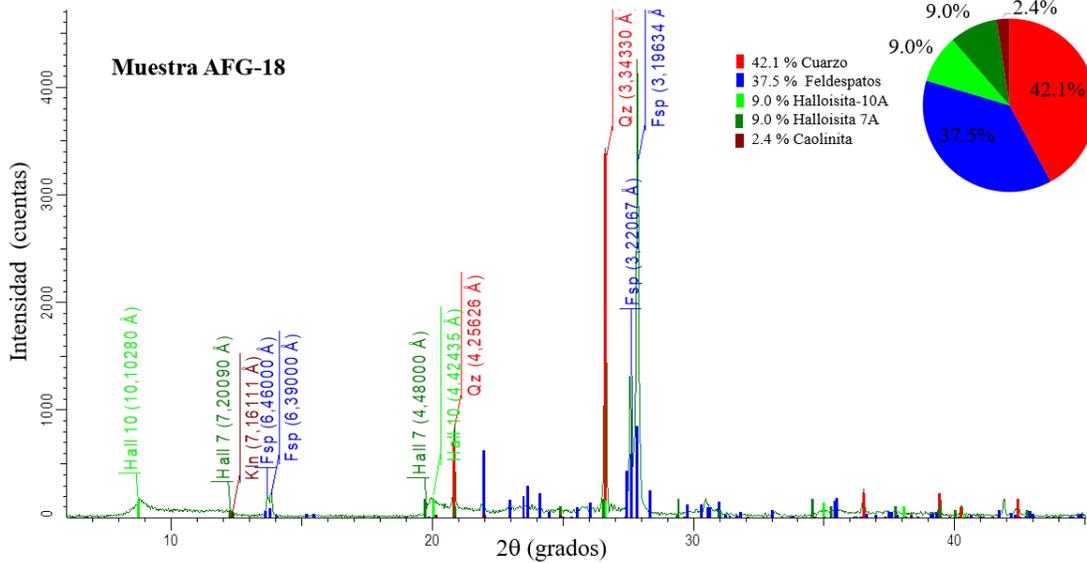
- Difractograma muestra AFG-17 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



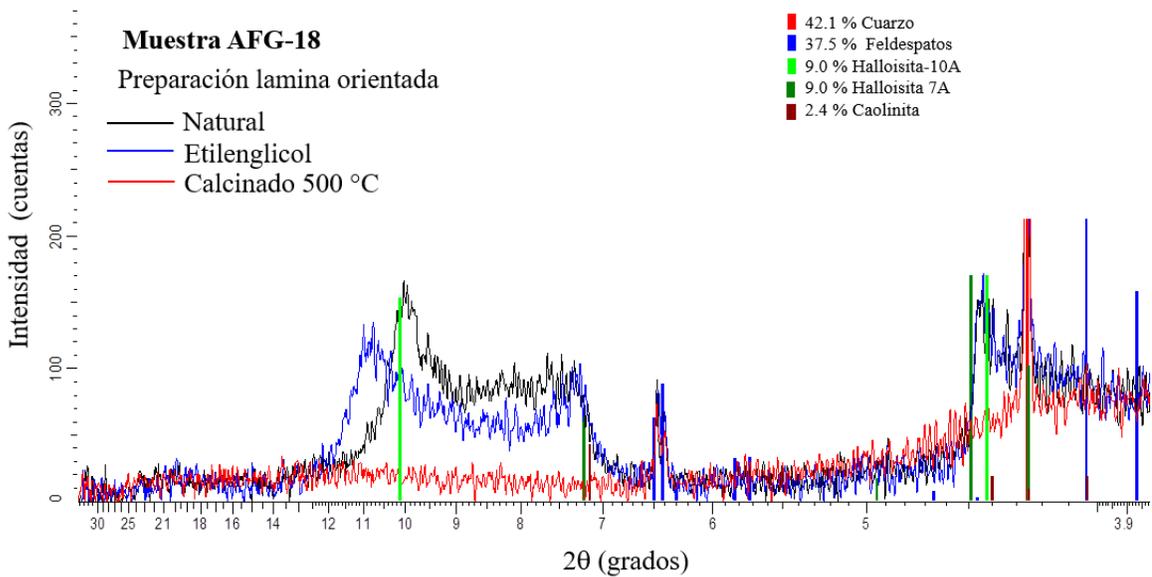
- Difractograma muestra AFG-17 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



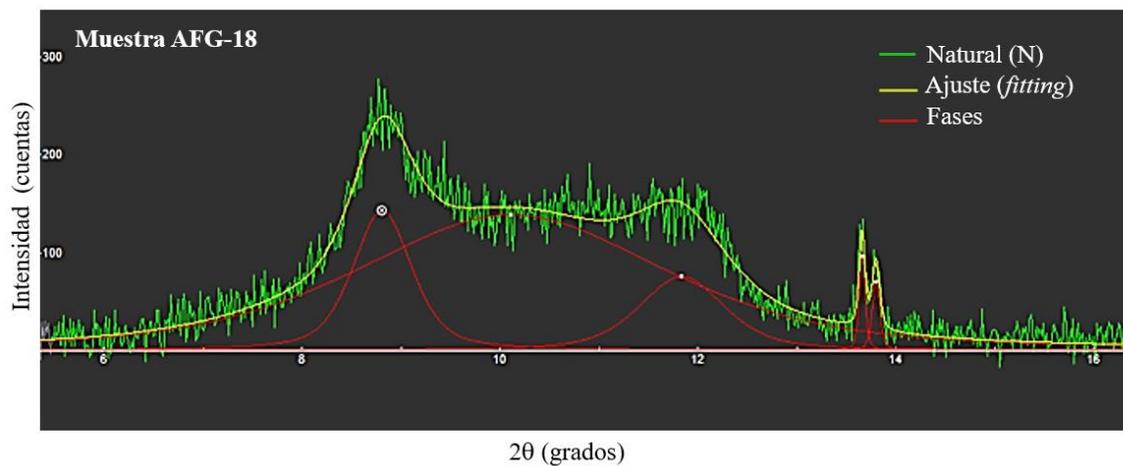
- Difractograma muestra AFG-18 en técnica de polvo desorientado. Identificación de minerales principales.



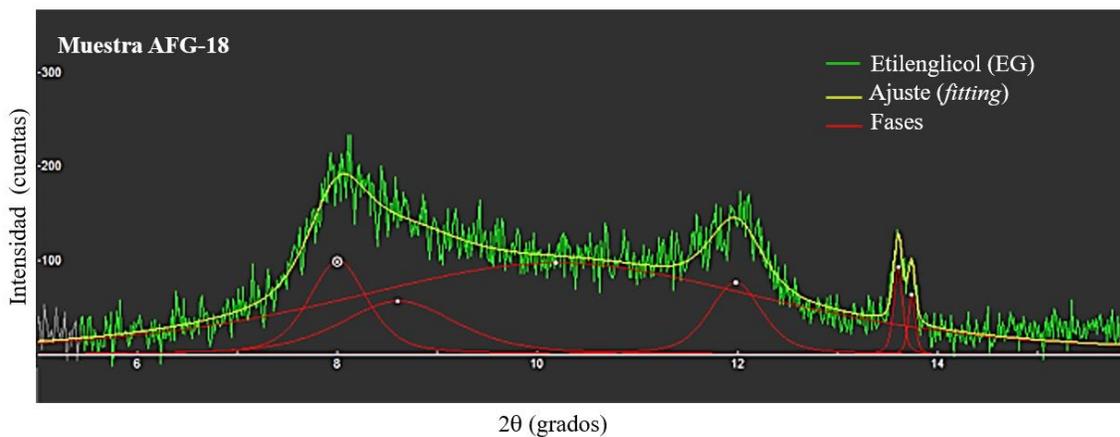
- Difractograma muestra AFG-18 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



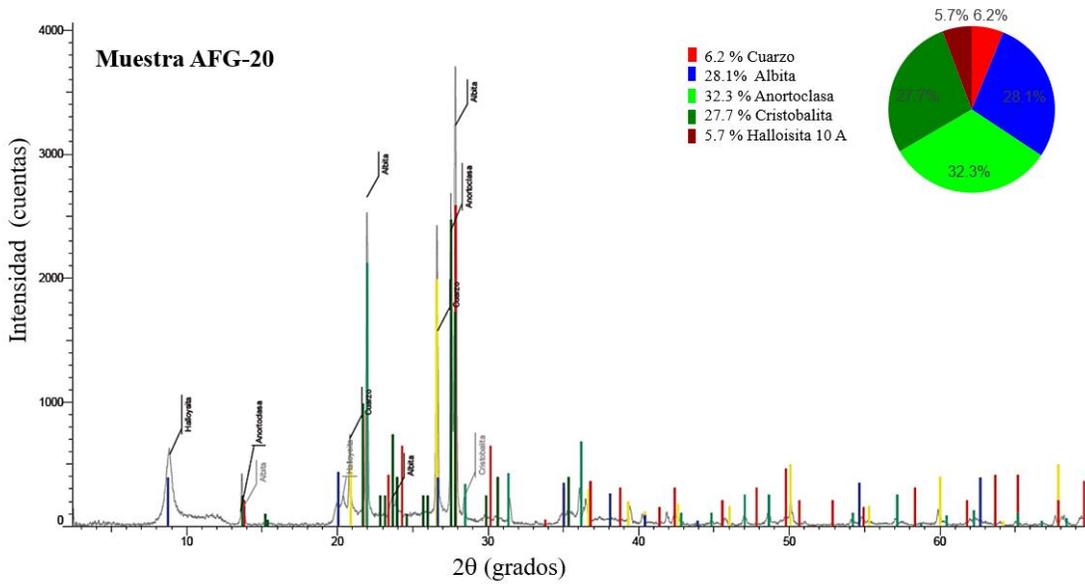
- Difractograma muestra AFG-18 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



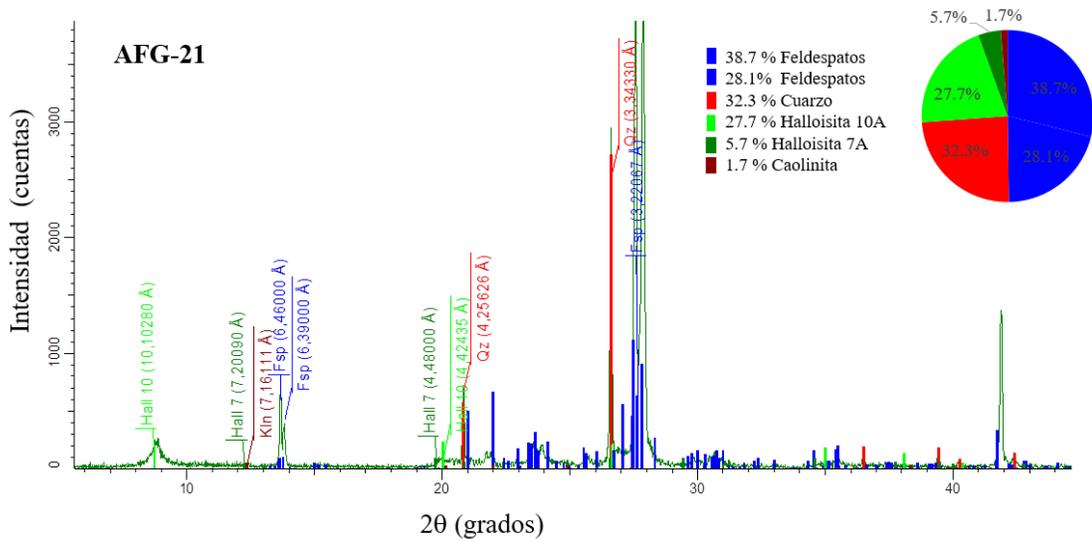
- Difractograma muestra AFG-18 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



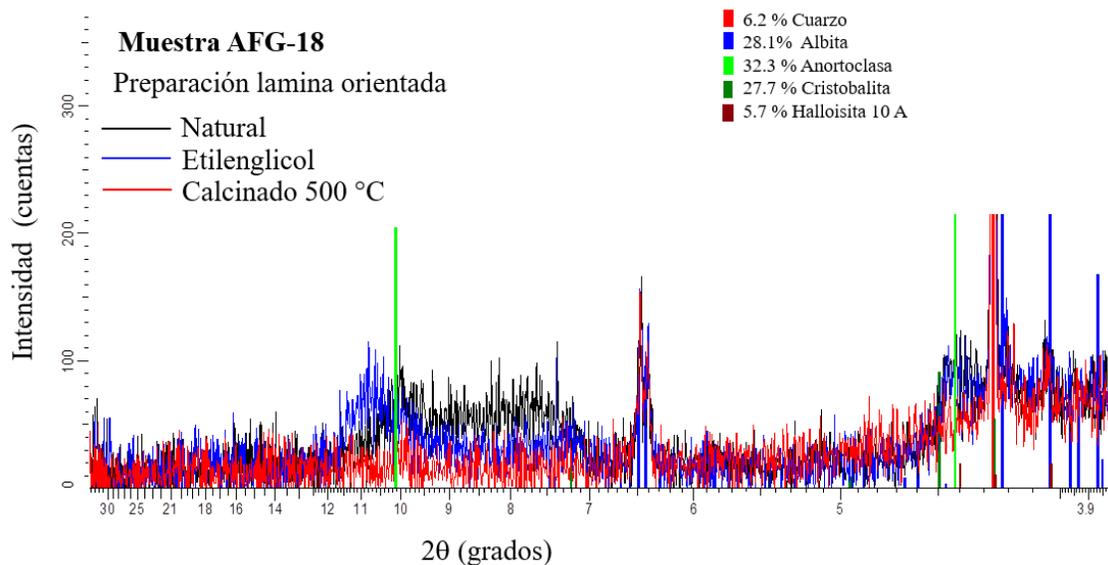
- Difractograma muestra AFG-20 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



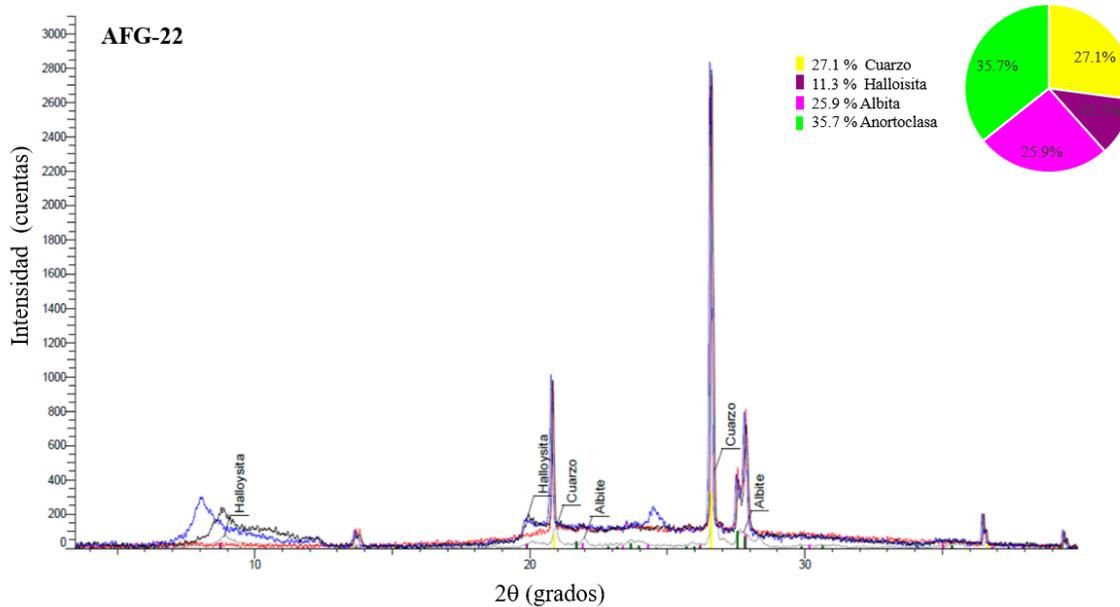
- Difractograma muestra AFG-21 en técnica polvo desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



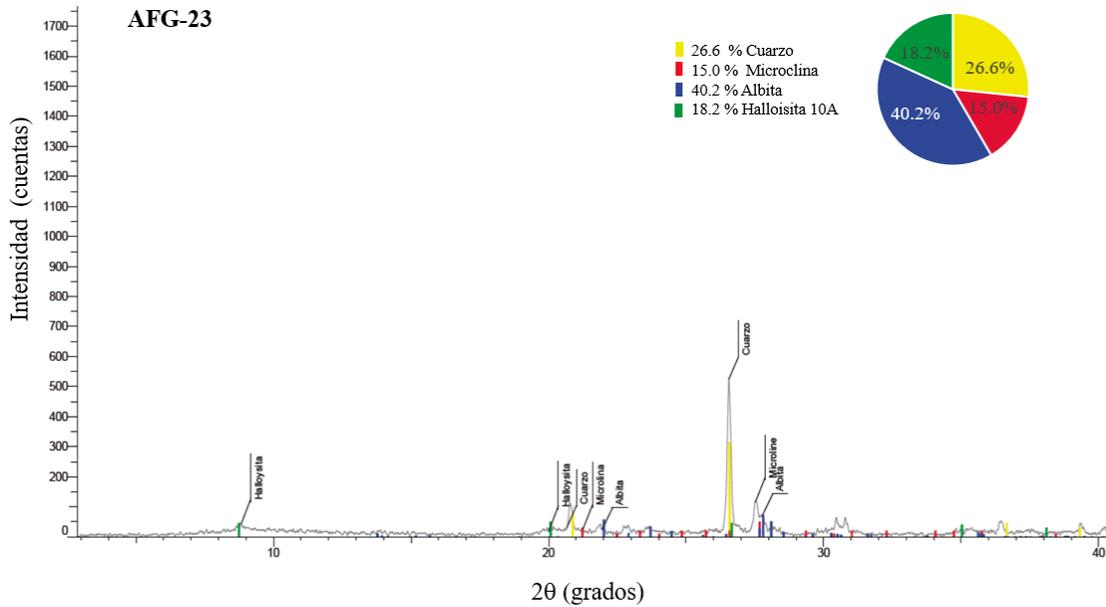
- Difractograma muestra AFG-21 en técnica lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



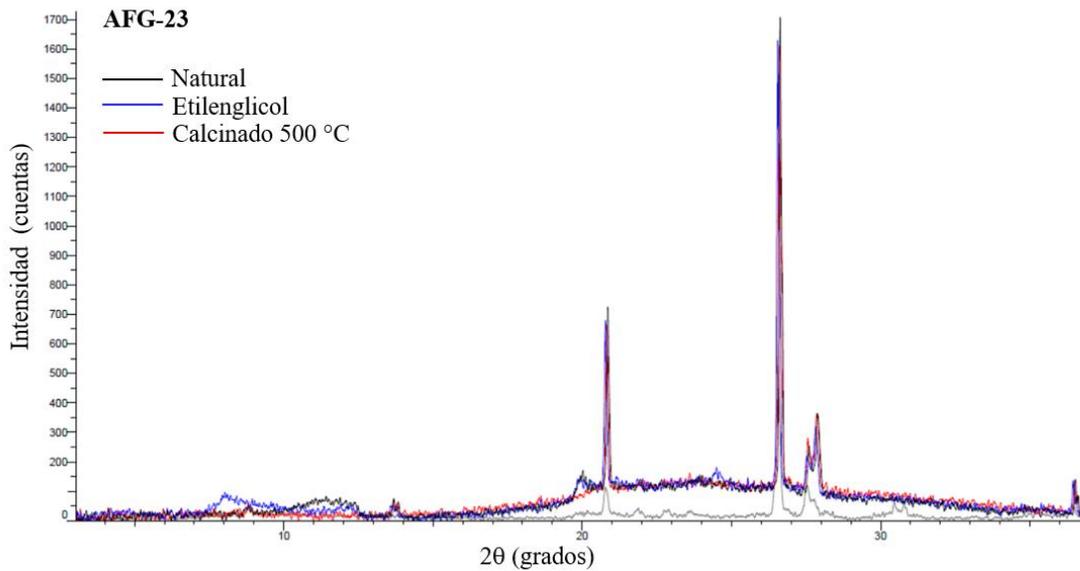
- Difractograma muestra AFG-22 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



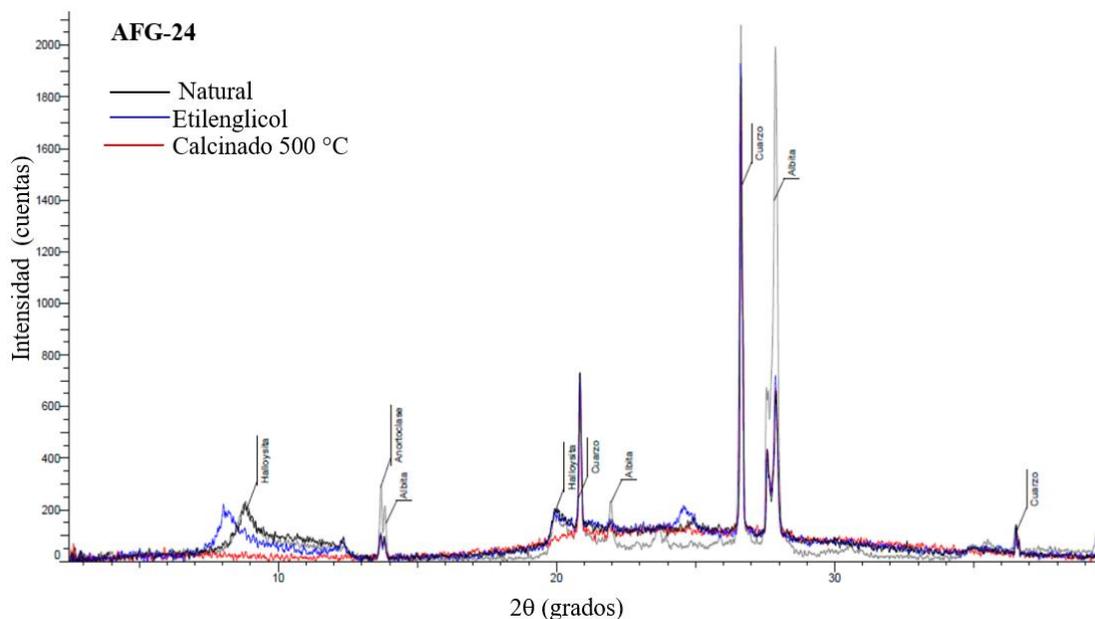
- Difractograma muestra AFG-23 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



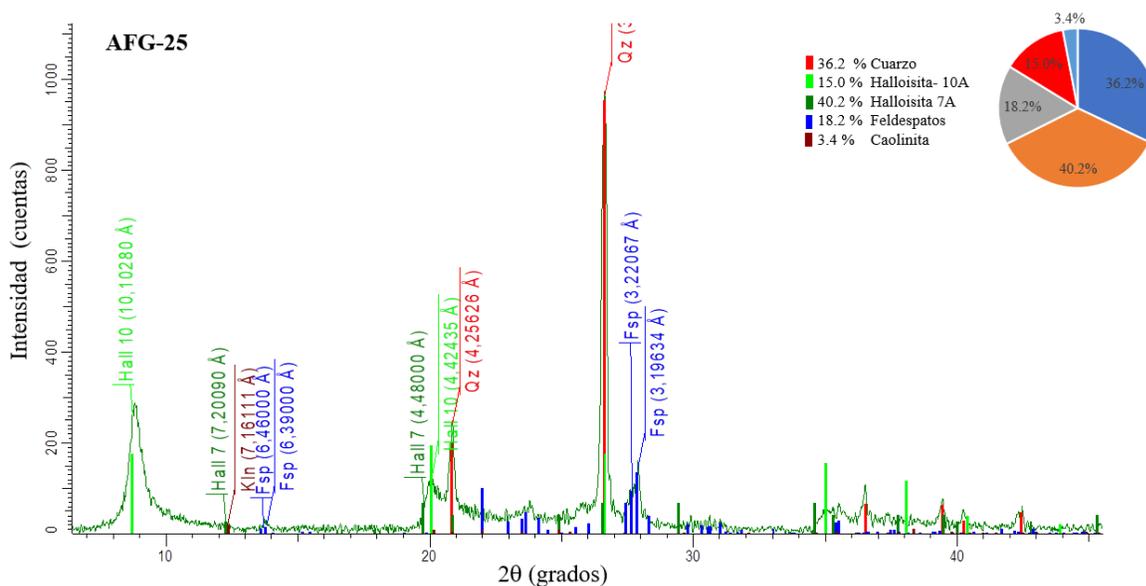
- Difractograma muestra AFG-23 en técnica agregado desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



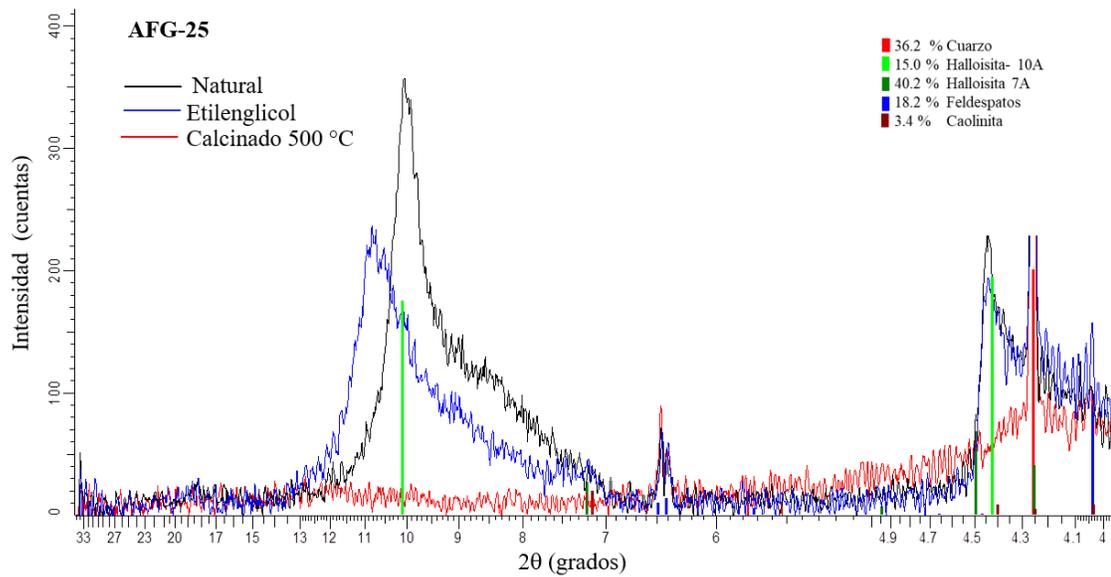
- Difractograma muestra AFG-24 en técnica agregado desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



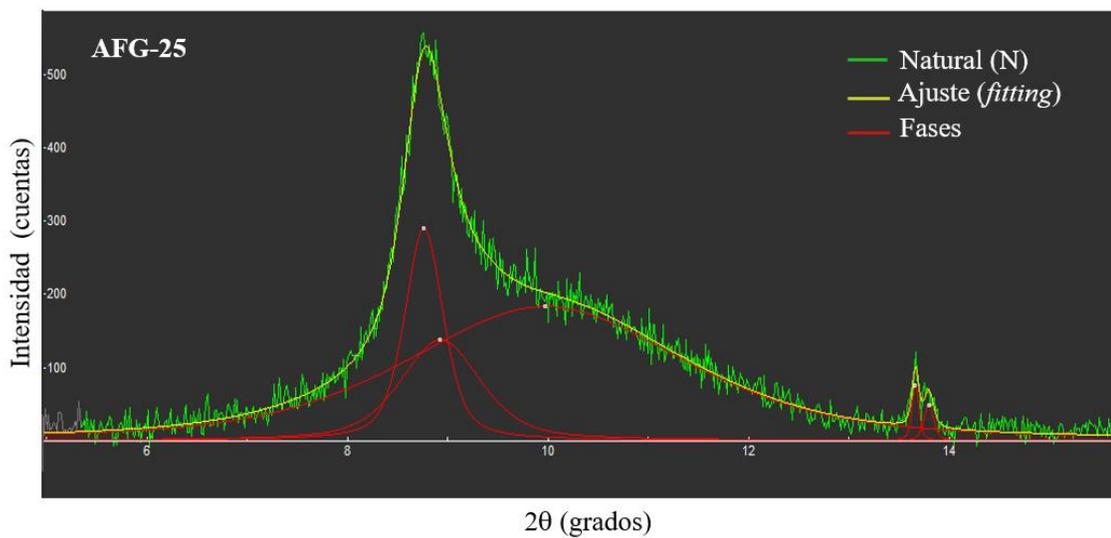
- Difractograma muestra AFG-25 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



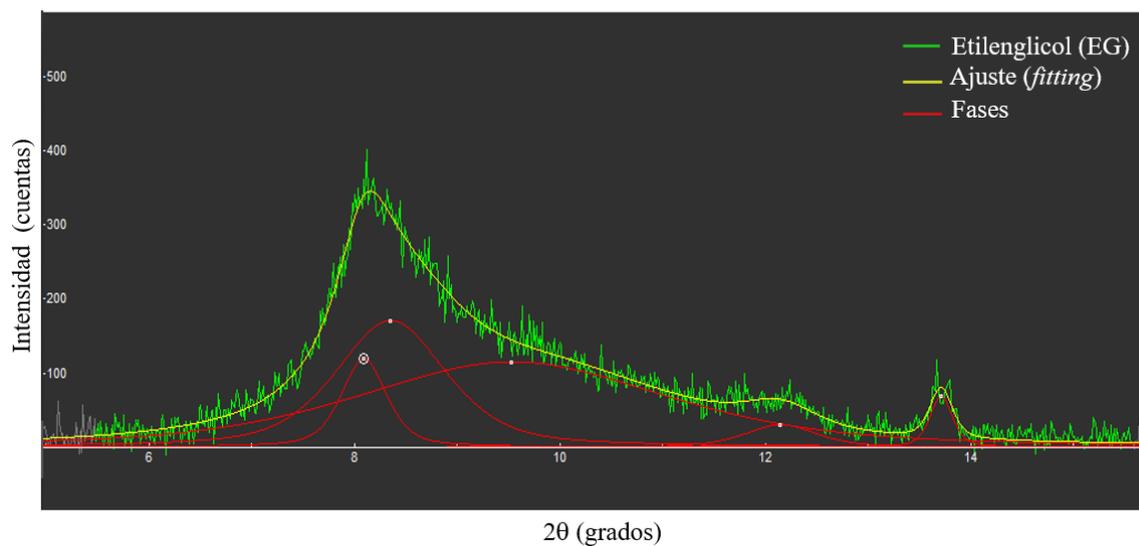
- Difractograma muestra AFG-25 en técnica agregado desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



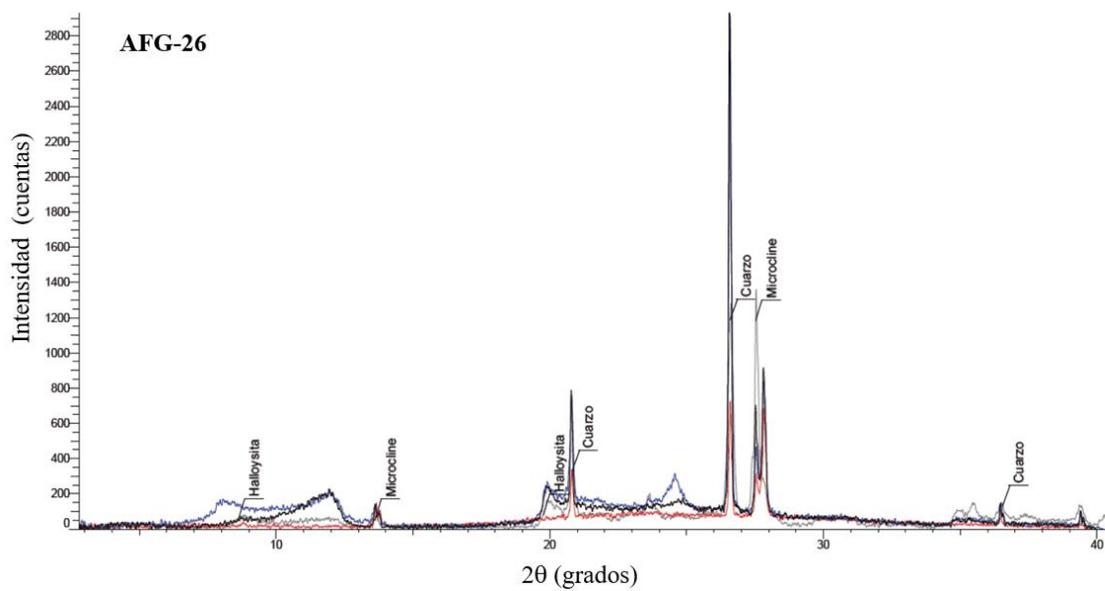
- Difractograma muestra AFG-25 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



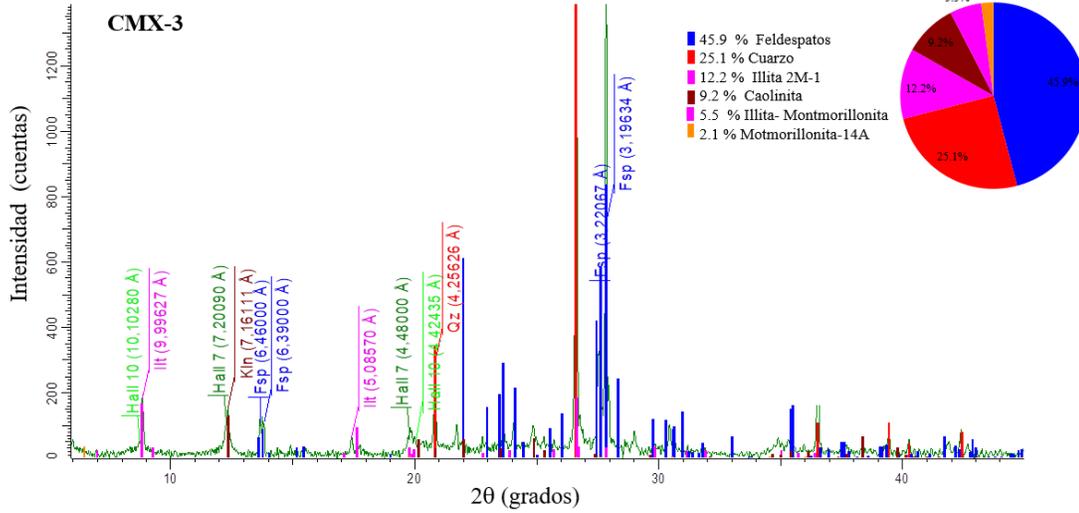
- Difractograma muestra AFG-25 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-EG).



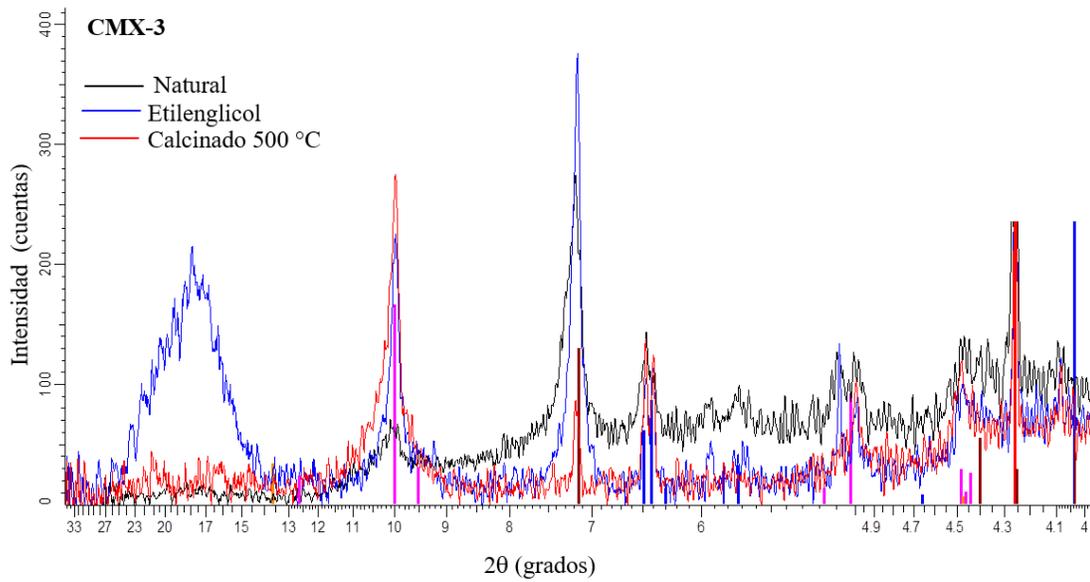
- Difractograma muestra AFG-26 en técnica agregado desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



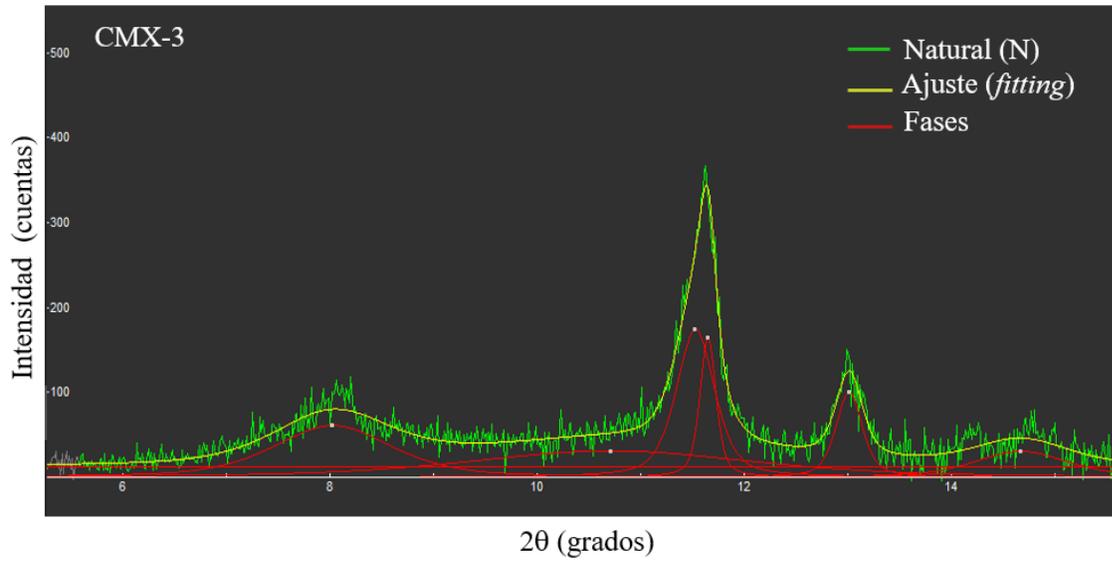
- Difractograma muestra CMX-3 en técnica de agregado desorientado. Incluye cuantificación de minerales.



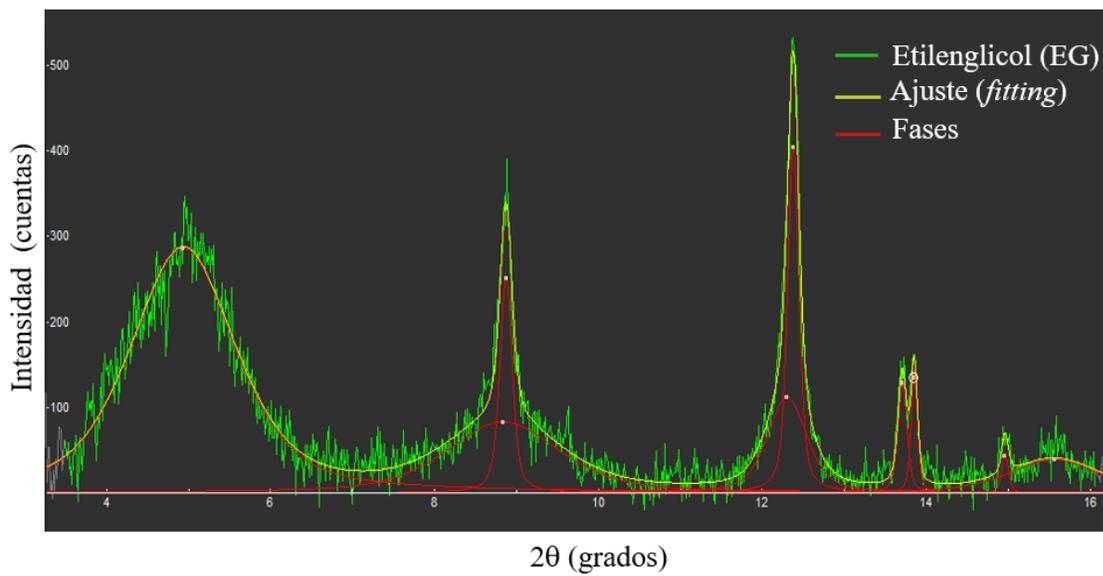
- Difractograma muestra CMX-3 en técnica agregado desorientado color gris y lamina orientada, muestra en natural color negro, etilenglicol color azul, y calcinada a 500° C.



- Difractograma muestra CMX-3 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Natural-N).



- Difractograma muestra CMX-3 con análisis de parámetros de picos en muestra con preparación de lámina orientada (Etilenglicol-N).



D. Anexo: química mineral

- Resultados análisis química mineral realizados en anfíboles para el sector Alto de los Godos. Unidades: % wt.

Anfíboles												
Sector Alto de los Godos	Muestra	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total
Domo SE	VGP-09-Anfibol 1-1	4.599	12.847	2.355	48.669	8.659	0.506	0.935	15.776	1.045	0.017	95.408
	VGP-09-Anfibol 1-2	4.75	12.801	1.94	49.611	7.708	0.54	0.986	15.696	0.95	0.001	94.983
Domo NW	VGP-06-Anfibol 1-1	4.871	15.063	2.823	52.726	8.27	0.501	0.931	15.965	1.072	0.002	102.224
	VGP-06-Anfibol 1-1	5.08	14.329	3.132	48.685	8.299	0.561	0.989	16.813	1.049	0.009	98.946
	VGP-06-Anfibol 1-2	4.755	14.393	3.17	48.688	8.383	0.546	0.972	16.718	1.082	0.015	98.722
	VGP-06-Anfibol 2-1	4.836	14.422	3.716	47.805	8.967	0.626	0.935	16.599	0.997	-0.016	98.887
	VGP-06-Anfibol 2-2	4.939	14.956	2.88	49.212	8.282	0.569	0.953	15.945	1.036	0.004	98.776
	VGP-06-Anfibol 3-1	4.818	14.816	3.176	48.616	8.794	0.539	0.935	16.146	0.999	0.019	98.858
	VGP-06-Anfibol 3-2	5.027	14.424	2.919	48.198	8.003	0.515	1.031	16.62	1.064	-0.009	97.792
Domo Centro	VGP-07-Anfibol 4-1	4.931	14.471	3.409	48.053	8.005	0.585	0.973	16.594	1.049	0.001	98.071
	VGP-07-Anfibol 4-2	5.202	14.276	2.545	49.115	7.728	0.531	0.941	16.774	1.066	0.018	98.196
	VGP-07-Anfibol 4B-1	4.987	14.574	3.14	48.522	8.205	0.619	0.966	16.351	1.026	0.012	98.402
	VGP-07-Anfibol 4B-2	5.263	14.27	2.449	49.176	7.482	0.561	1.001	16.717	1.023	0.007	97.949
	VGP-07-Anfibol 4C-1	5.011	14.571	2.811	48.544	7.894	0.516	0.991	16.331	1.025	-0.007	97.687
	VGP-07-Anfibol 4C-2	5.066	14.206	2.252	49.227	7.389	0.463	1.009	16.948	1.077	-0.01	97.627
	VGP-07-Anfibol 3-1	4.866	14.432	3.201	47.792	8.579	0.629	0.972	16.364	0.986	0.013	97.834
	VGP-07-Anfibol 3-2	5.643	14.014	2.127	49.395	7.221	0.461	0.99	17.022	1.121	0.012	98.006
	VGP-07-Anfibol 2-1	5.147	14.409	2.445	48.348	7.698	0.51	0.957	16.617	1.047	0.006	97.184
	VGP-07-Anfibol 2-2	5.33	14.108	2.48	48.89	7.538	0.549	1.01	16.733	1.059	-0.014	97.683
	VGP-07-Anfibol 1-1	5.048	14.208	2.542	48.927	7.765	0.497	1.002	16.981	1.078	0.015	98.063
	VGP-07-Anfibol 1-2	5.123	14.331	2.326	48.978	7.648	0.481	0.999	17.26	1.081	0.009	98.236
ALFAGRES	VGP-03-Anfibol 3-1	0.193	0.156	22.555	44.89	0.338	0.694	0.831	17.557	0.029	0.013	87.256
	VGP-03-Anfibol 3-2 borde alterado	9.586	0.002	20.606	69.778	0.317	-0.049	3.754	0.31	-0.007	0.013	104.31
	VGP-03-Anfibol 3- borde alterado	0.155	0.099	25.235	45.116	0.254	0.312	0.417	11.28	0.009	0.007	82.884
	VGP-03-Anfibol 1-	0.591	12.352	15.145	38.625	0.013	2.661	8.472	15.353	0.472	0.011	93.695

	borde alterado											
	VGP-03-Anfibol X 1	4.886	13.572	2.743	51.147	7.271	0.497	1.007	14.586	1.1	-0.01	96.799
	VGP-03-Anfibol X 2	4.647	12.94	2.552	49.214	6.259	0.467	0.987	14.548	1.101	0.011	92.726
	VGP-03-Anfibol X2-1	4.745	13.782	3.117	50.221	7.458	0.581	0.98	14.386	1.062	0.007	96.339
	VGP-03-Anfibol X2-2	5.193	13.353	2.664	50.878	6.842	0.501	1.034	14.921	1.105	-0.007	96.484
	VGP-03-Anfibol 2-1	4.486	13.241	3.534	49.876	8.003	0.619	1.001	15.254	1.032	0.017	97.063
	VGP-03-Anfibol 2-2	5.083	13.359	2.786	50.903	6.703	0.544	1.055	15.099	1.038	0.008	96.578
	VGP-03-Anfibol 1-1	4.825	13.419	3.018	50.35	7.061	0.566	1.019	15.419	1.086	0.026	96.789
	VGP-03-Anfibol 1-2	4.601	13.47	3.512	50.051	7.426	0.602	0.948	15.166	1.112	-0.001	96.887

- Resultados análisis química mineral realizados en plagioclasas para el sector Alto de los Godos. Unidades: % wt.

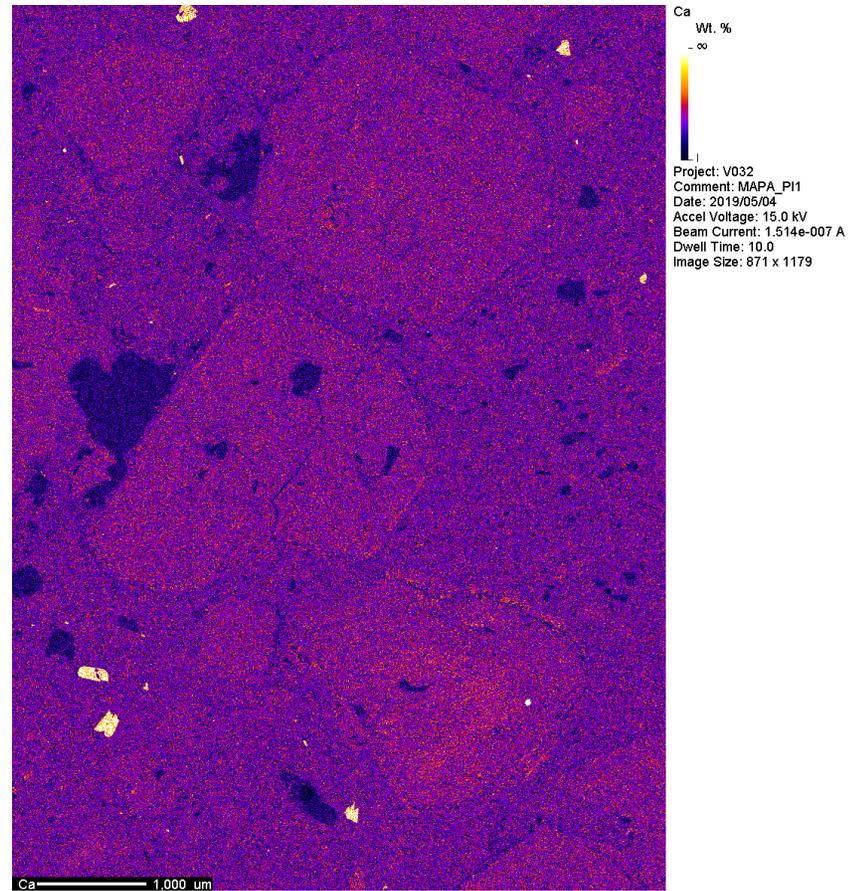
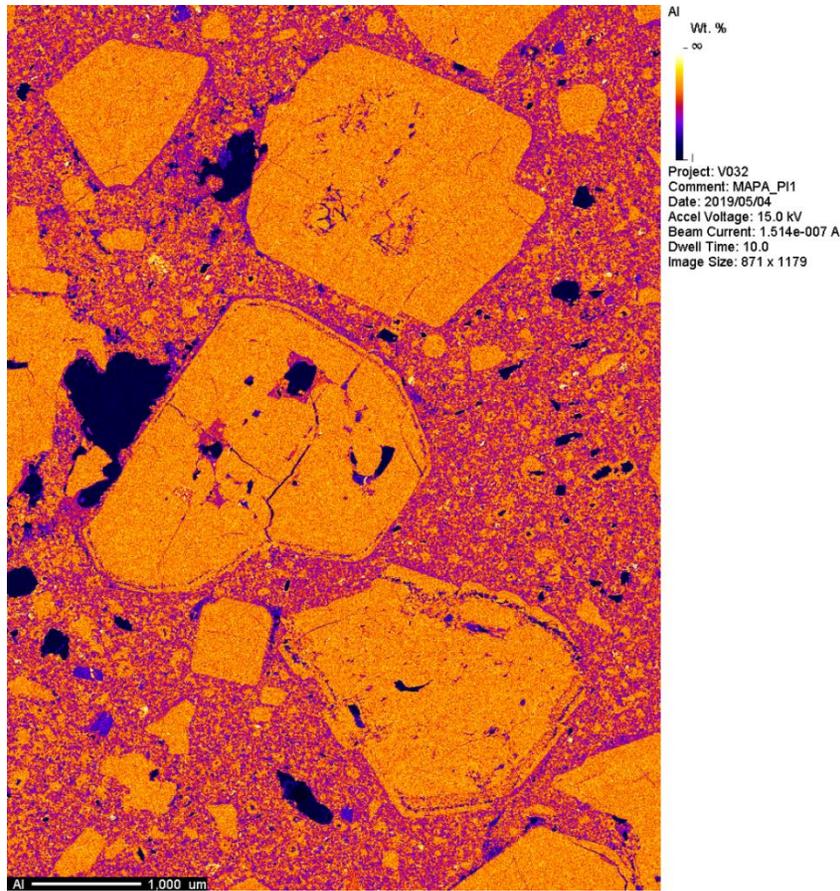
Plagioclasas												
Sector	Muestra	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SrO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	BaO	Total
Domo SW	VGP-09-PI1-0	9.844	0.008	18.732	67.332	-0.102	0.166	-0.018	4.235	0.308	0.276	100.781
	VGP-09-PI1-1	9.371	0.009	19.022	66.962	-0.094	0.259	0.001	4.407	0.236	0.305	100.478
Domo NW	VGP-06-Domo1-PI2-1	11.449	0.013	20.522	64.721	-0.104	0.957	0.003	1.305	0.156	0.096	99.118
	VGP-06-Domo1-PI2-2	9.47	0.011	19.421	64.805	-0.213	0.097	-0.031	4.891	0.323	0.247	99.021
	VGP-06-Domo1-PI3-1	9.605	0.001	19.294	65.031	-0.175	0.114	0.008	4.682	0.347	0.242	99.149
	VGP-06-Domo1-PI3-2	6.929	0.005	19.42	62.775	-0.02	0.125	-0.007	7.831	0.289	1.006	98.353
	VGP-06-Domo1-PI en Sanidina 1	10.368	0	21.984	61.835	0.323	1.977	-0.007	1.286	0.193	0.589	98.548
	VGP-06-Domo1-PI1-1	9.513	0.012	19.581	64.492	-0.042	0.269	-0.001	4.454	0.196	0.462	98.936
	VGP-06-Domo1-PI1-2	9.199	0.006	19.529	64.535	-0.055	0.205	-0.006	5.054	0.289	0.429	99.185
Domo Centro	VGP-07-DOMO2-PI1-1	9.656	-0.006	19.13	65.111	-0.194	0.066	0.01	4.932	0.48	0.228	99.413
	VGP-07-DOMO2-PI1-2	10.206	0.003	19.764	64.935	-0.073	0.255	-0.009	3.811	0.249	0.221	99.362
	VGP-07-DOMO2-PI1-3	10.145	-0.001	19.801	65.271	-0.122	0.233	-0.001	3.832	0.256	0.259	99.673
	VGP-07-DOMO2-PI1	11.674	-0.008	21.572	64.222	0.077	1.613	-0.019	1.14	0.146	0.263	100.68
	VGP-07-DOMO2-PI2	11.68	-0.002	20.474	65.277	-0.112	0.803	0.004	1.378	0.18	0.088	99.77
Quebrada Honda	VGP-05-DOMO2-PI1-1	10.01	0.001	17.802	67.276	-0.224	0.136	-0.01	4.18	0.226	0.205	99.602
	VGP-05-DOMO2-PI1-2	9.778	-0.009	17.437	67.846	-0.237	0.084	-0.016	4.804	0.457	0.202	100.346
	VGP-05-DOMO2-PI1-3	9.394	-0.011	17.598	68.306	-0.289	0.077	0.018	4.87	0.445	0.14	100.548

- Resultados análisis química mineral realizados en feldespatos para el sector Alto de los Godos. Unidades % wt.

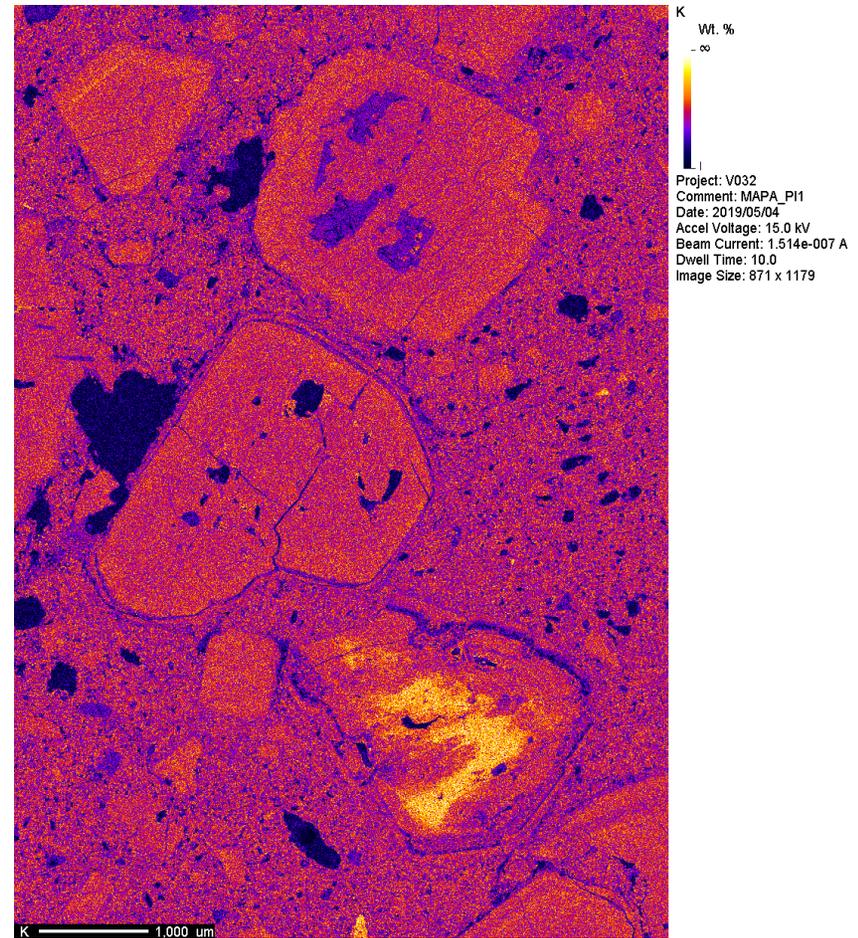
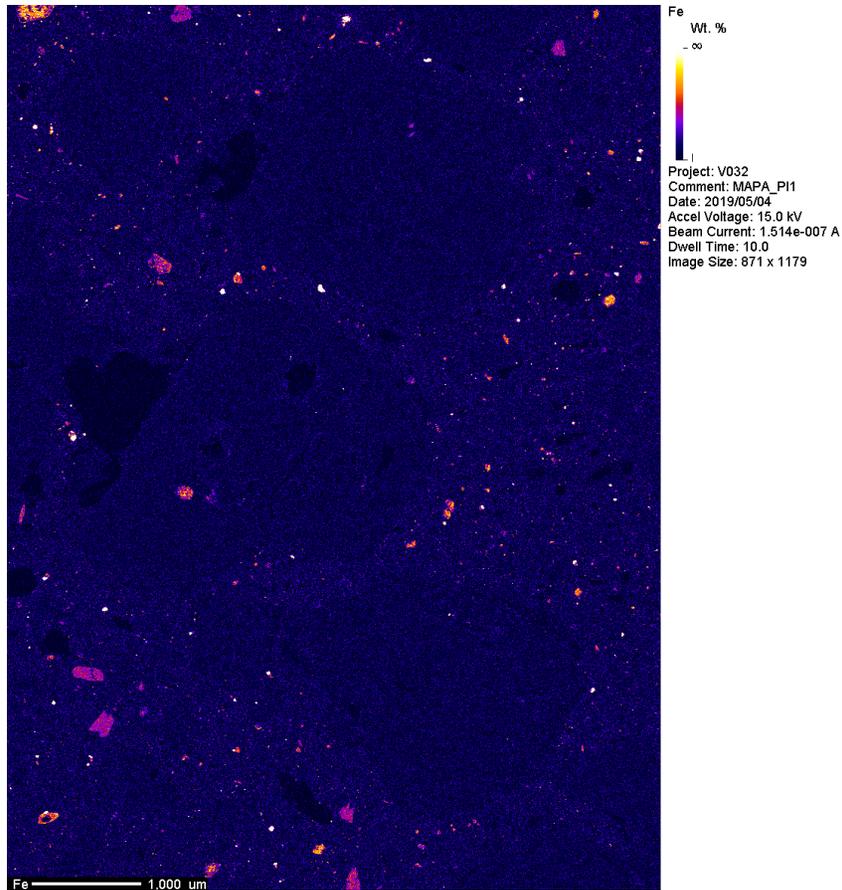
Feldespatos												
Sector	Muestra	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SrO	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	BaO	Total
Domo SW	VGP-09 Feld1-1	8.746	0.006	18.739	66.831	-0.13	0.249	-0.007	4.91	0.232	0.343	99.919
	VGP-09 Feld1-2	9.647	-0.007	18.67	67.317	-0.112	0.17	0.023	4.171	0.333	0.176	100.388
	VGP-09-Feld1-2	9.414	0.004	18.809	67.104	-0.076	0.287	0.011	4.362	0.228	0.282	100.425
	VGP-09-Feld1-3	9.657	0.014	18.941	67.134	-0.078	0.225	-0.026	4.164	0.27	0.366	100.667
Domo NW	VGP-06-Domo1-Sanidina1	9.74	0.001	19.621	64.95	-0.083	0.292	-0.005	4.373	0.287	0.359	99.535
Domo Centro	VGP-07-DOMO2-Sanidina1-1	9.828	0	19.635	65.057	-0.079	0.23	-0.02	4.403	0.236	0.361	99.651
	VGP-07-DOMO2-Sanidina1-1	9.721	0.002	19.77	65.571	-0.054	0.196	-0.003	4.667	0.301	0.424	100.595
	VGP-07-DOMO2-Sanidina de P13	10.045	0.008	19.988	65.181	-0.088	0.255	-0.002	4.169	0.21	0.449	100.215
Quebrada Honda	VGP-05-DOMO2-Feld1-1	9.737	0	18.018	67.495	-0.083	0.236	-0.021	4.672	0.189	0.396	100.639
	VGP-05-DOMO2-Feld1-2	9.802	0.004	17.672	68.113	-0.201	0.094	-0.024	4.559	0.355	0.233	100.607
	VGP-05-DOMO2-Feld2-1	9.679	0.009	18.083	67.167	-0.099	0.256	-0.016	4.15	0.239	0.341	99.809
	VGP-05-DOMO2-Feld2-2	9.712	-0.013	17.714	68.28	-0.237	0.091	0.006	4.76	0.396	0.178	100.887

E. Anexo: mapas composicionales, imágenes electrones retrodispersados (BSE) y puntos con espectroscopía de energía dispersiva (EDS)

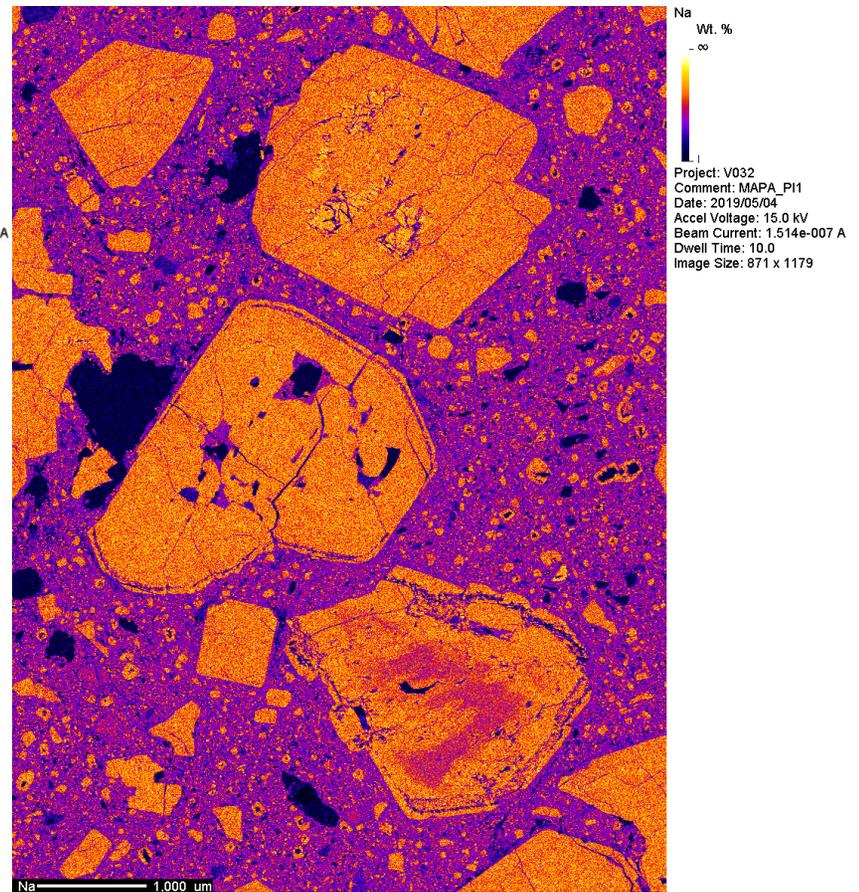
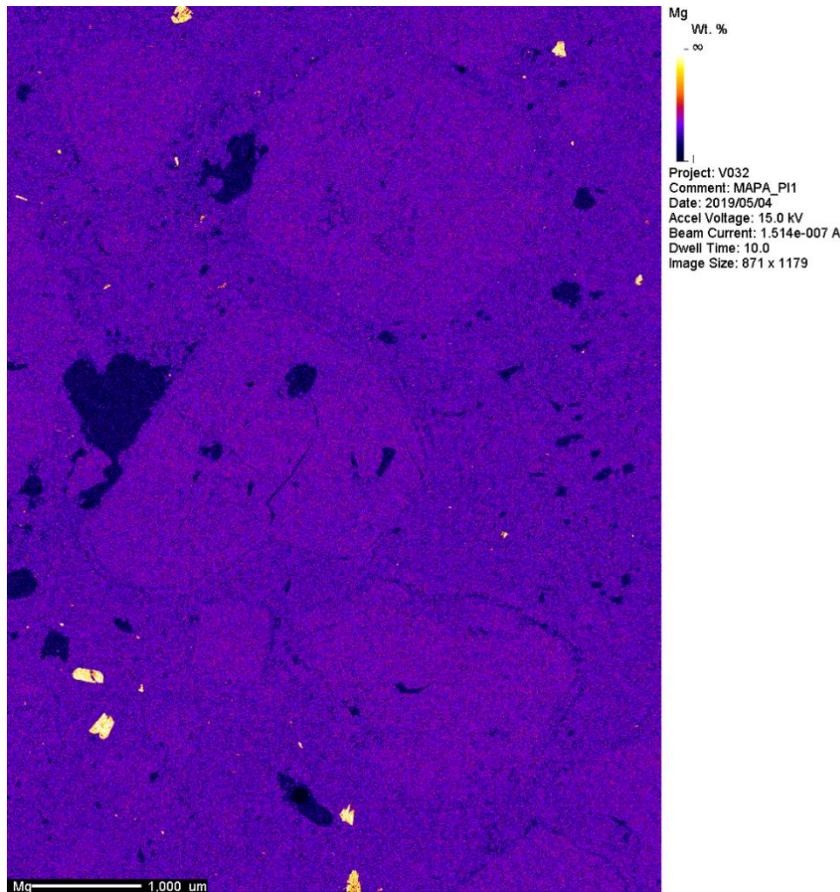
- Mapas Composicional de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos



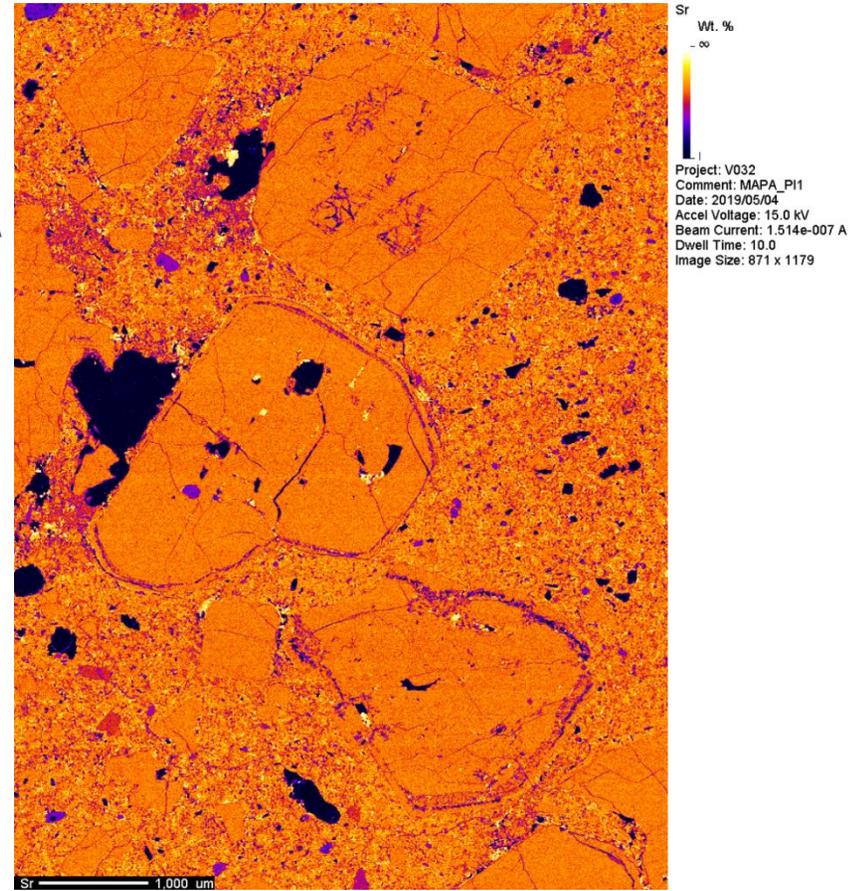
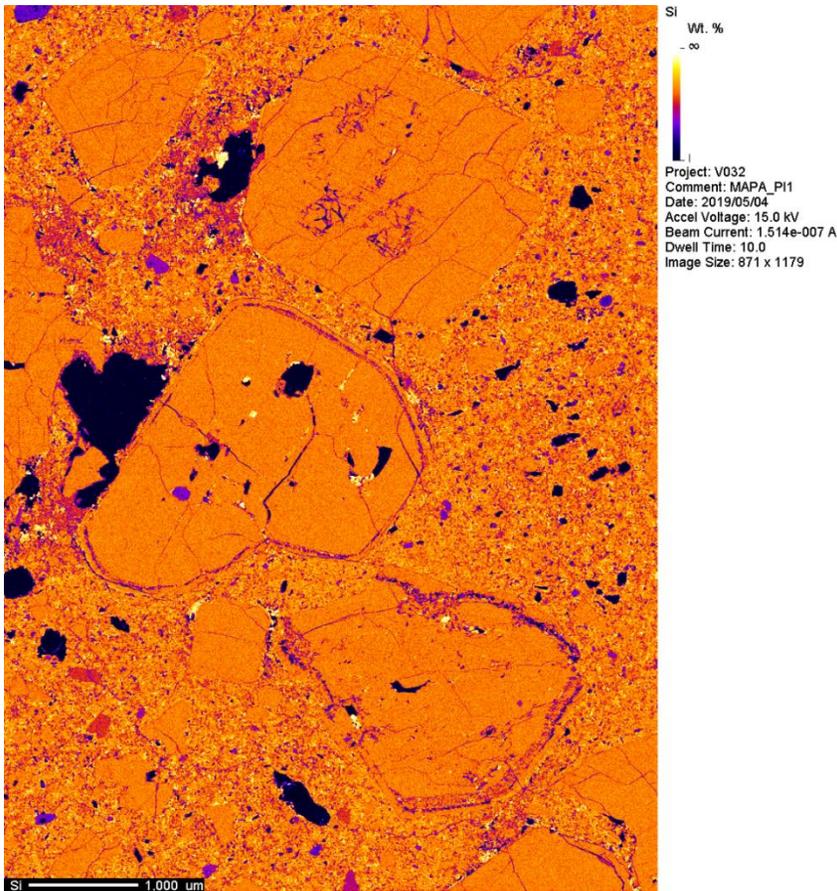
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



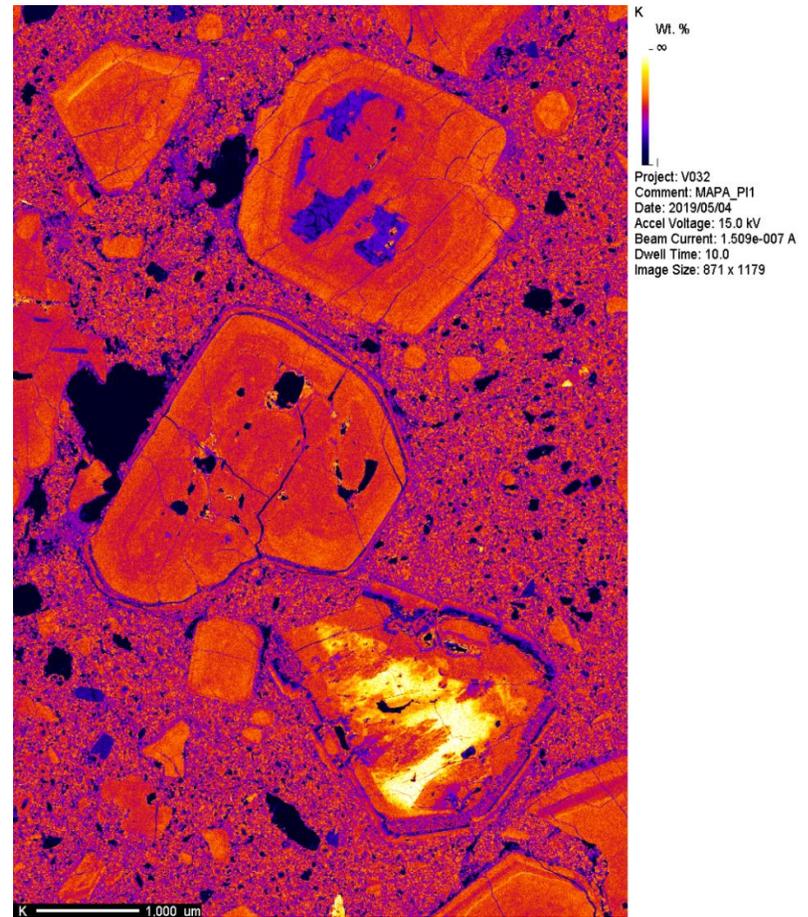
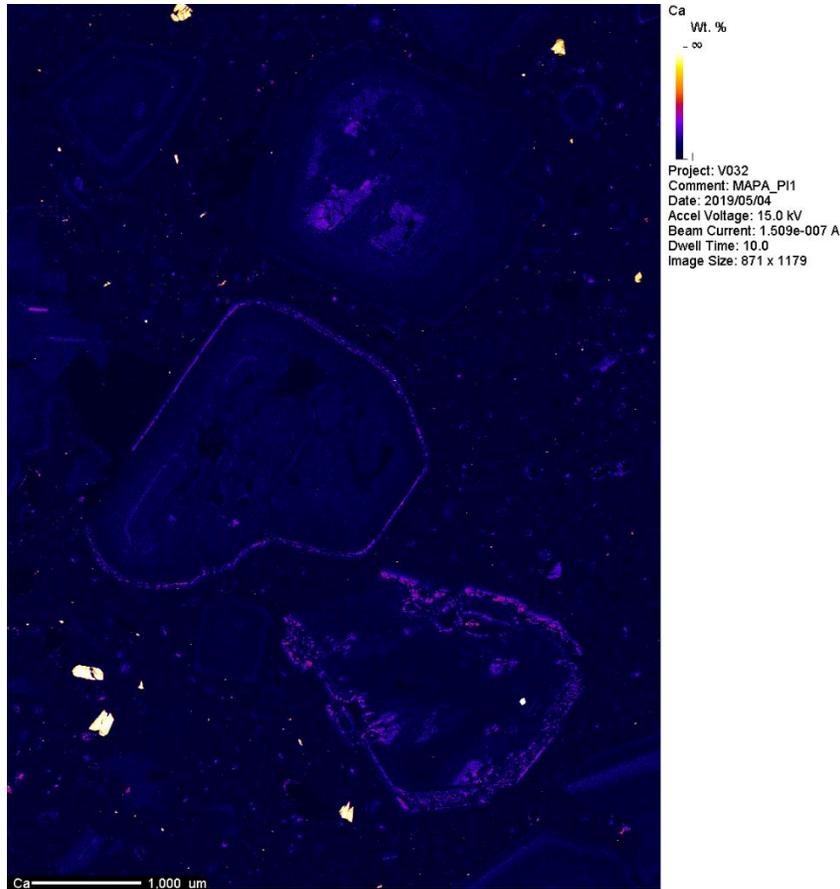
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



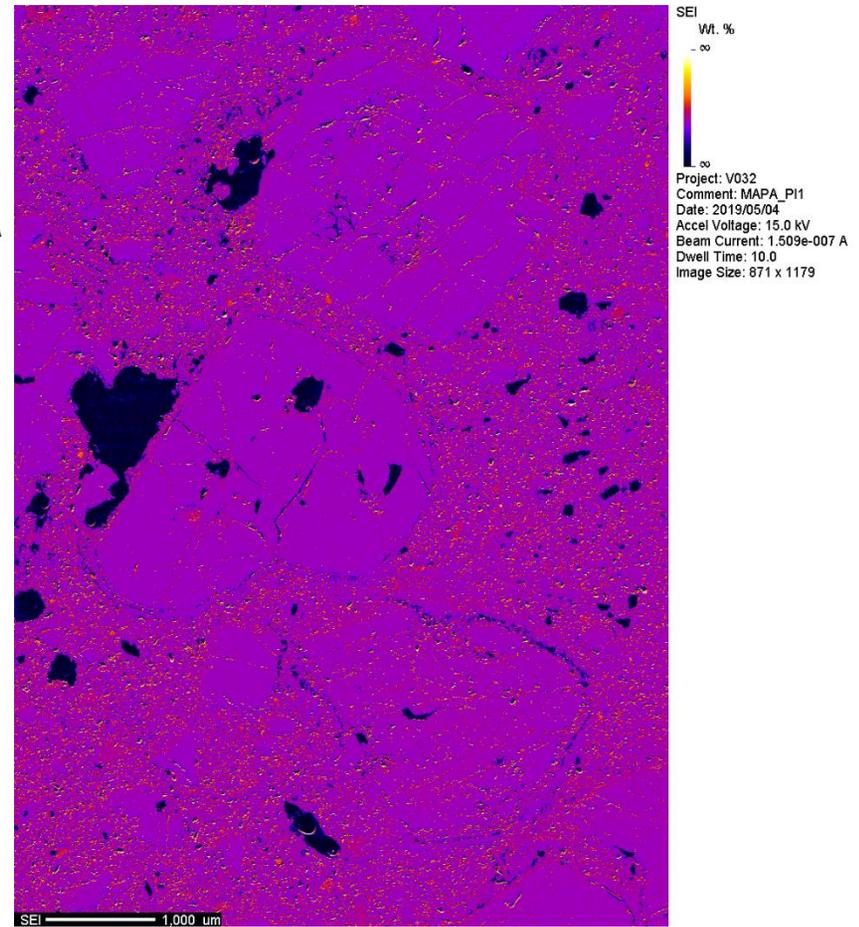
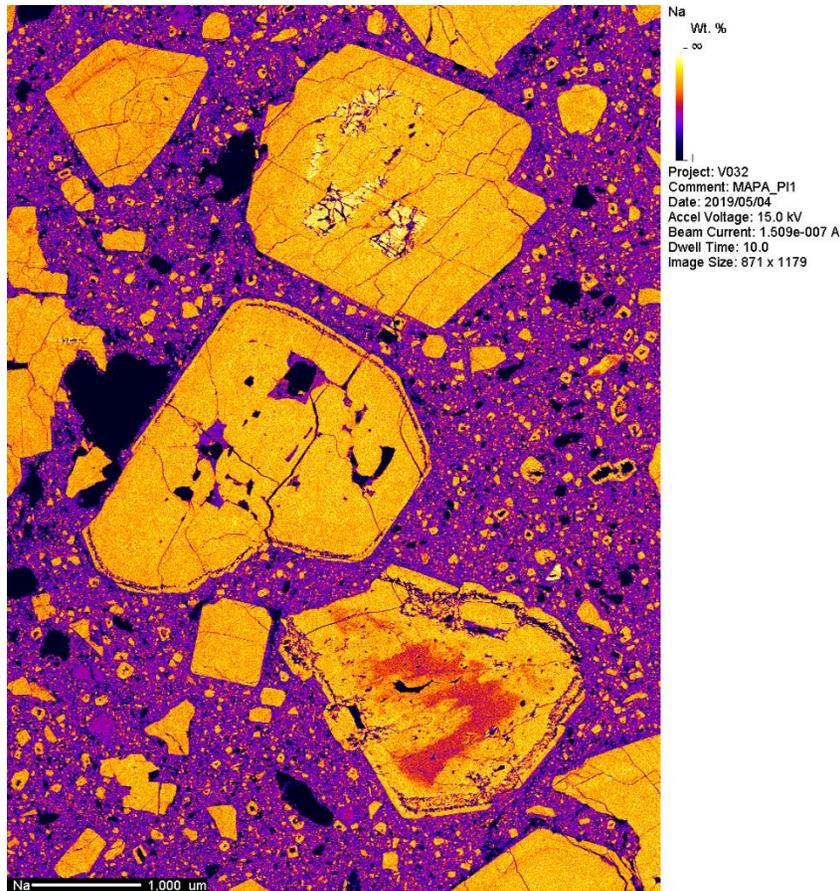
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



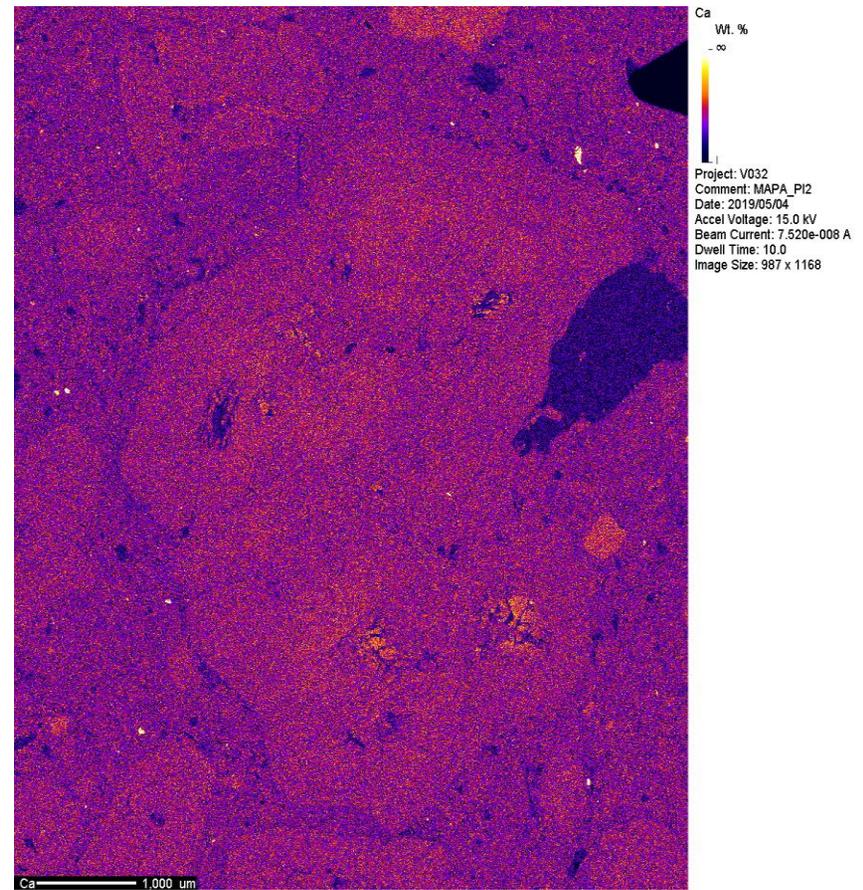
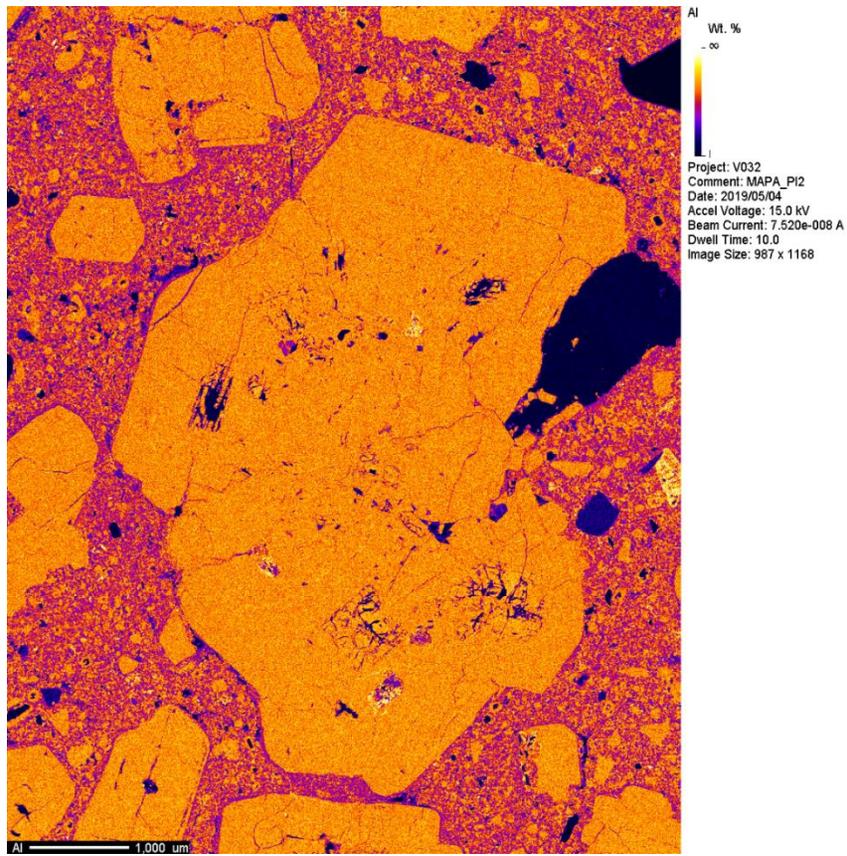
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



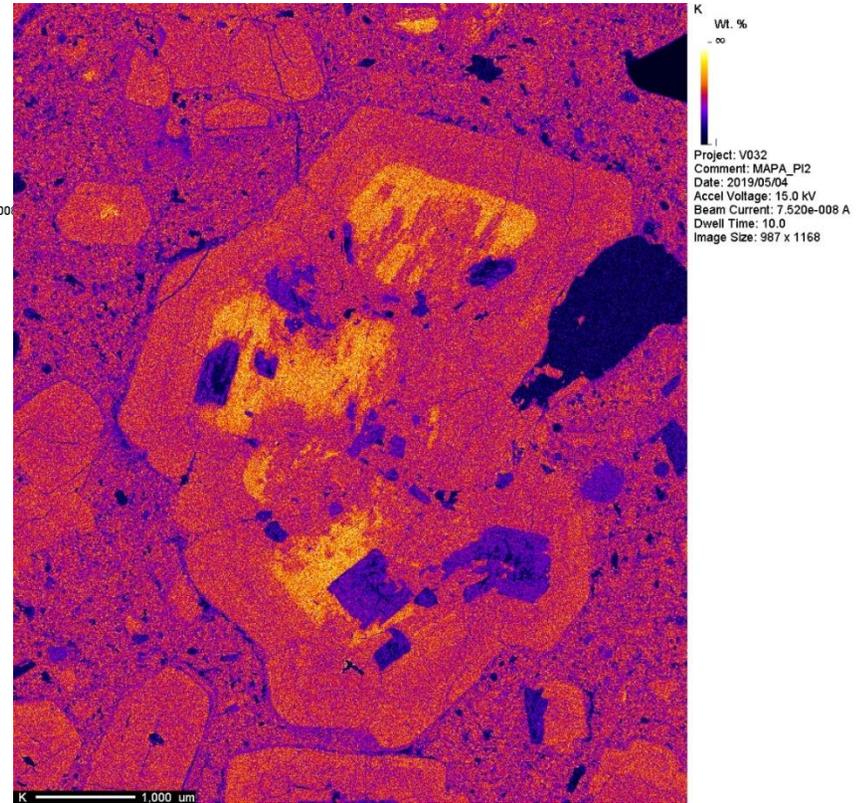
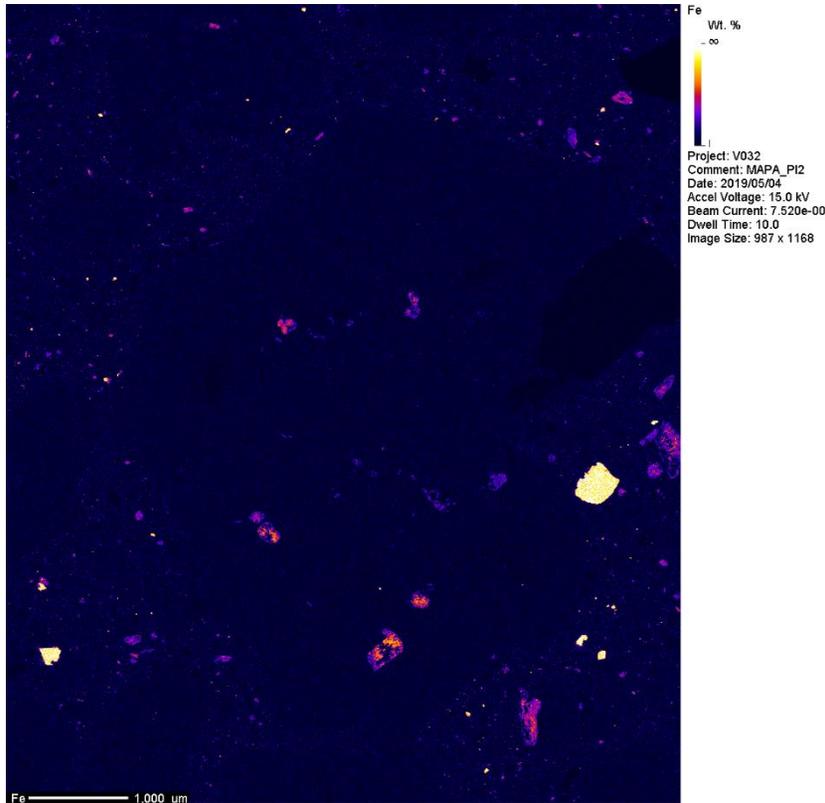
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



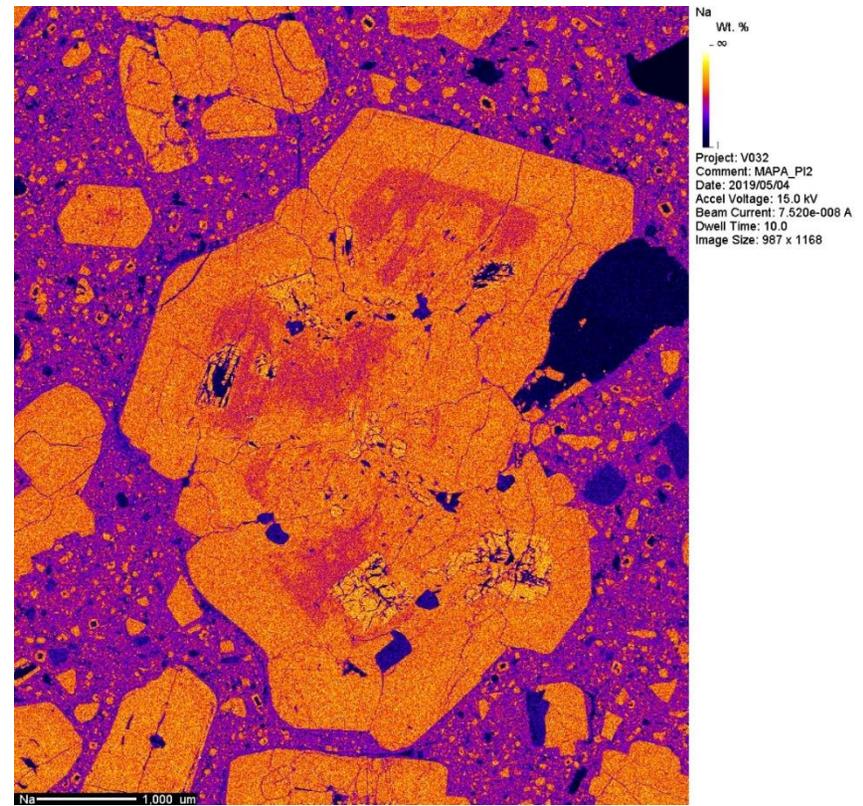
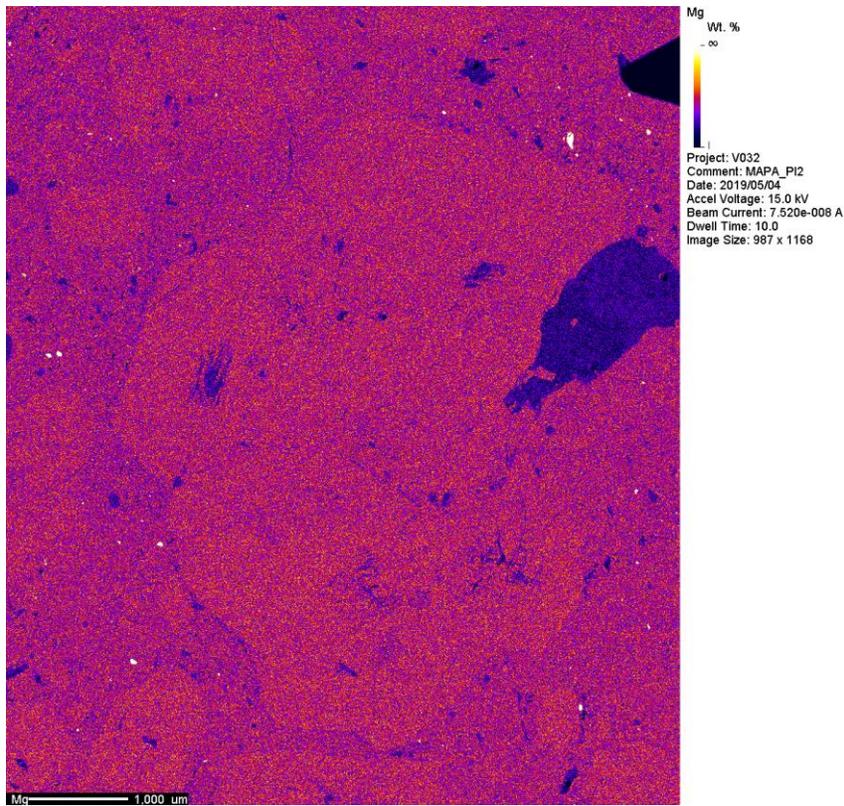
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



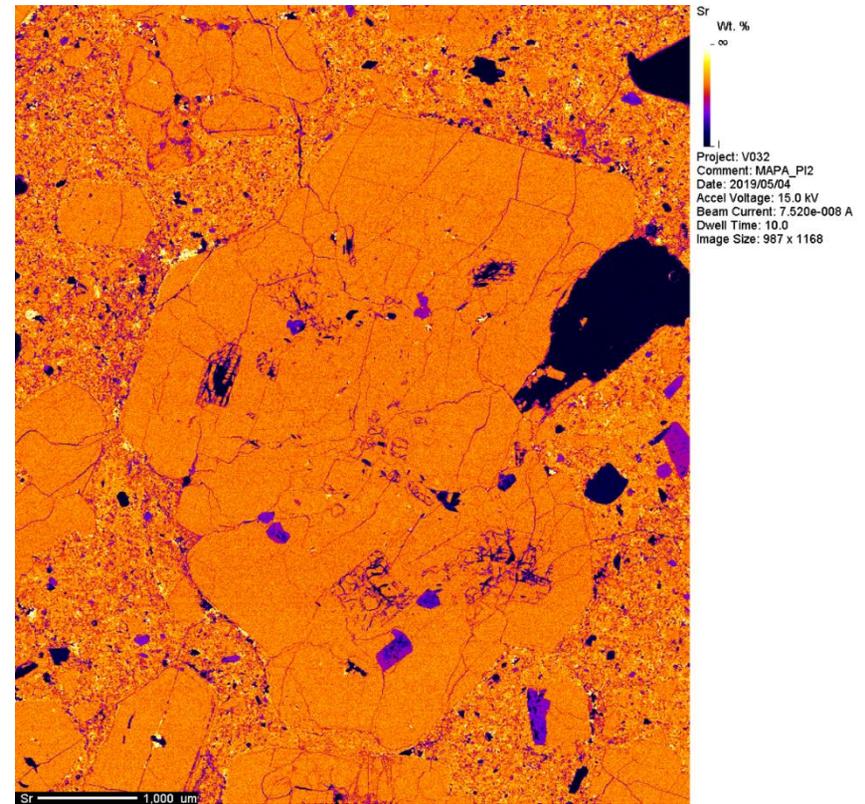
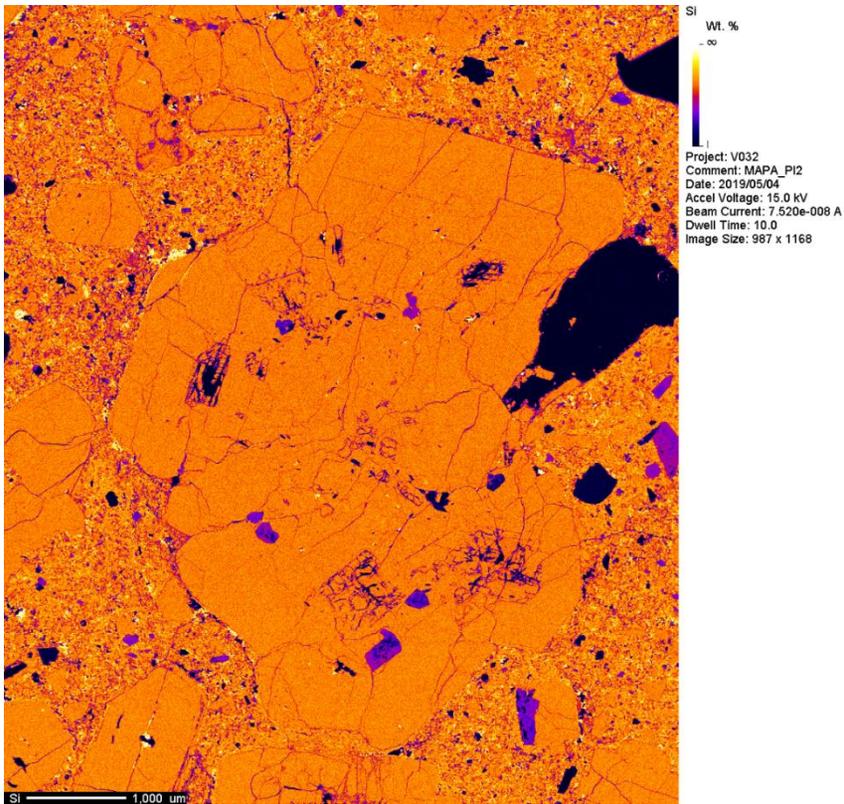
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



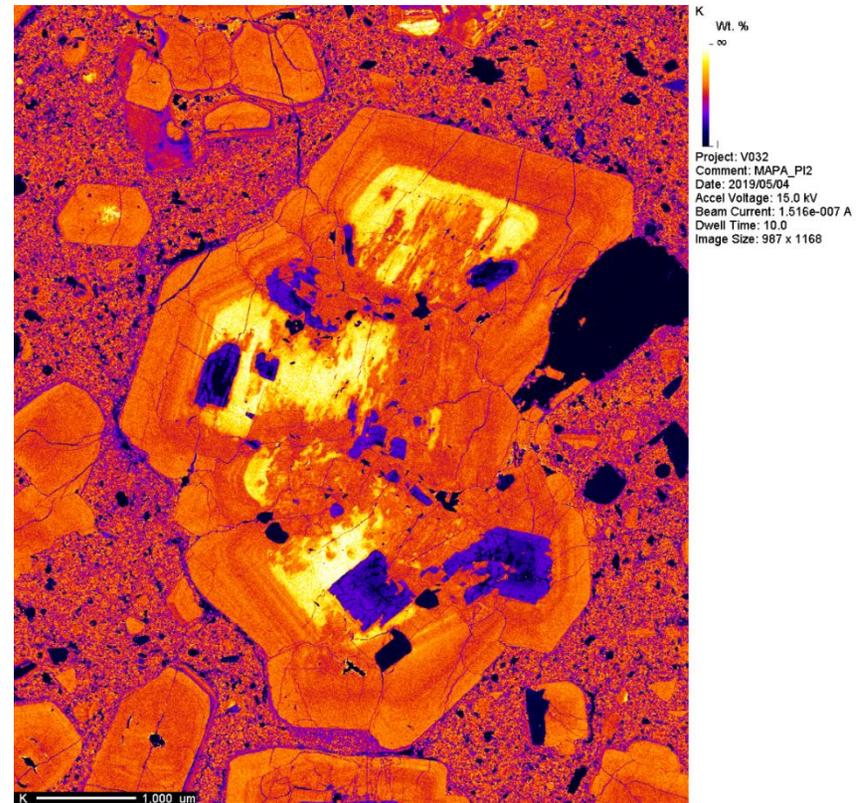
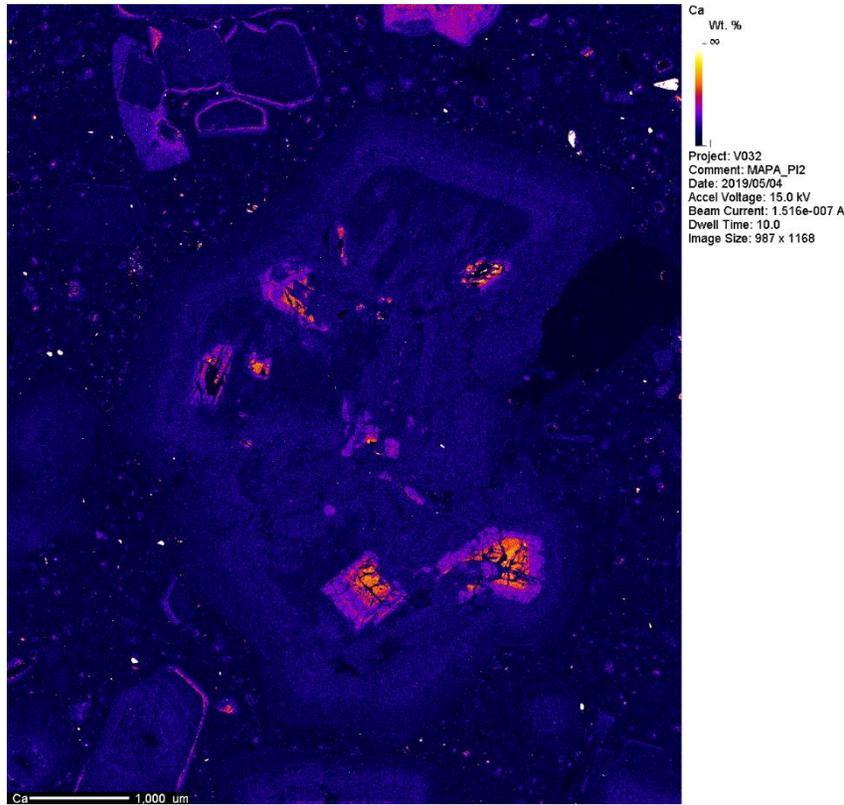
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



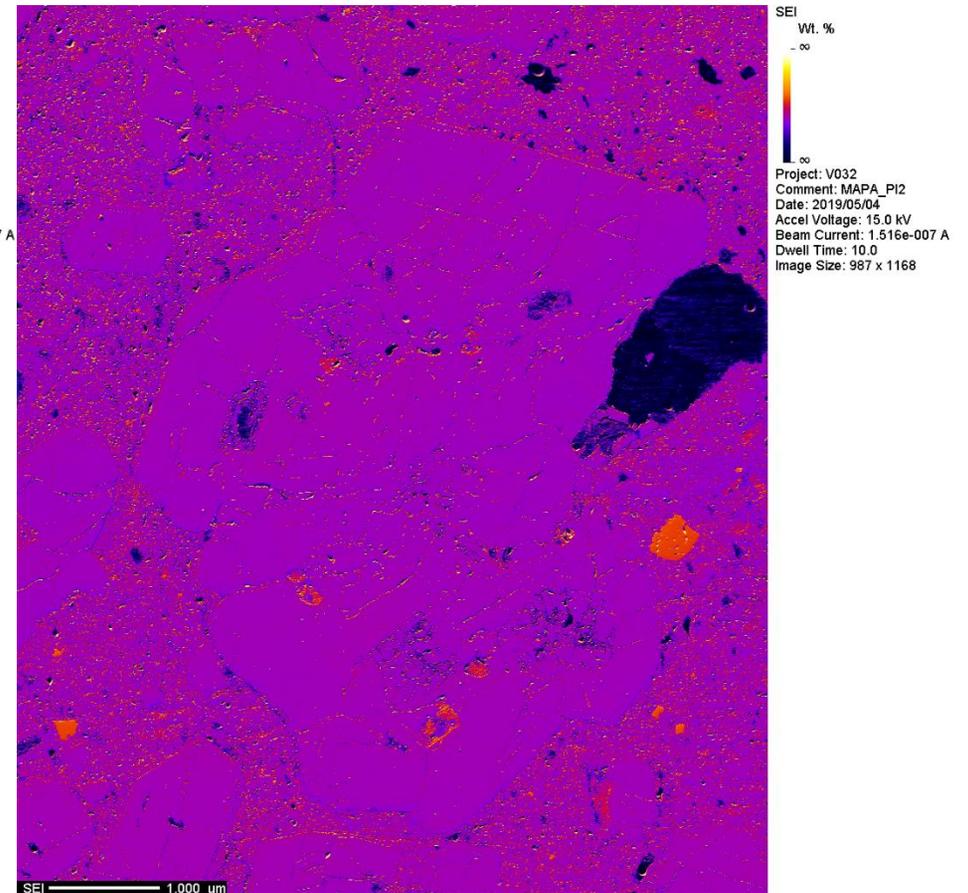
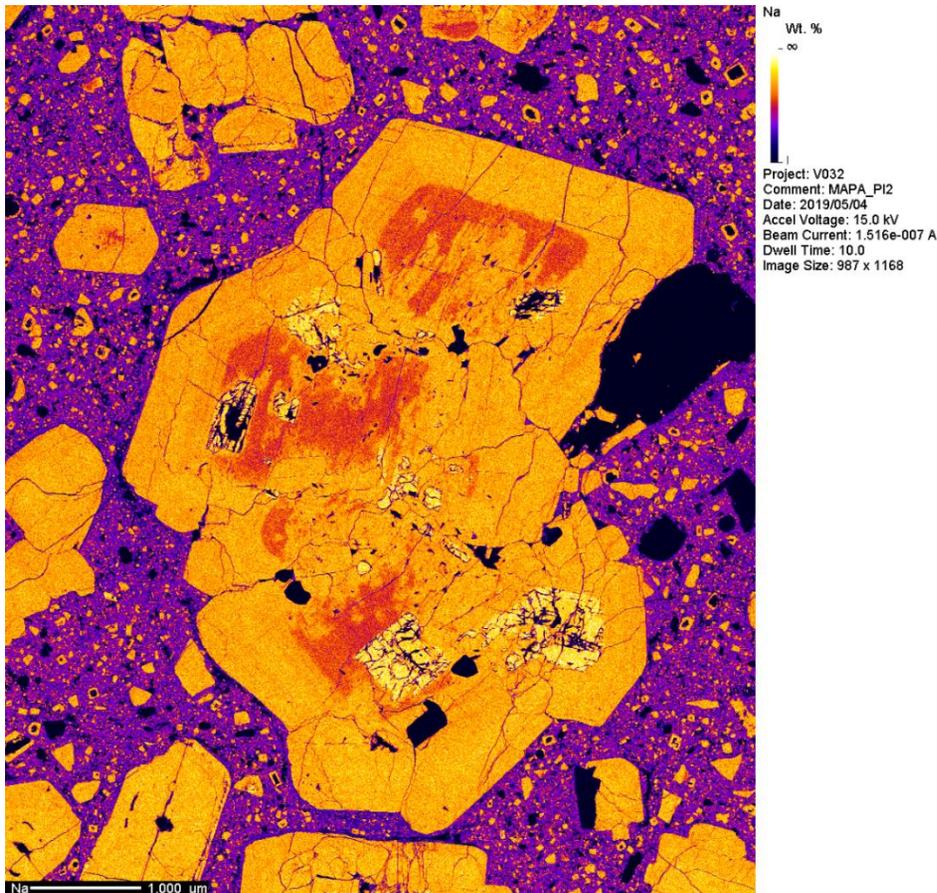
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



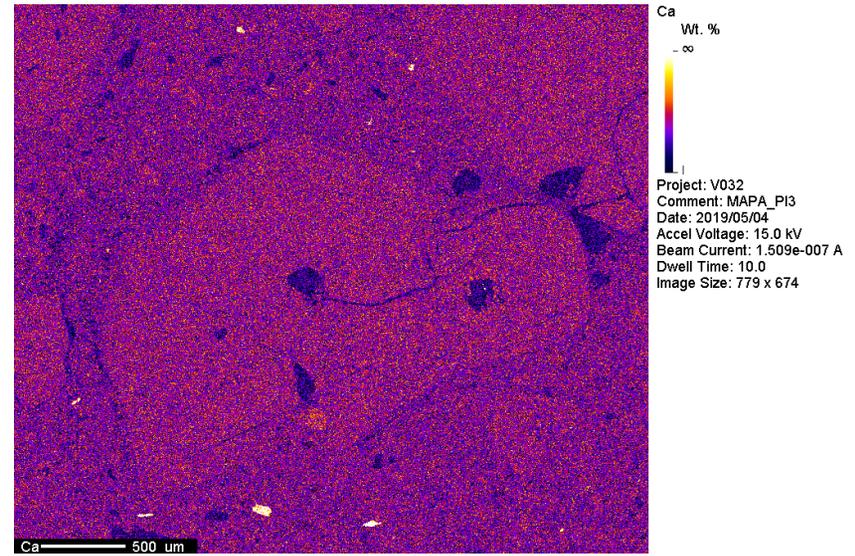
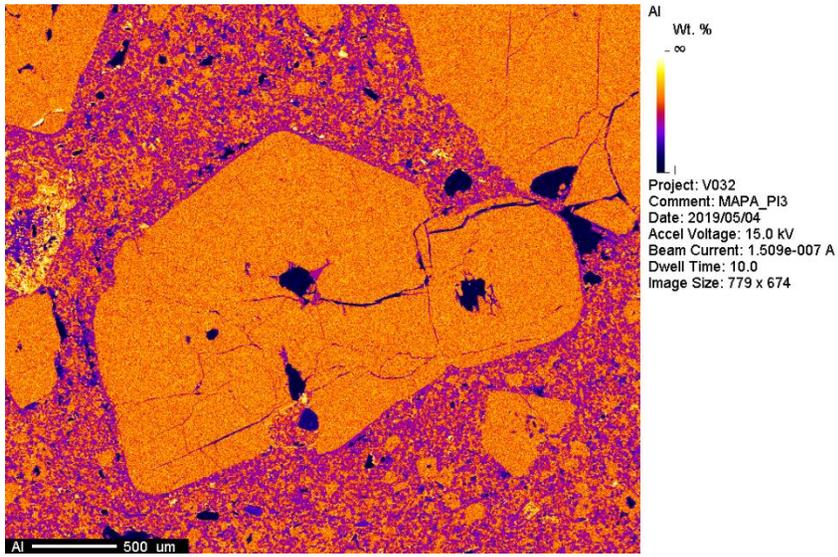
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



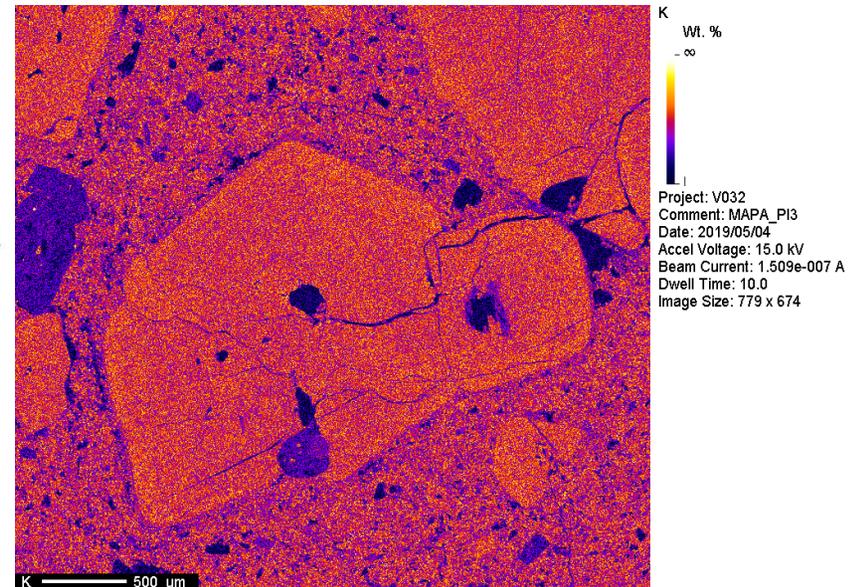
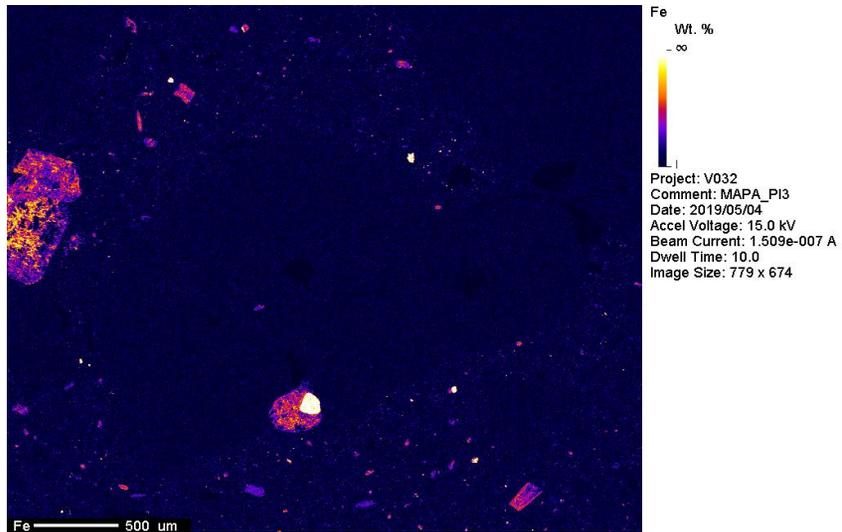
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



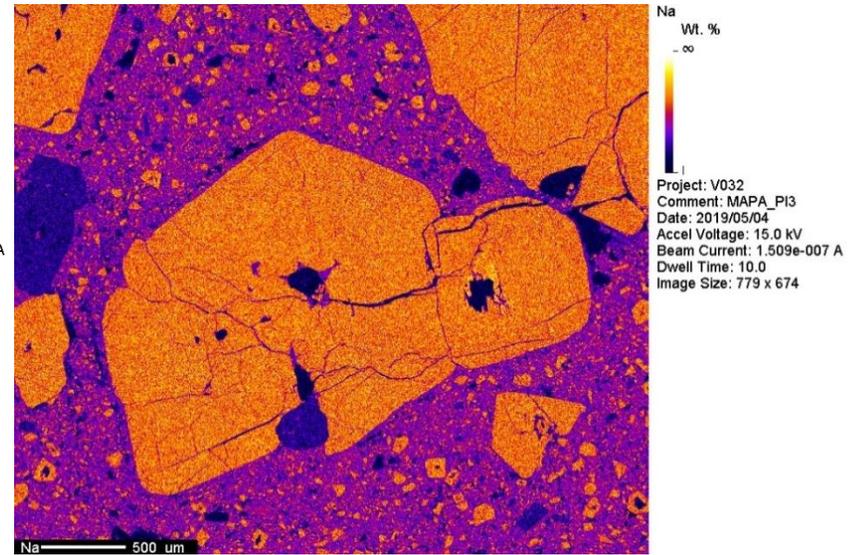
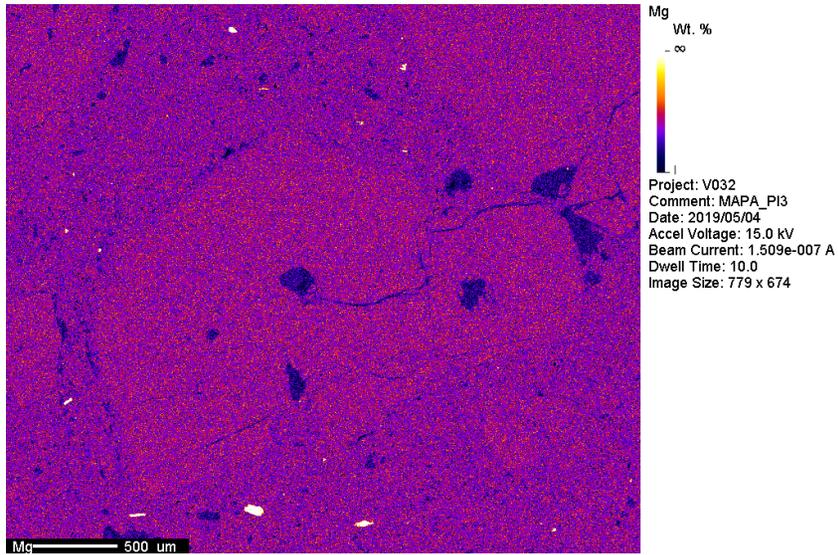
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



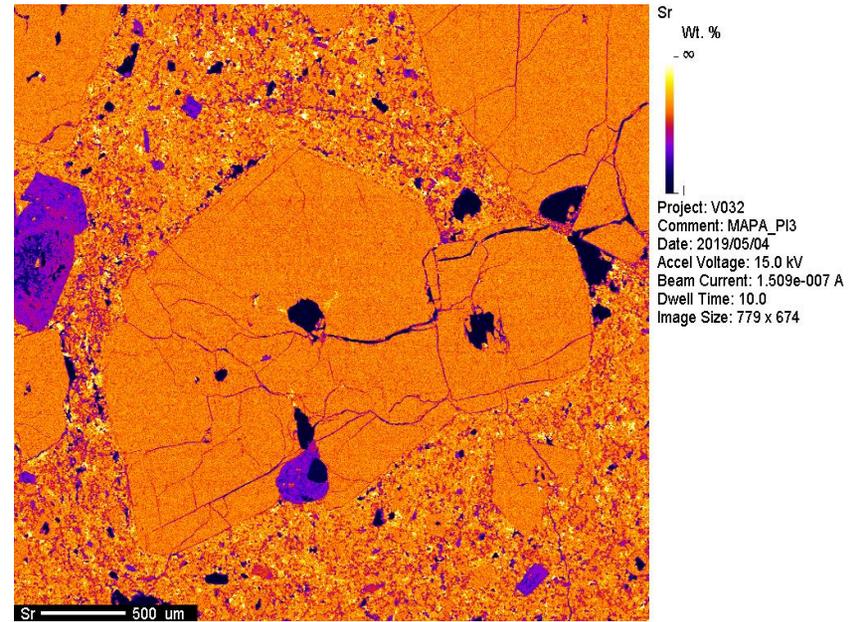
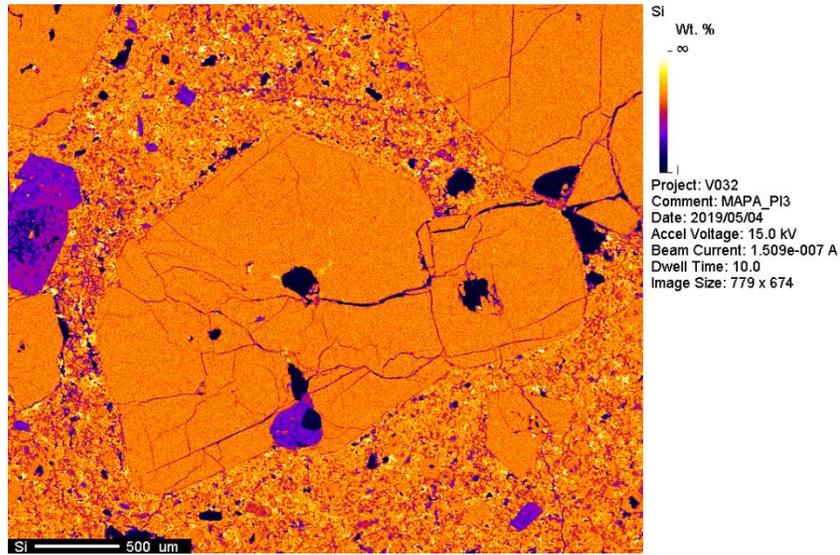
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



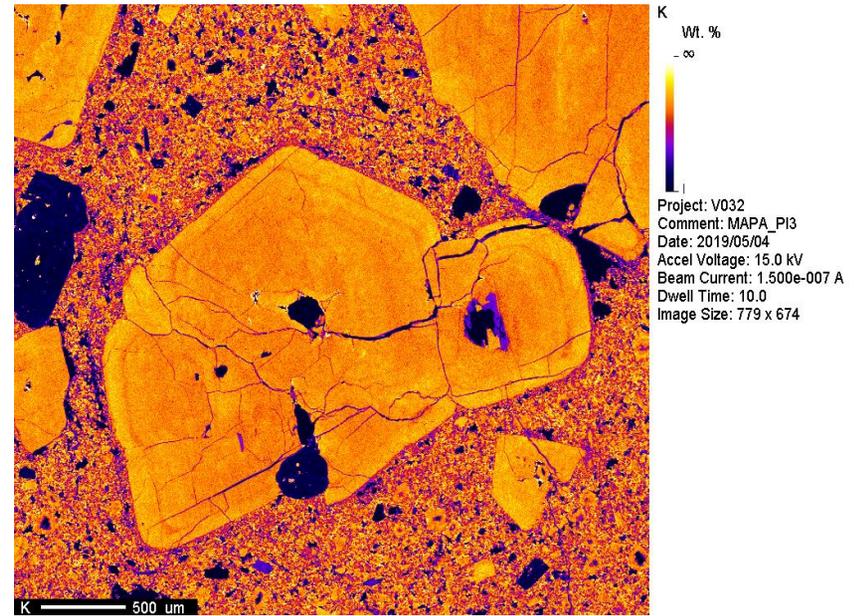
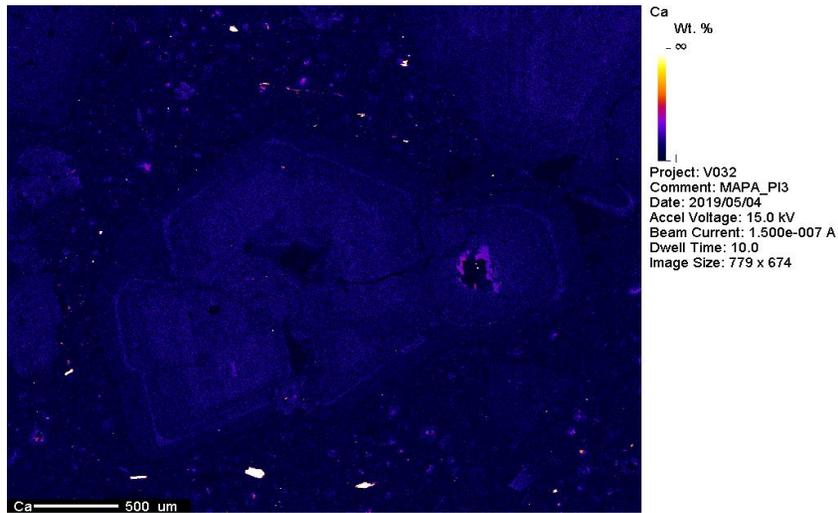
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



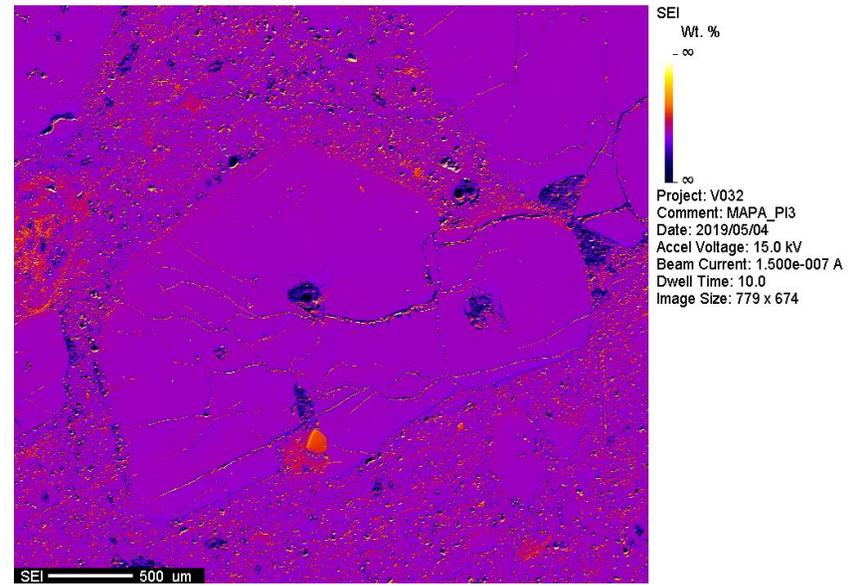
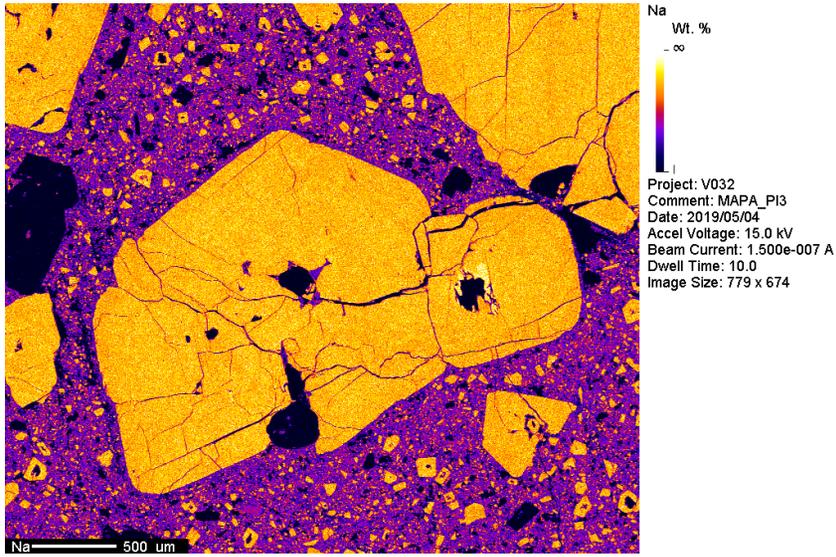
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



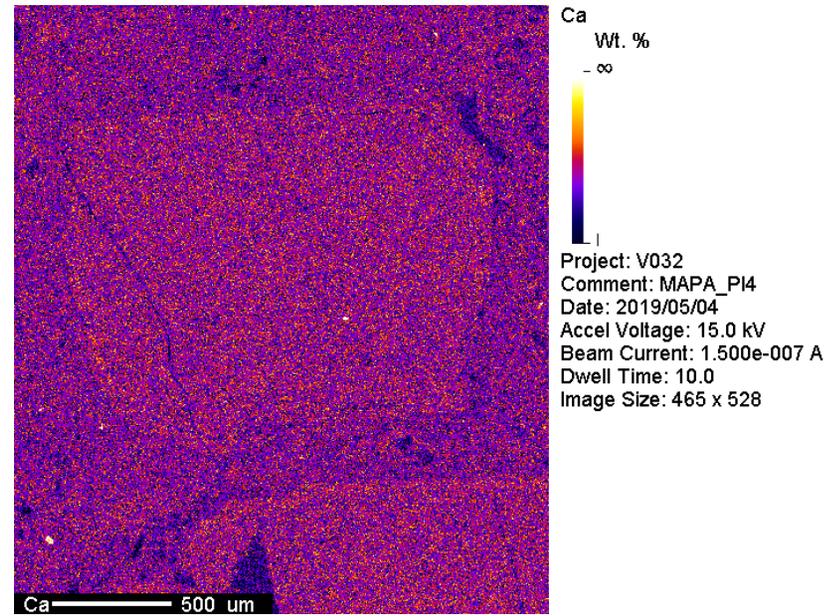
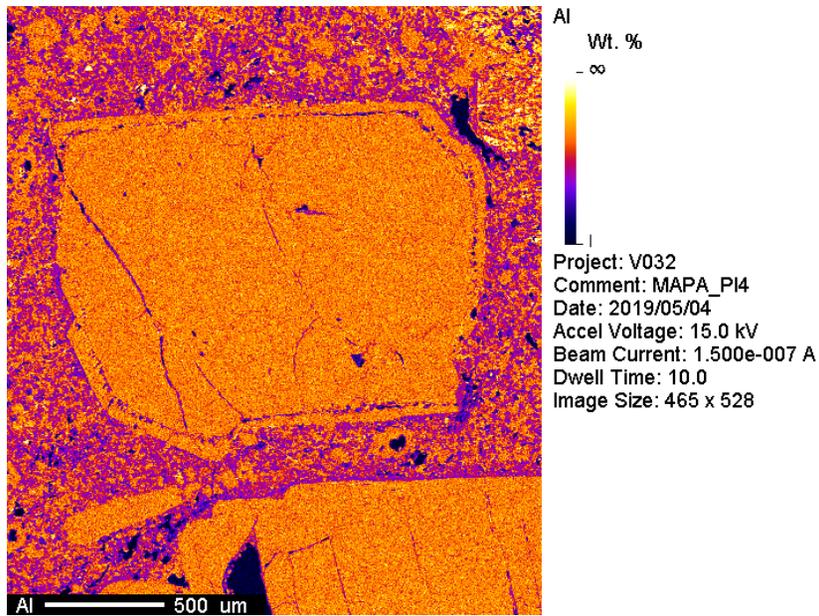
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



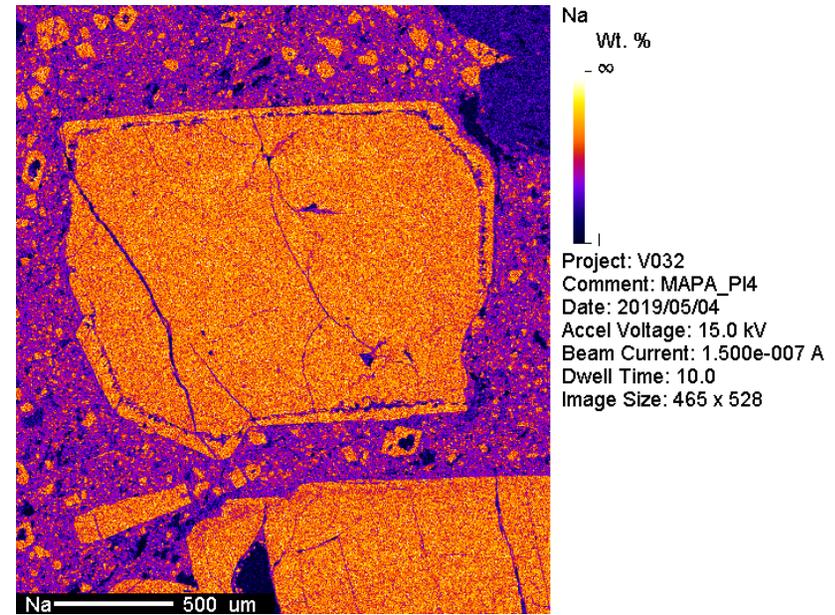
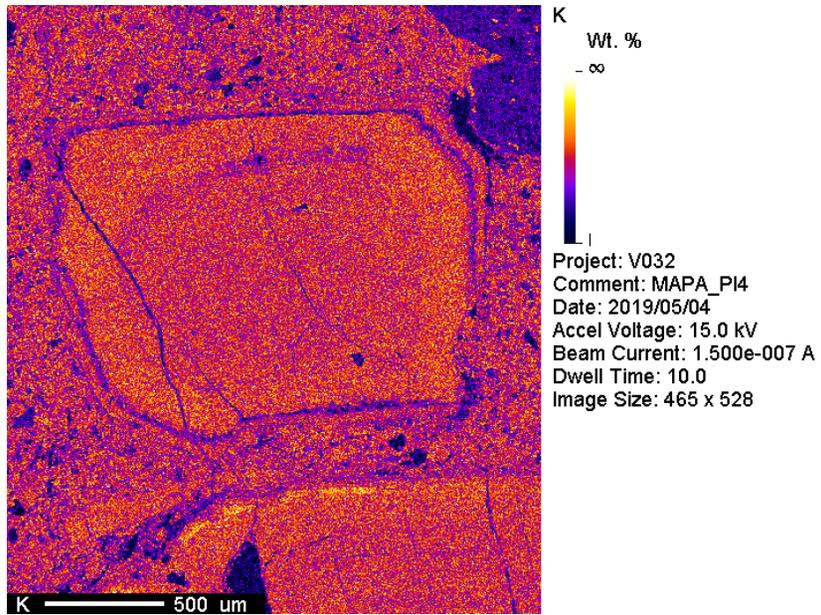
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



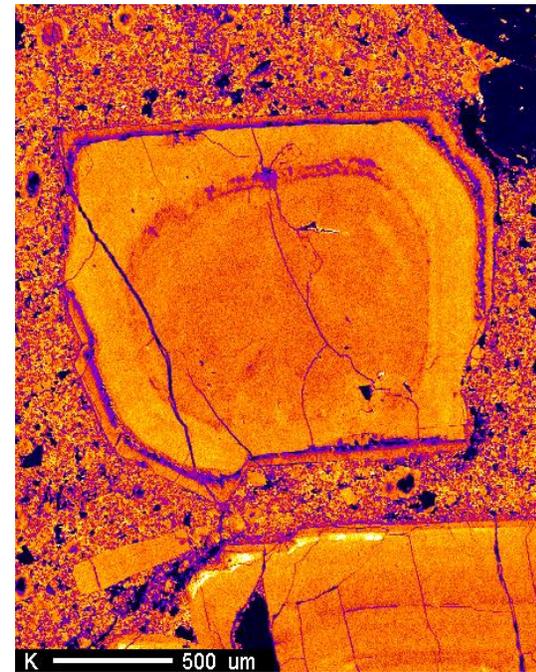
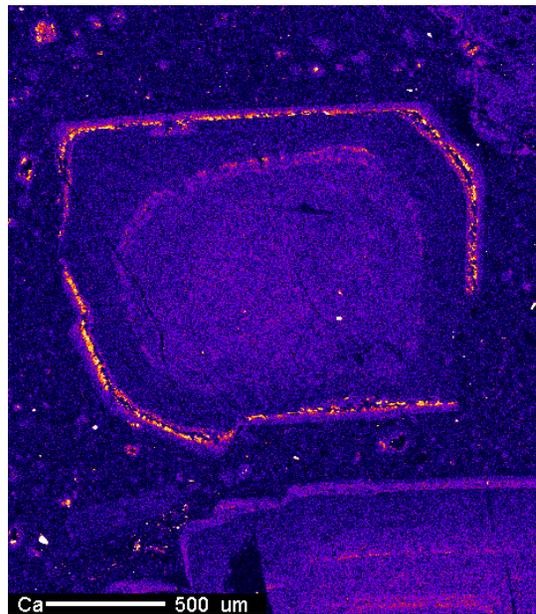
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



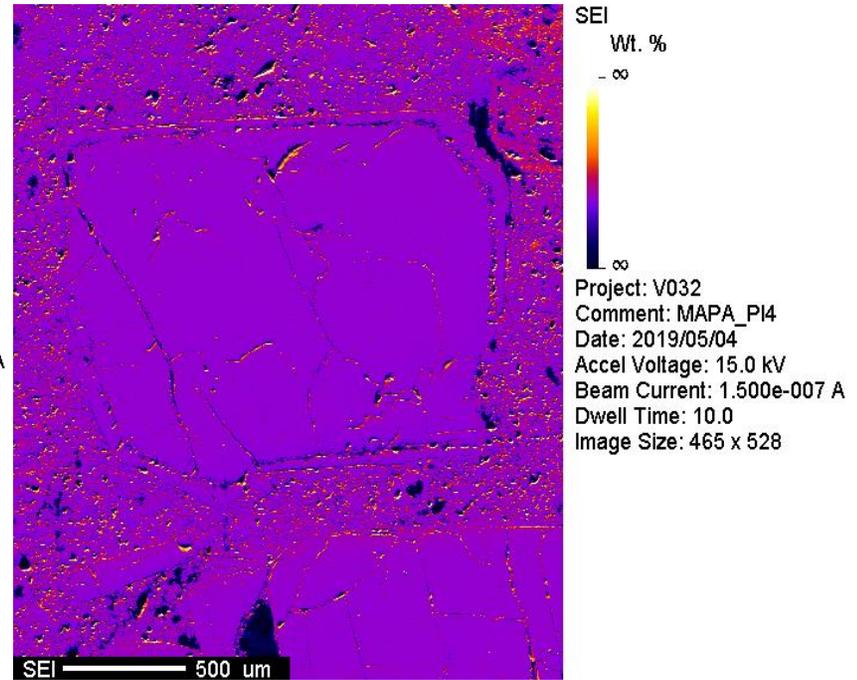
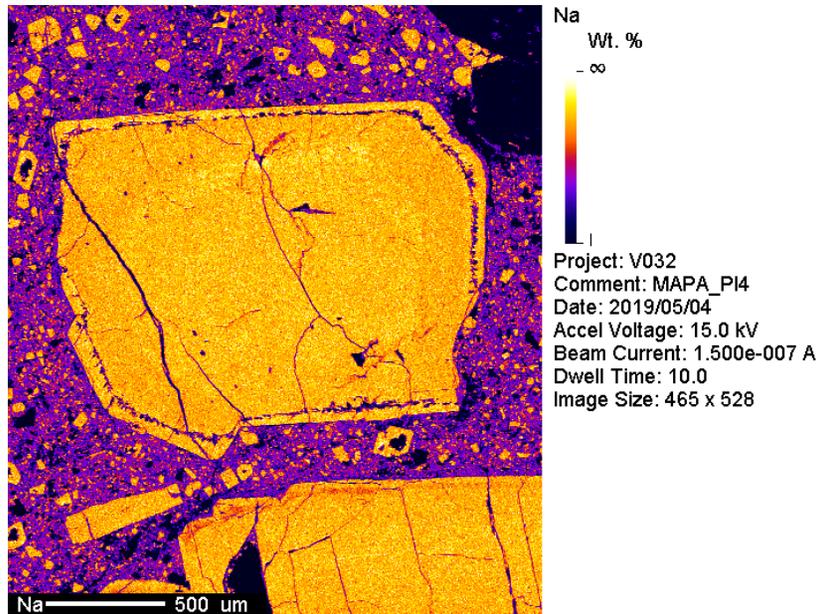
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



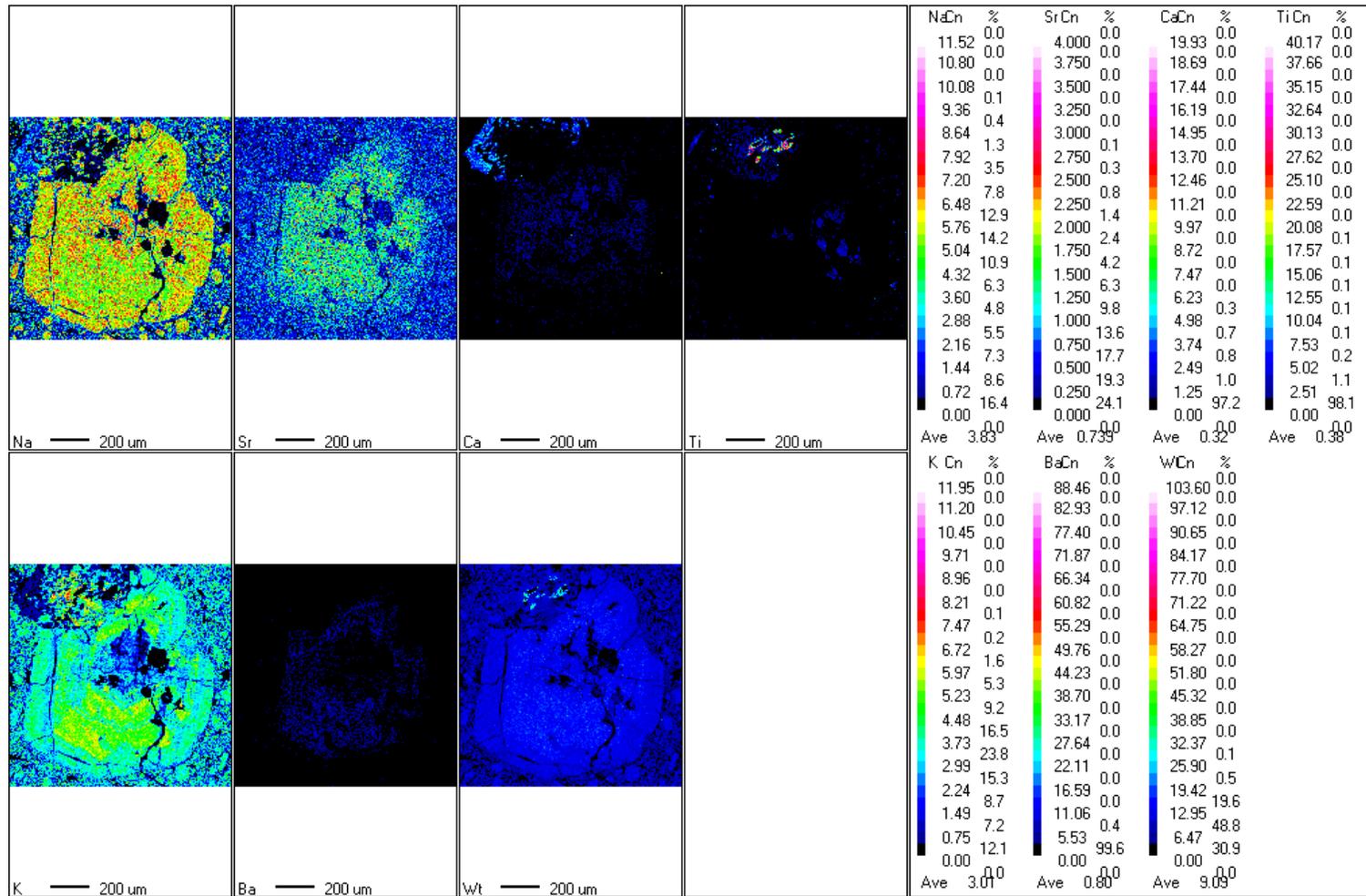
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



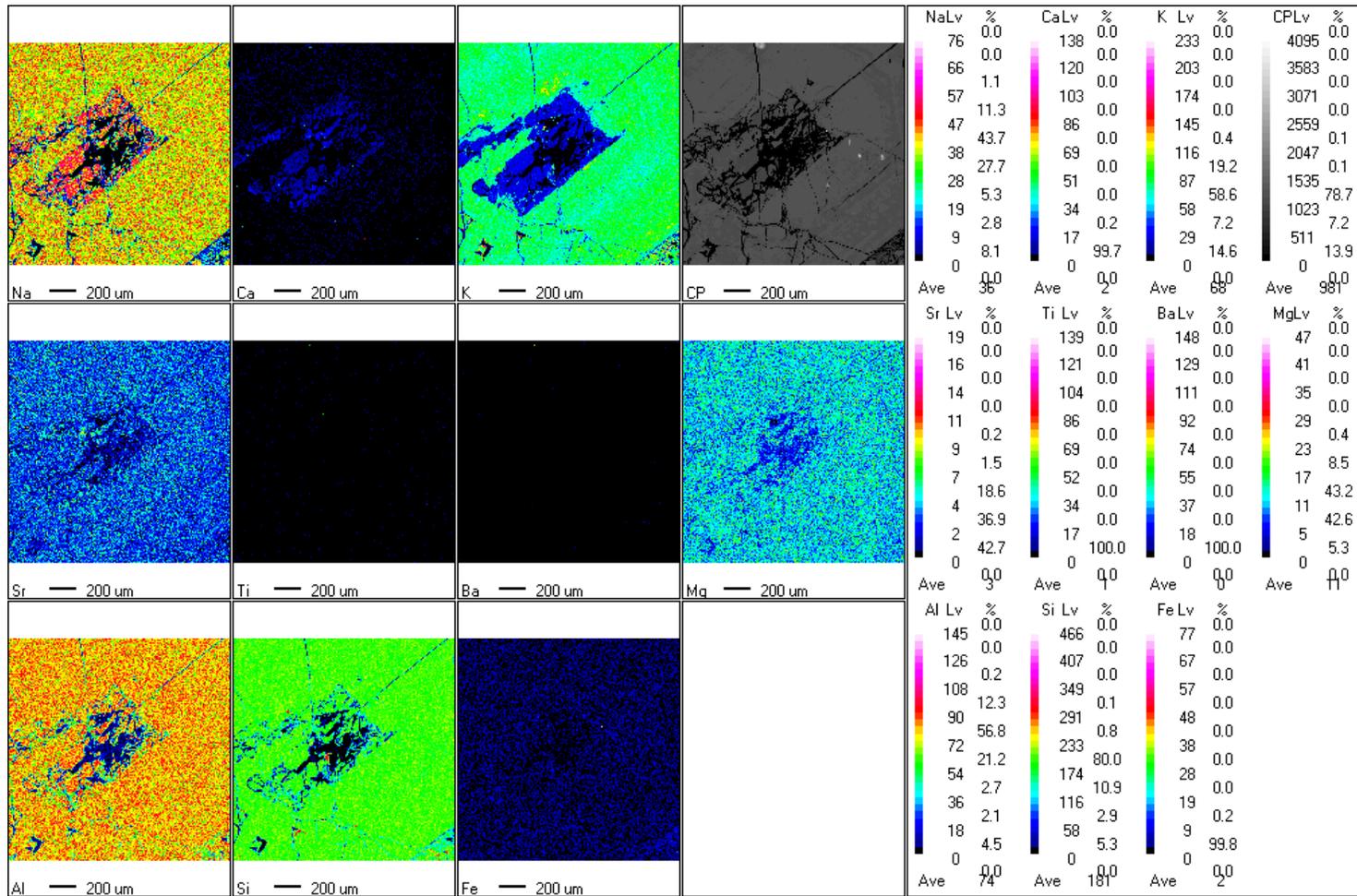
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



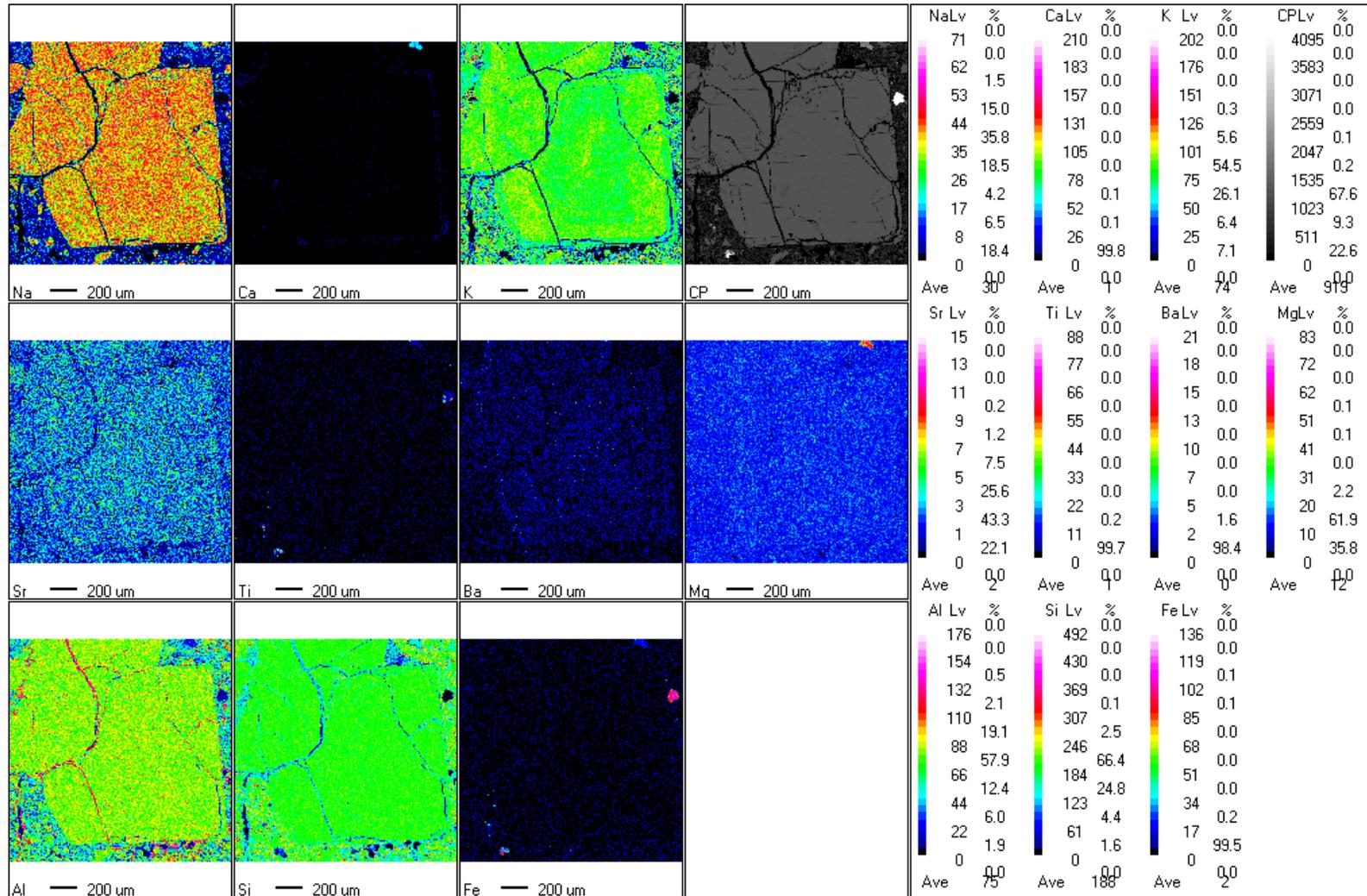
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato muestra VGP-09 Domo SE Alto de los Godos.



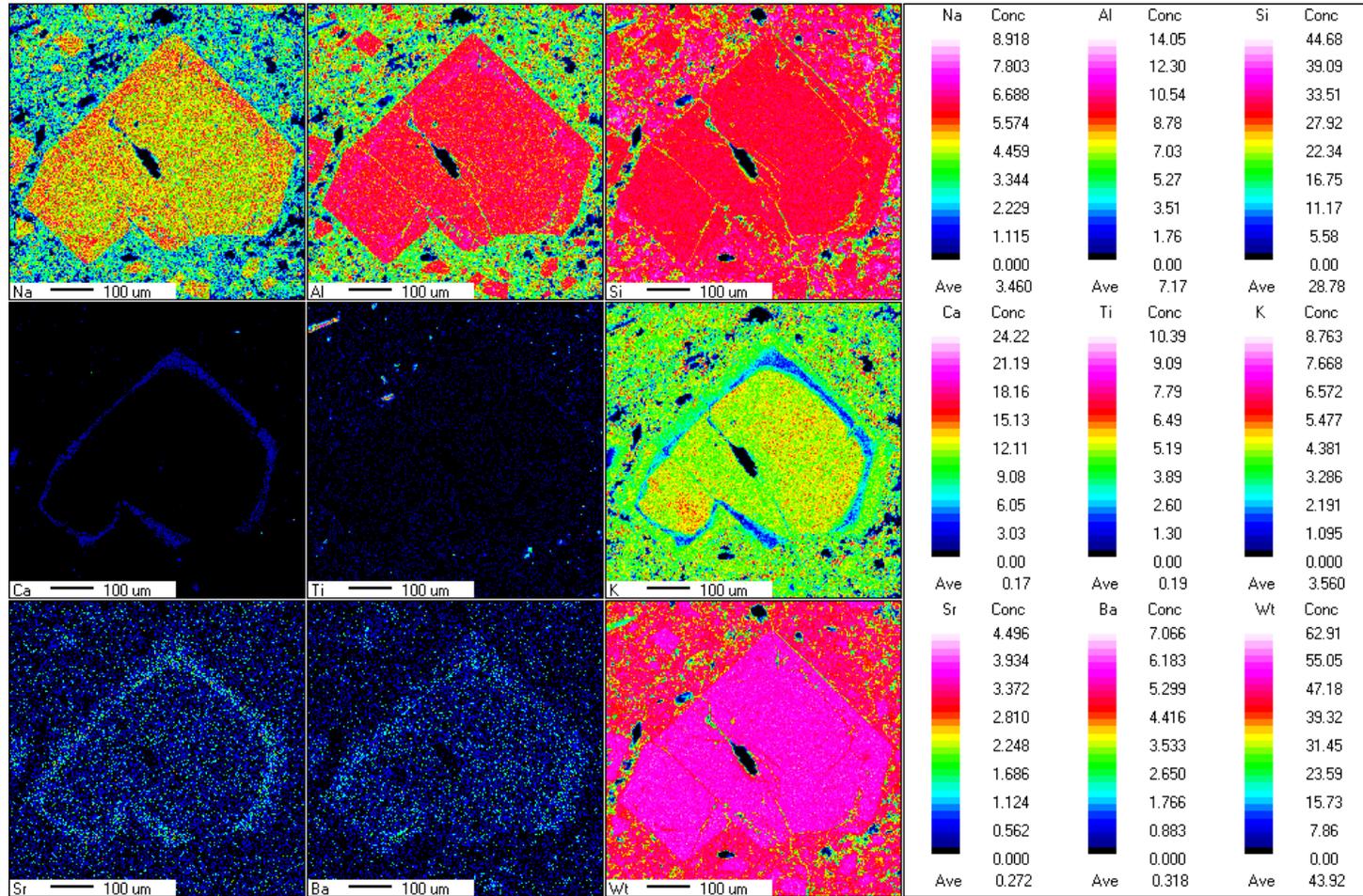
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato de muestra de la muestra VGP-08 Domo SE- Alto de los Godos.



- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato muestra VGP-07 Domo centro Alto de los Godos.



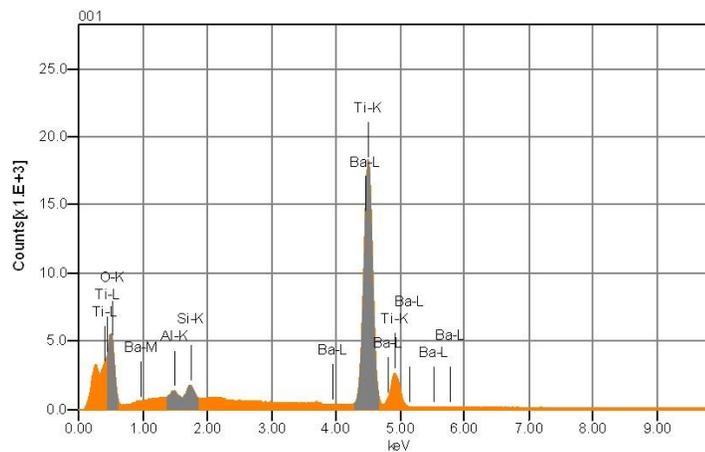
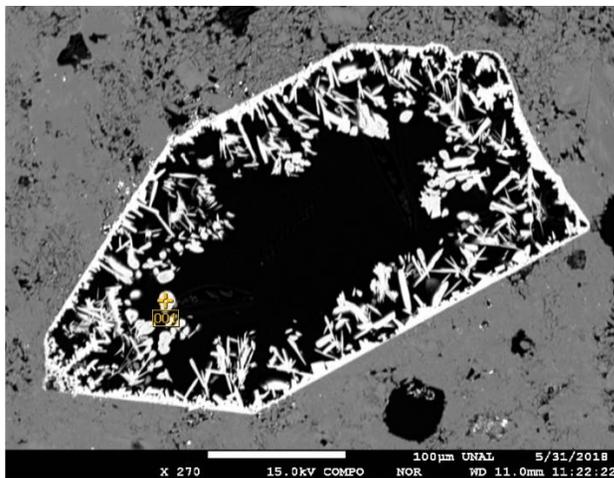
- Mapas composicionales de fenocristal de feldespato muestra VGP-01 Sector Matarredonda Cantera ALFAGRES.



- Imágenes y puntos con espectroscopía de energía dispersiva (EDS)

Departamento de Geociencias -UNAL

001

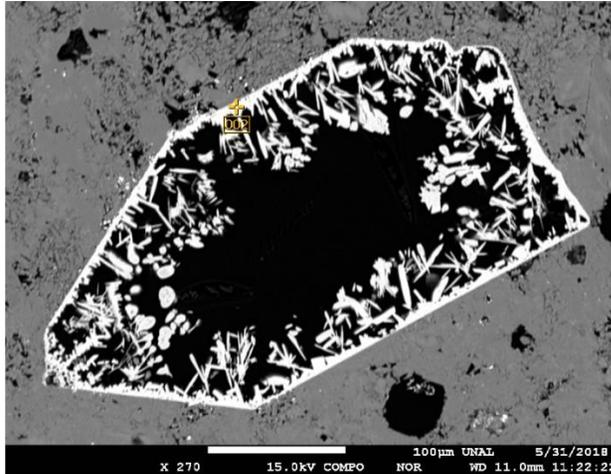


Volt : 15.00 kV
Mag. : x 270
Date : 2018/05/31
Pixel : 1280 x 960

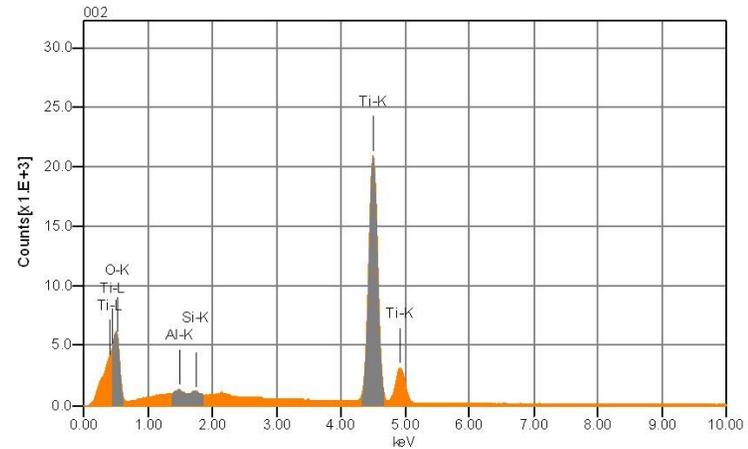
Acquisition Condition
Instrument : 8230
Volt : 15.00 kV
Current : ---
Process Time : T2
Live time : 60.00 sec.
Real Time : 64.26 sec.
DeadTime : 7.00 %
Count Rate : 13650.00 CPS

Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O							
Al ₂ O ₃ *	0.67	0.55	0.13	0.03	106791	0.0352119	K
SiO ₂ *	1.32	1.83	0.22	0.03	199758	0.0736712	K
TiO ₂	89.13	92.81	11.38	0.13	7707070	7.4066089	K
BaO	8.87	4.81	0.59	0.13	702410	1.0023265	L
Total	100.00	100.00	12.33				

002

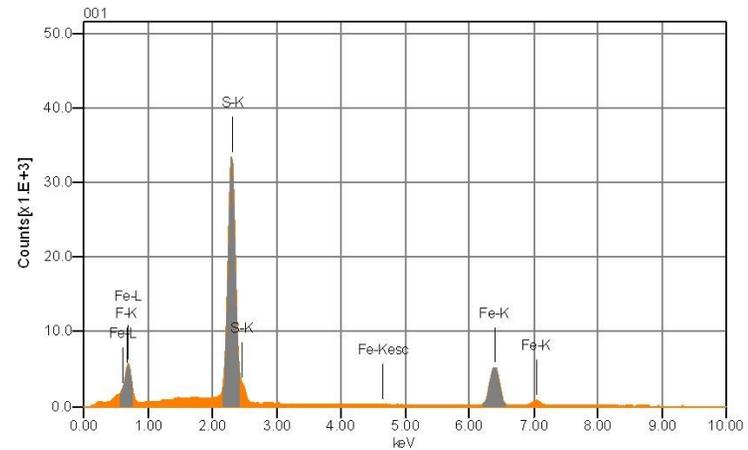
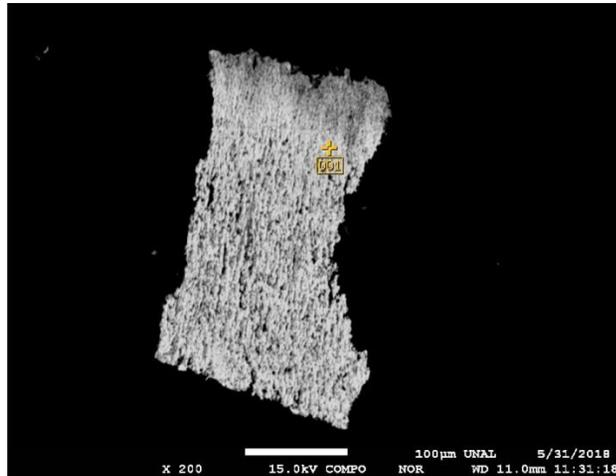


Volt	: 15.00 kV	Acquisition Condition
Mag.	: x 270	Instrument : 8230
Date	: 2018/05/31	Volt : 15.00 kV
Pixel	: 1280 x 960	Current : ---
		Process Time : T2
		Live time : 60.00 sec.
		Real Time : 64.69 sec.
		DeadTime : 8.00 %
		Count Rate : 14121.00 CPS



Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O							
Al ₂ O ₃ *	0.44	0.35	0.08	0.02	81245	0.0261324	K
SiO ₂ *	0.36	0.47	0.06	0.03	61215	0.0220233	K
TiO ₂	99.20	99.18	11.88	0.13	9459559	8.8680529	K
Total	100.00	100.00	12.02				

001

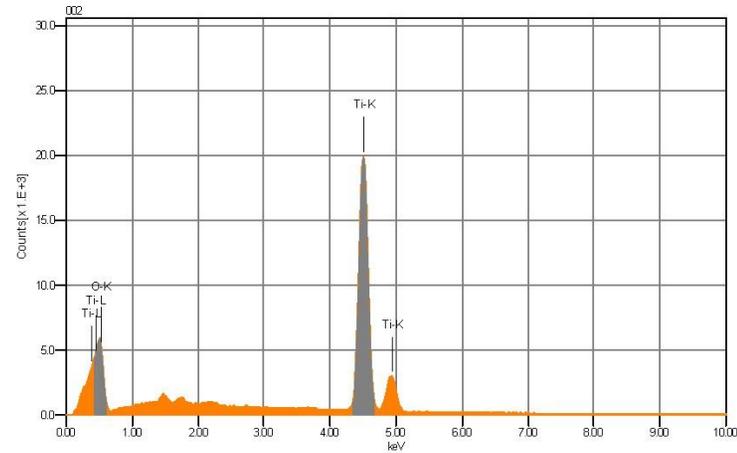
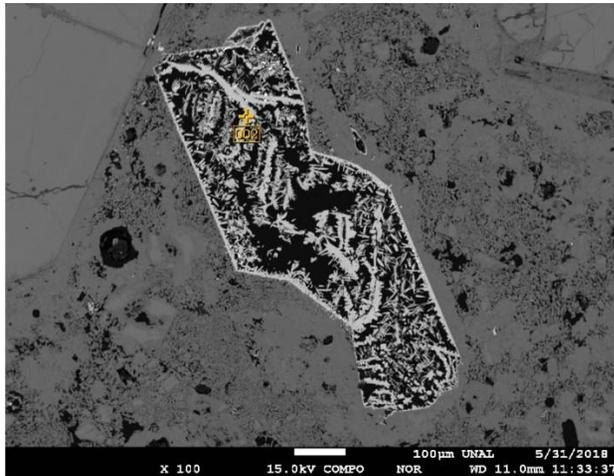


Volt : 15.00 kV
Mag. : x 200
Date : 2018/05/31
Pixel : 1280 x 960

Acquisition Condition
Instrument : 8230
Volt : 15.00 kV
Current : ---
Process Time : T2
Live time : 42.02 sec.
Real Time : 47.48 sec.
DeadTime : 11.00 %
Count Rate : 22813.00 CPS

Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
F	2.34	5.04	0.04	240876	0.4762812	K
S	43.14	55.04	0.06	9769779	5.9802370	K
Fe	54.52	39.93	0.11	2832342	7.7373251	K
Total	100.00	100.00				

002

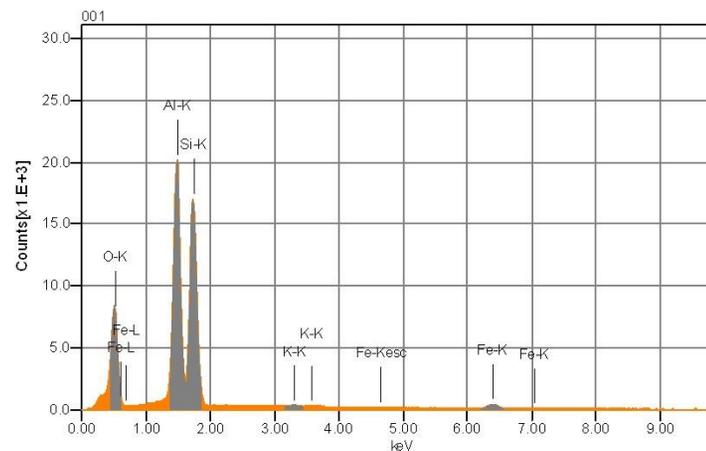
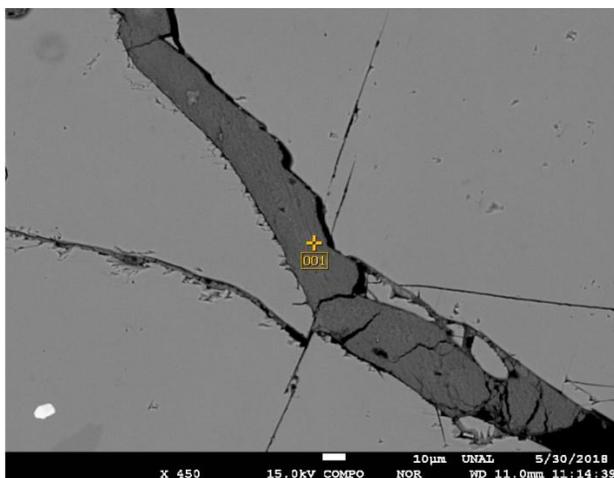


Volt : 15.00 kV
Mag. : x 100
Date : 2018/05/31
Pixel : 1280 x 960

Acquisition Condition
Instrument : 8230
Volt : 15.00 kV
Current : ---
Process Time : T2
Live time : 60.00 sec.
Real Time : 64.61 sec.
DeadTime : 7.00 %
Count Rate : 14012.00 CPS

Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O							
TiO2	100.00	100.00	12.00	0.13	8776645	8.2278414	K
Total	100.00	100.00	12.00				

001

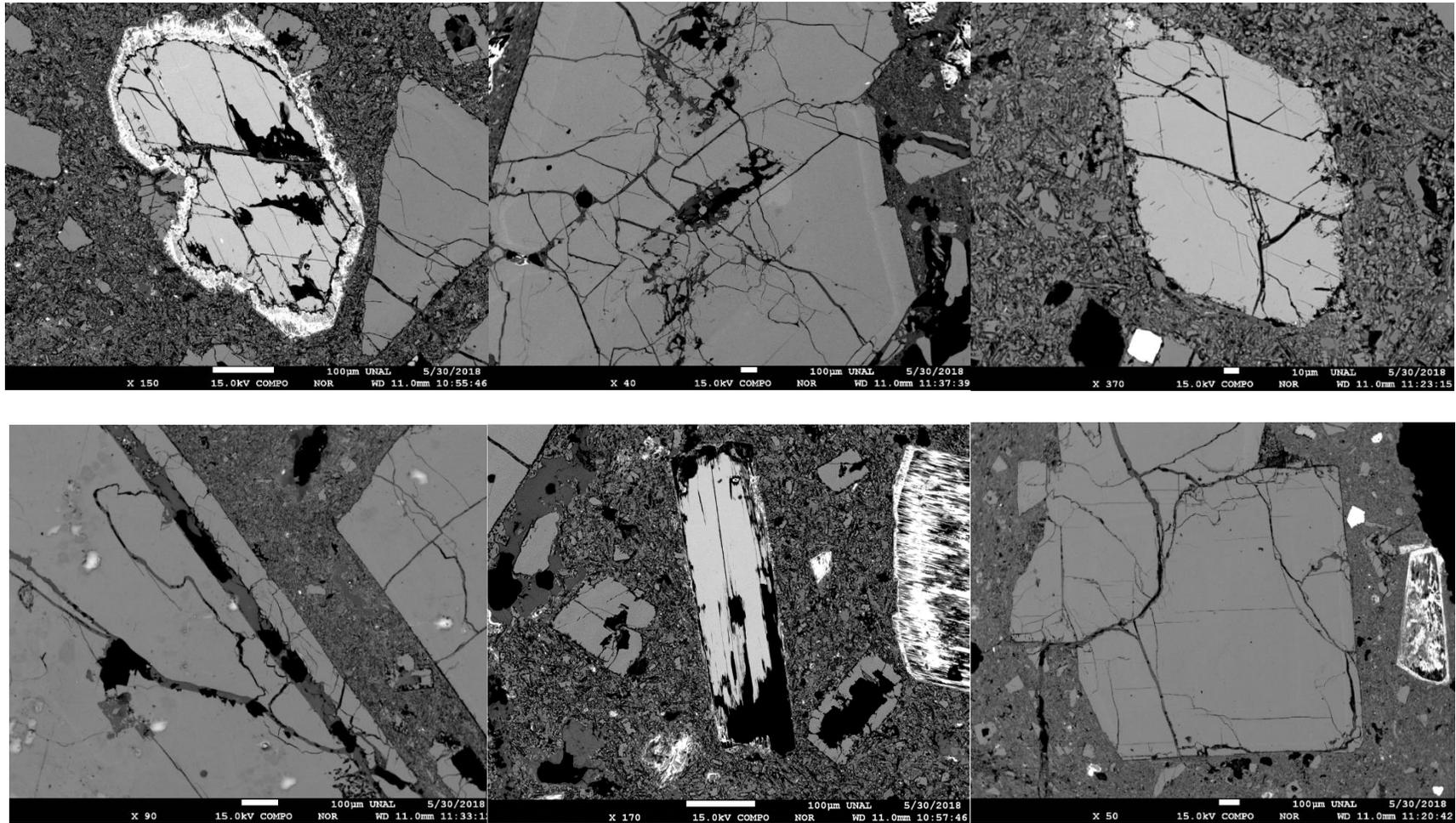


Volt : 15.00 kV
Mag. : x 450
Date : 2018/05/30
Pixel : 1280 x 960

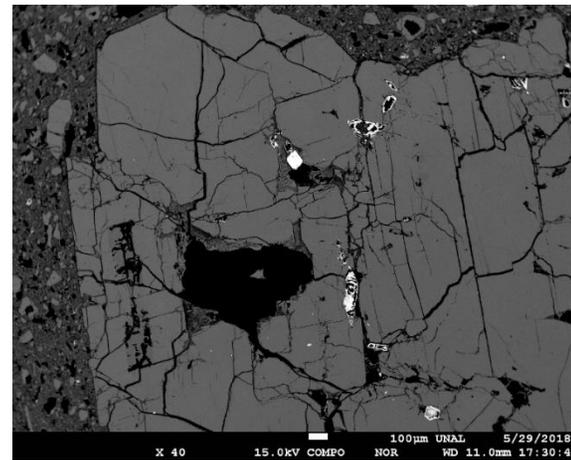
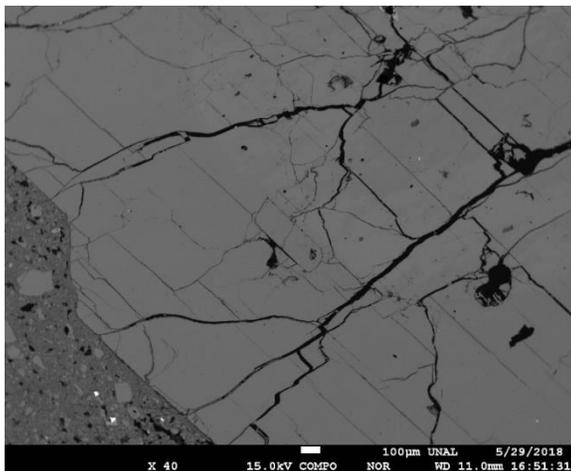
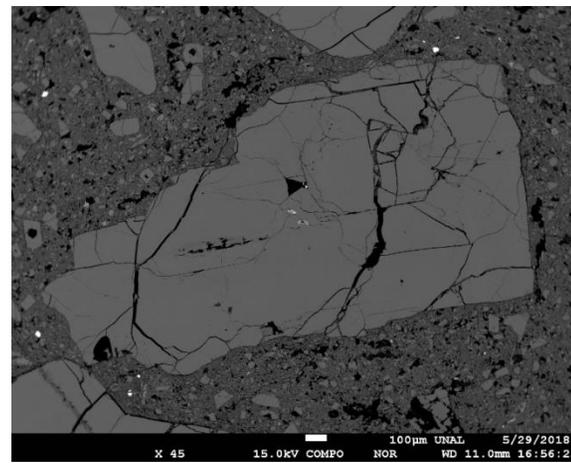
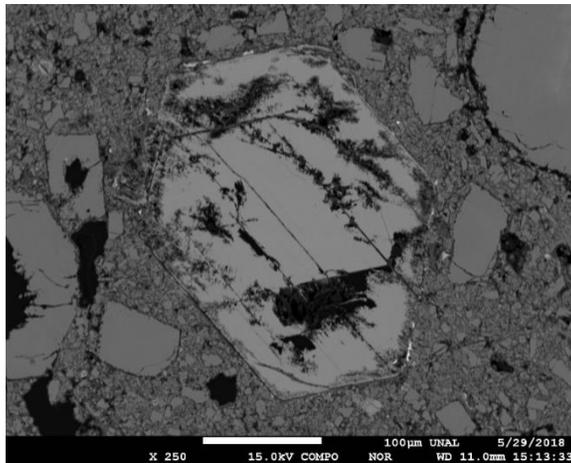
Acquisition Condition
Instrument : 8230
Volt : 15.00 kV
Current : ---
Process Time : T2
Live time : 56.54 sec.
Real Time : 60.53 sec.
DeadTime : 7.00 %
Count Rate : 12183.00 CPS

Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O							
Al ₂ O ₃ *	41.34	29.74	6.39	0.15	3269397	1.4933904	K
SiO ₂ *	52.37	63.92	6.87	0.20	3074891	1.5709976	K
K ₂ O*	0.32	0.25	0.05	0.03	22430	0.0208411	K
FeO*	5.97	6.09	0.65	0.08	126619	0.3440116	K
Total	100.00	100.00	13.96				

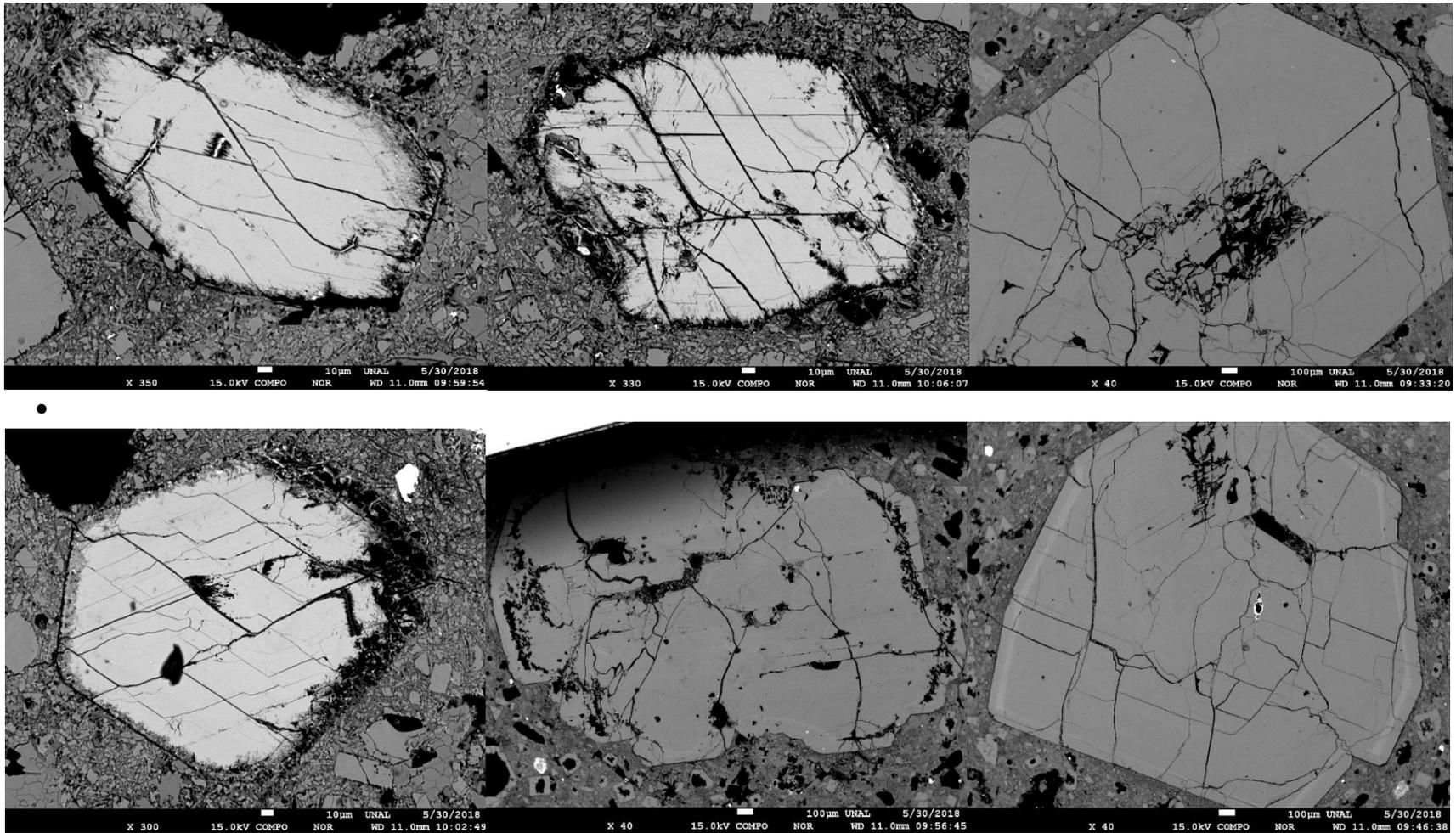
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-07 Domo Centro Alto de los Godos.



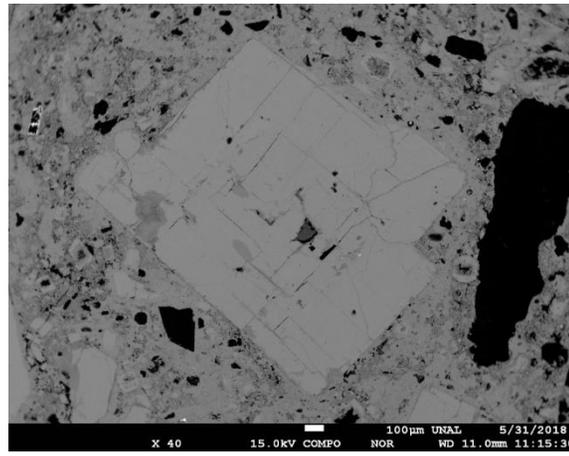
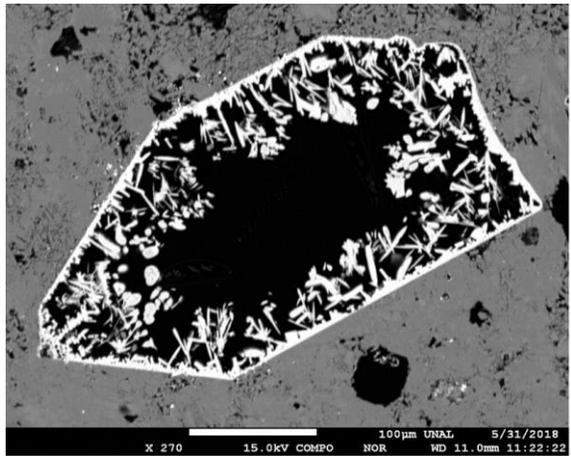
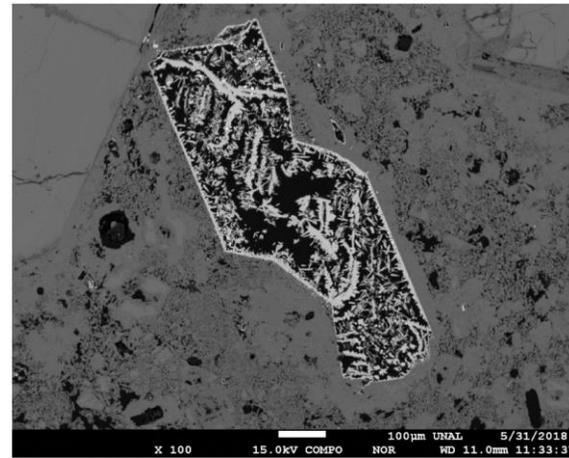
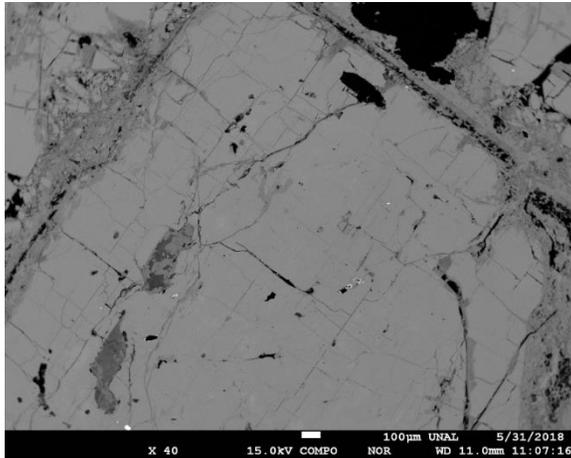
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-09 Domo SE Alto de los Godos.



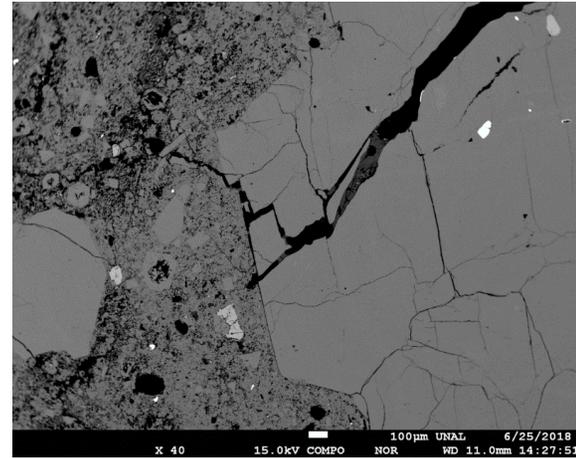
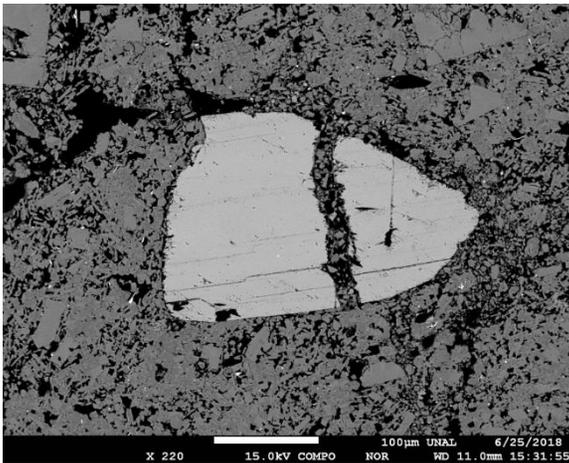
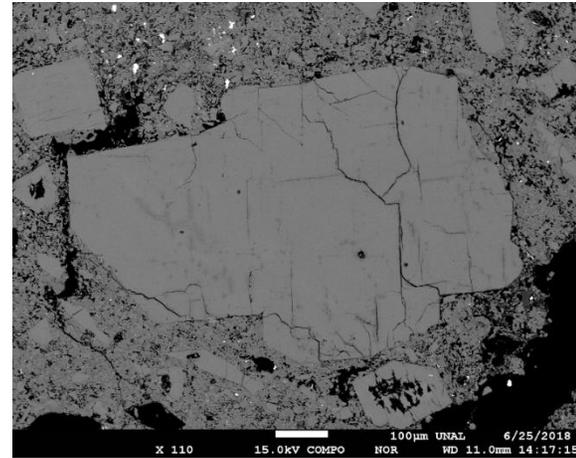
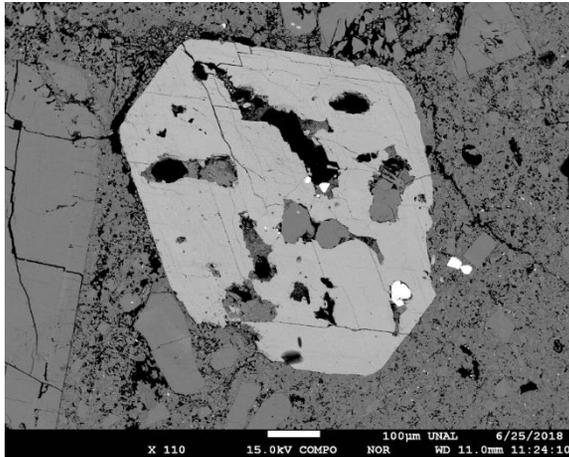
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-06 Domo NW sector Alto de los Godos.



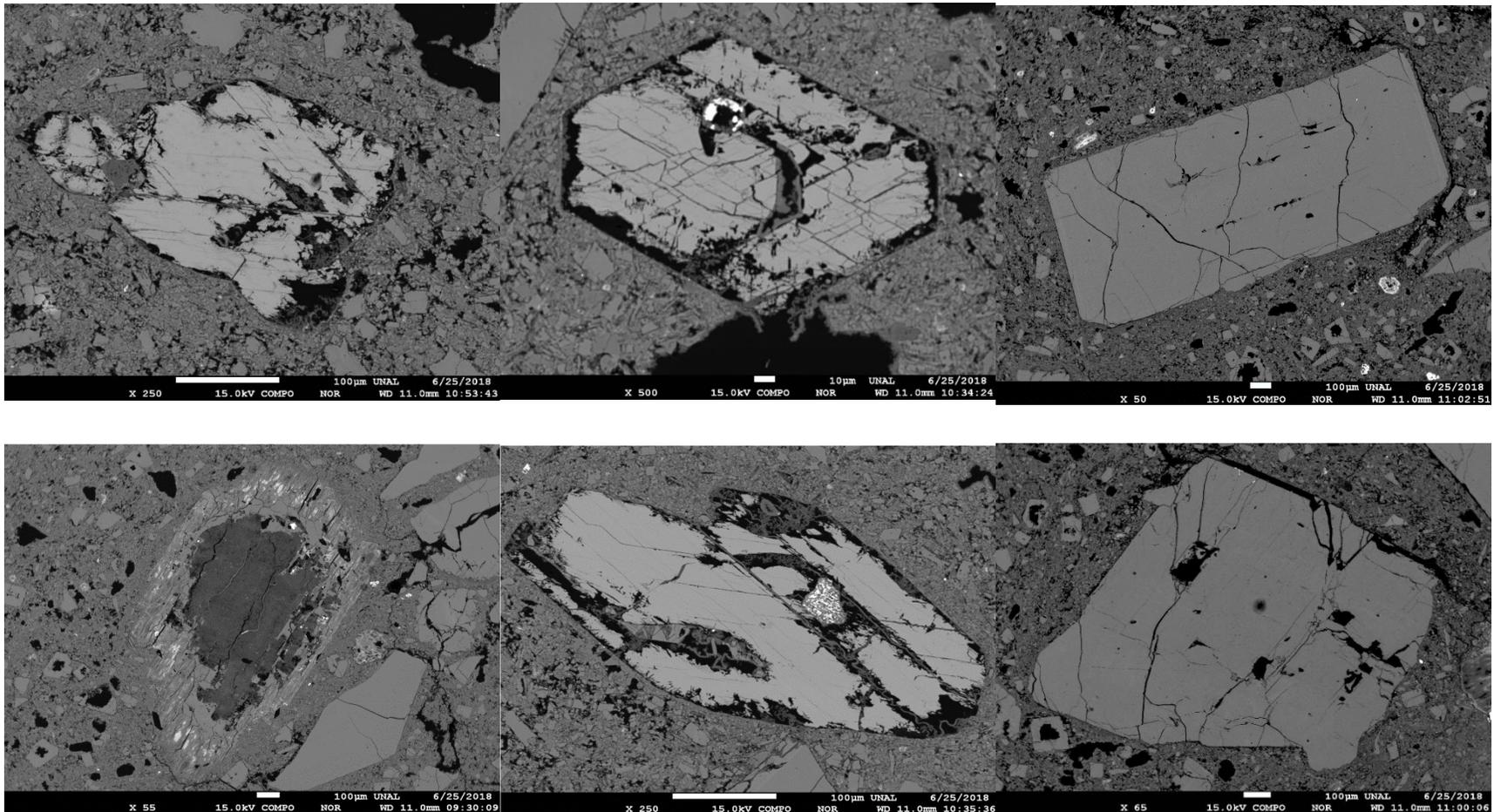
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-05 muestra cercana a domo centro y falla Agua Tibia.



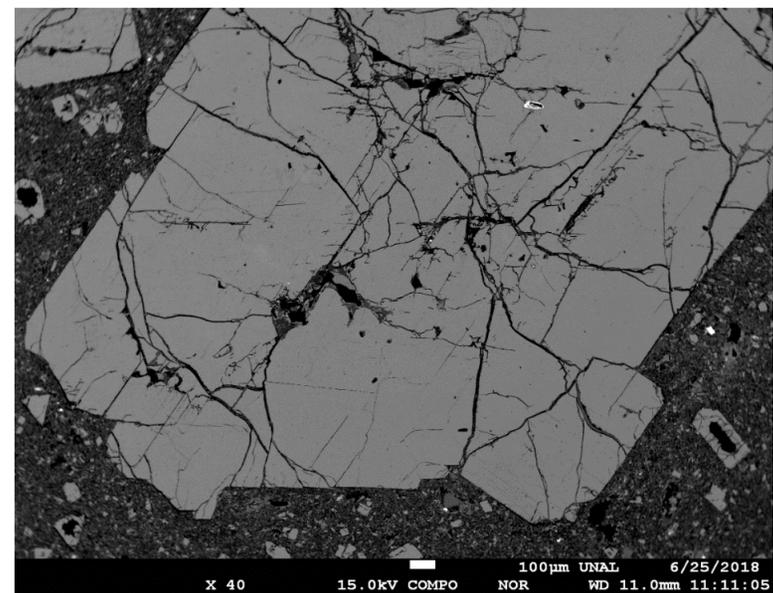
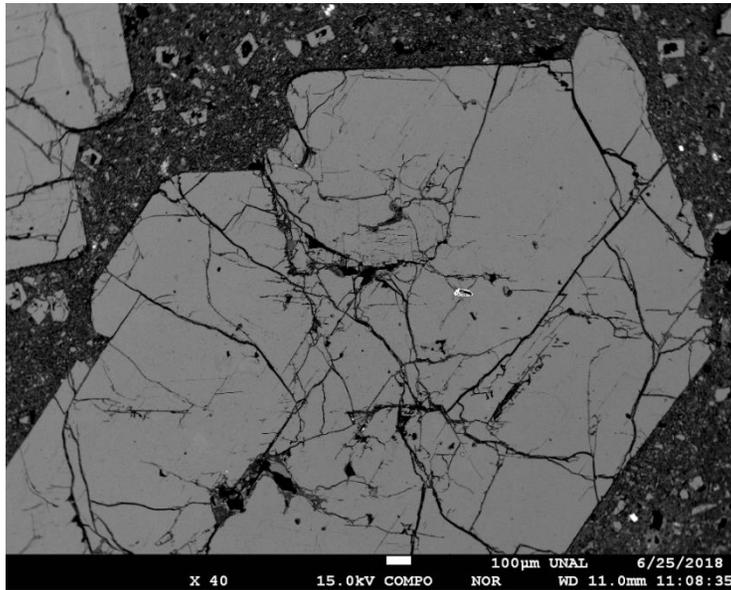
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-01 muestra sector Matarredonda- Cantera ALFAGRES.



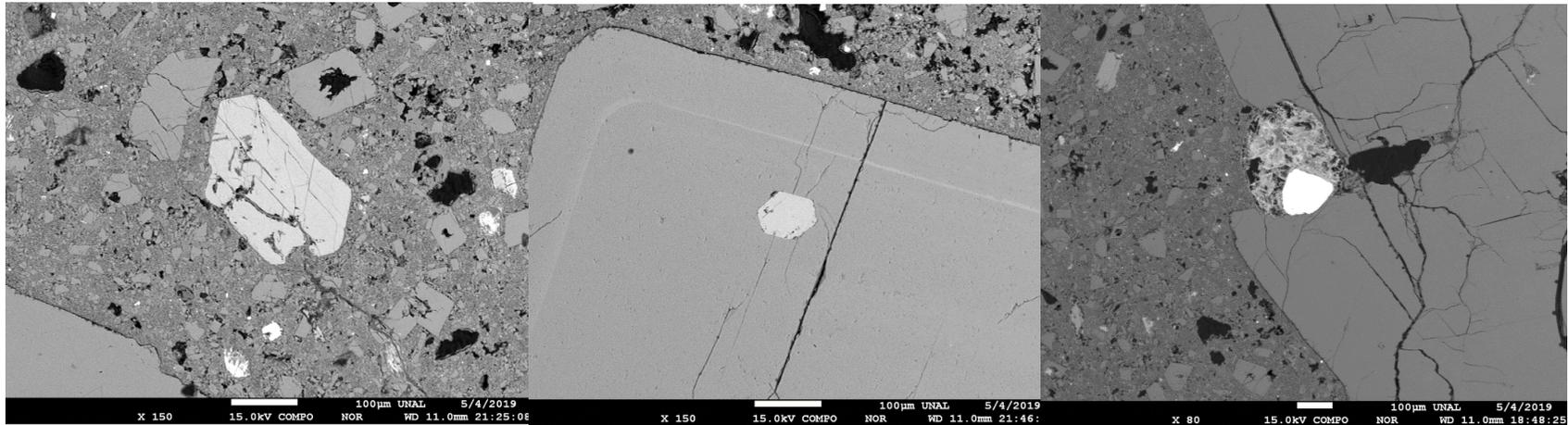
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-03 muestra sector Matarredonda- Cantera ALFAGRES.



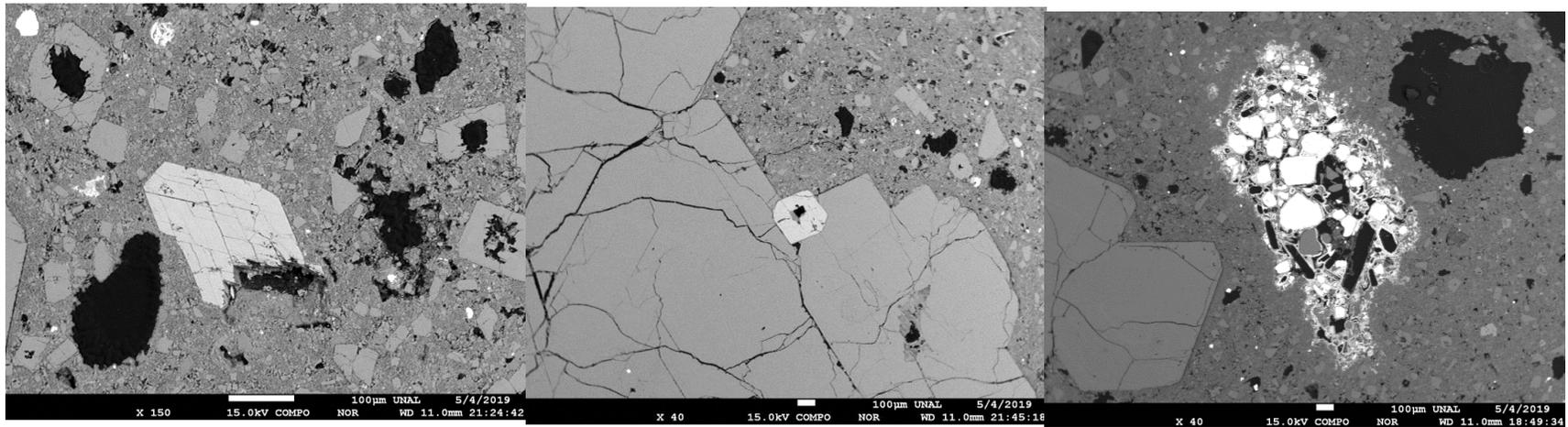
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-04 muestra sector Matarredonda- Cantera ALFAGRES.



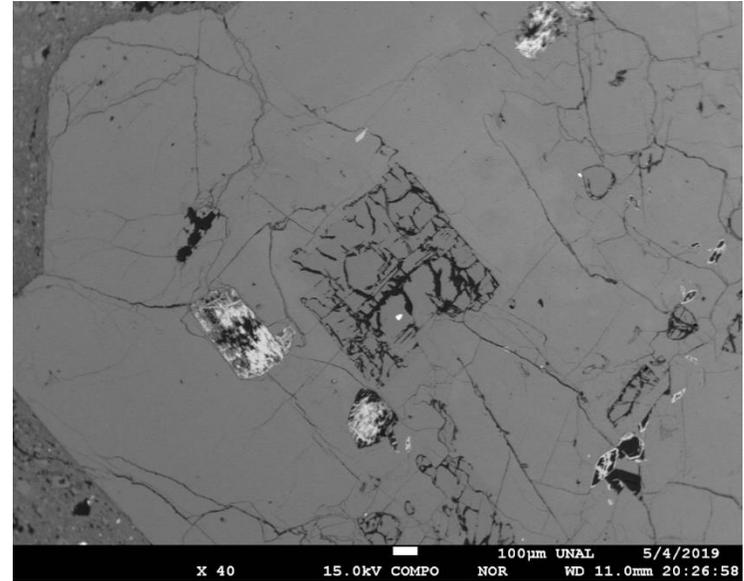
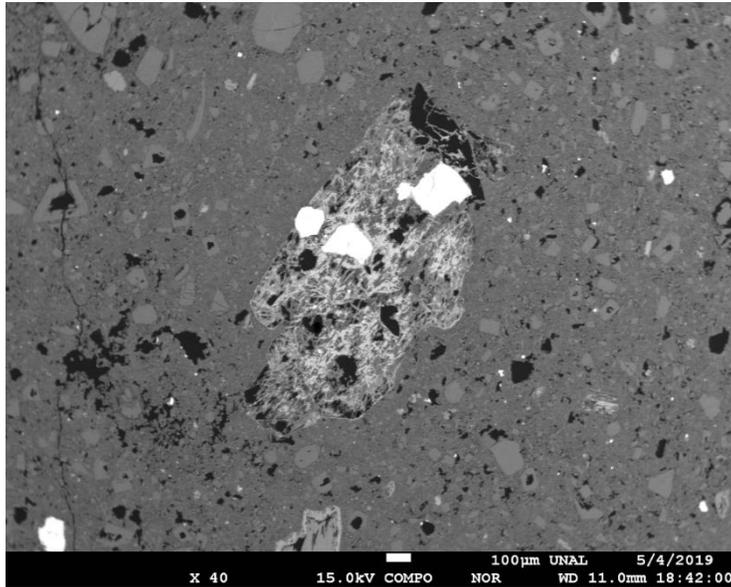
- Imágenes electrones retrodispersados (BSE)- Muestra VGP-08 muestra domo SE Alto de los Godos.



- Imágenes electrones retrodispersados



- (BSE)- Muestra VGP-08 muestra domo SE Alto de los Godos.



F. Anexo: datos de campo descripción geomecánica

SECCIÓN 1									
N°	Distancia a pto inicio	Tipo	Orientación	Apertura	Relleno	Humedad	Rugosidad	Zona de alteración	Ancho zona de alteración
1	70 cm	Diaclasa	NW	1 mm	Material arcilloso negro	Húmedo	Lisa	NO	-
2	84 cm	Diaclasa	SE	1 mm	Material arcilloso negro	Húmedo	Lisa	NO	-
3	1.50 m	Diaclasa	NW	0.5 mm	Material arcilloso negro con material blanco, apariencia cristalina, forma cúbica incipiente	Húmedo	Rugosa	NO	-
4	2.10 m	Fractura	NW	1 mm	Material arcilloso negro con óxidos de hierro, arcillas rojizas	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris.	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
5	2.47 m	Fractura	NW	Submilimétrica	Material arcilloso negro con óxidos de hierro, arcillas rojizas	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris.	8 cm (4 cm Izquierda y 4 cm Derecha)
6	3.10 m	Fractura	Vertical	0.5 mm	Material arcilloso blanco con lodo y arcilla, algunos cristales, posible alteración de plagioclasa, zonación.	Húmedo	Rugoso	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris	33 cm (16.5 cm Izquierda y 16.5 cm Derecha)
7	4.10 m	Fractura	Vertical	1 cm	Material blanco cristalino con dureza menor a 5	Húmedo	Rugoso	-	-
8	4.22 m	Fractura	-	2 mm	Material arcilloso color café oscuro	Húmedo	Rugoso	SÍ	8 cm (4 cm Izquierda y 4 cm Derecha)
9	4.90 m	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso negro	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación color gris	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
10	6.70 m	Fractura	NW	3 mm	Material cristalino blanco y material arcilloso café oscuro. Espejo de falla, zona pulida.	Húmedo	Lisa	NO	NA
11	7.95 m	Fractura	-	Cerrada Oblicua	-	Húmedo	Rugosa	SÍ	6 cm (3 cm Izquierda y 3 cm Derecha)
12	8.52 m	Fractura	-	0.5 mm	-	Húmedo	Rugoso	SÍ	11 cm (5.5 cm Izquierda y 5.5 cm Derecha)
13	9.30 m	Fractura-Zona de Brecha 10 cm	NW	Variables submilimétricas 0.5 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	-	-
14	9.45 m	Fractura-Zona de Brecha	-	2 mm	Material arcilloso color café oscuro, tamaño lodo limo y arcilla. Fragmentos de roca fresca angulosos tamaños hasta 17 cm	Húmedo	Rugoso	NO	-
15	9.72 m	Fractura-Zona de Brecha	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo	Húmedo	Rugoso	NO	-

16	10.0 m	Fractura-Zona de Brecha	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo	Húmedo	Rugoso	NO	-
17	10.30 m	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo con material cristalino blanco	Húmedo	Rugoso	SÍ	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
18	11.45 m	Subvertical	-	Cerrada	Cerrada, algunos sectores abierta con material arcilloso negro.	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 cm (5 cm Izquierda y 5 cm Derecha)
19	14.49 m	Fractura	Vertical	0.5-0.3 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	SÍ	8 cm, lado derecho
20	16.03 m	Fractura	Vertical	1 cm	Material arcilloso blanco, posiblemente feldspatos caolinitizados con material arcilloso café-	Húmedo	Rugoso	SÍ	23 cm
21	17.08 m	Fractura	SE	4 cm	Material arcilloso blanco, posiblemente feldspatos caolinitizados con material arcilloso café-	Húmedo	Rugoso	SÍ	18 cm
22	18.46 m	Fractura	Subvertical	0.7 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	NO	NO
23	19.05 m	Fractura	SE	Cerrada	Material arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	NO
24	20.05 m	Fractura	SE	Cerrada	Material arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	NO

SECCIÓN 1									
Nº	Distancia pto inicio	Tipo	Orientación	Apertura	Relleno	Humedad	Rugosidad	Zona de Alteración	Ancho de Zona de Alteración
1	70 cm	Diaclasa	NW	1 mm	Material arcilloso negro	Húmedo	Lisa	NO	-
2	84 cm	Diaclasa	SE	1 mm	Material arcilloso negro	Húmedo	Lisa	NO	-
3	1.50 m	Diaclasa	NW	0.5 mm	Material arcilloso negro con material blanco, apariencia cristalina, forma cúbica incipiente	Húmedo	Rugosa	NO	-
4	2.10 m	Fractura	NW	1 mm	Material arcilloso negro con óxidos de hierro, arcillas rojizas	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris.	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
5	2.47 m	Fractura	NW	Submilimétrica	Material arcilloso negro con óxidos de hierro, arcillas rojizas	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris.	8 cm (4 cm Izquierda y 4 cm Derecha)
6	3.10 m	Fractura	Vertical	0.5 mm	Material arcilloso blanco con lodo y arcilla, algunos cristales, posible alteración de plagioclasa, zonación.	Húmedo	Rugoso	Sí, zonación paralela a lado y lado de la fractura, color gris	33 cm (16.5 cm Izquierda y 16.5 cm Derecha)
7	4.10 m	Fractura	Vertical	1 cm	Material blanco cristalino con dureza menor a 5	Húmedo	Rugoso	-	-
8	4.22 m	Fractura	-	2 mm	Material arcilloso color café oscuro	Húmedo	Rugoso	SÍ	8 cm (4 cm Izquierda y 4 cm Derecha)
9	4.90 m	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso negro	Húmedo	Rugosa	Sí, zonación color gris	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
10	6.70 m	Fractura	NW	3 mm	Material cristalino blanco y material arcilloso café oscuro. Espejo de falla, zona pulida.	Húmedo	Lisa	NO	NA
11	7.95 m	Fractura	-	Cerrada oblicua	-	Húmedo	Rugosa	SÍ	6 cm (3 cm Izquierda y 3 cm Derecha)
12	8.52 m	Fractura	-	0.5 mm	-	Húmedo	Rugoso	SÍ	11 cm (5.5 cm Izquierda y 5.5 cm Derecha)
13	9.30 m	Fractura-Zona de Brecha 10 cm	NW	Variables submilimétricas 0.5 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	-	-
14	9.45 m	Fractura-Zona de Brecha	-	2 mm	Material arcilloso color café oscuro, tamaño lodo limo y arcilla. Fragmentos de roca fresca angulosos tamaños hasta 17 cm	Húmedo	Rugoso	NO	-
15	9.72 m	Fractura-Zona de Brecha	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo	Húmedo	Rugoso	NO	-

16	10.0 m	Fractura-Zona de Brecha	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo	Húmedo	Rugoso	NO	
17	10.30 m	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso rojo con material cristalino blanco	Húmedo	Rugoso	SÍ	12 cm (6 cm Izquierda y 6 cm Derecha)
18	11.45 m	Subvertical	-	Cerrada	Cerrada, algunos sectores abierta con material arcilloso negro.	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 cm (5 cm Izquierda y 5 cm Derecha)
19	14.49 m	Fractura	Vertical	0.5-0.3 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	SÍ	8 cm, lado derecho
20	16.03 m	Fractura	Vertical	1 cm	Material arcilloso blanco, posiblemente feldespatos caolinitizados con material arcilloso café-	Húmedo	Rugoso	SÍ	23 cm
21	17.08 m	Fractura	SE	4 cm	Material arcilloso blanco, posiblemente feldespatos caolinitizados con material arcilloso café-	Húmedo	Rugoso	SÍ	18 cm
22	18.46 m	Fractura	Subvertical	0.7 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	NO	NO
23	19.05 m	Fractura	SE	Cerrada	Material arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	NO
24	20.05 m	Fractura	SE	Cerrada	Material arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	NO

SECCIÓN 2									
Nº	Distancia Pto inicio (m)	Tipo	Orientación	Apertura	Relleno	Humedad	Rugosidad	Zona de Alteración	Ancho de Zona de Alteración
1	0.67	Fractura	W	3 mm	Material arcilloso negro	Húmedo	Rugoso	NO	-
2	1.30	Fractura-zona de brecha	SE	Cerrada	Sin relleno	Seca	Rugoso	NO	-
3	2.60	Fractura- zona de brecha, fragmentos de depósito.	NW	1 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
4	3.70	Fractura-zona de brecha, fragmentos de depósito angulosos, tamaño 1 cm-40 cm.	Vertical	1 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
5	4.50	Fractura	Vertical	2 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
6	5.20	Fractura, zona de brecha, vertical 30 cm de ancho	Vertical	-	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
7	6.20	Fractura	SE	2 cm	Material arcilloso rojo/marrón	Húmedo	Rugoso	NO	-
8	7.37	Fractura	NW	2 mm	Material arcilloso blanco	Húmedo	Rugoso	NO	-
9	7.73	Diaclasa	NW	0.5 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
10	8.25	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	SÍ	2 cm de ancho
11	8.33	Fractura	NW	0.5 cm	Material arcilloso blanco/marrón	Húmedo	Rugosa	SÍ	1 cm de ancho
12	8.77	Fractura	NW	0.5 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
13	9.15	Fractura	NW	0.5 cm	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	NO	-
14	9.25	Diaclasa	NW	Cerrada	Material harina de falla	Húmedo	¿Lisa?	SÍ	2 cm
15	10.10	Fractura con espejos de falla	NW	Cerrada	Material arcilloso blanco/caolín	Húmedo	Rugosa	SÍ	20 cm
16	10.7	Fractura	Vertical.	Cerrada	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugosa	NO	-
17	12.80	Fractura	Vertical	Cerrada	Harina de Falla	Húmedo	Rugosa	SÍ	2 cm
18	13.37	Fractura	Vertical	3 mm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
19	14.0	Fractura	NW	2 cm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
20	14.45	Fractura	SE	3 mm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
21	14.70	Fractura	NW	1 cm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
22	15.22	Fractura/espejos de falla	SE	1 cm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
23	16.30	Fractura/zona de brecha	NW	2 cm	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	NO	-
23	16.90	Fractura	NW	Cerrada	Material arcilloso café	Húmedo	Rugosa	SÍ	20 cm
24	17.18	Fractura	NW	2 Cm	Material Arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	-

25	17.48	Fractura	NW	1 cm	Material arcilloso	Húmedo	Rugoso	NO	-
26	18.00	Fractura	NW	2 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	4 cm
27	18.66	Fractura	NW	0.5 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	NO	-
28	19.00	Diaclasa	NW	0.5 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	NO	-
29	19.13	Diaclasa	NW	0.5 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	NO	-
30	19.39	Diaclasa	Vertical	10 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	5 cm
31	19.60	Fractura	SW	3 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	-	-
32	19.76	Fractura	SW	3 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	-	-
33	20.56	Fractura	NW	4 mm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 Cm
34	20.8	Fractura	SW	1 cm-5 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 cm
35	21.16	Fractura/espejos de falla	NW	1 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	8 cm
36	21.27	Fractura	NW	0.5 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	-	-
37	21.50	Fractura/espejos de falla	NW	2 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 cm
38	22.00	Fractura/zona de brecha	NW	1 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	SÍ	24 cm
39	22.32	Diaclasa	NW	1 cm	Material arcilloso marrón -negro	Húmedo	Rugoso	SÍ	10 cm
40	23.30	Fractura/espejos de falla	NW	2 cm	Material arcilloso marrón -negro	Húmedo	Rugoso	SÍ	40 cm
41	23.76	Fractura-zona de brecha	Vertical	Cerrada	-	Húmedo	Rugoso	NO	-
41	23.76	Fractura/zona de brecha	Vertical	Cerrada	-	Húmedo	Rugoso	NO	-
42	24.10	Fractura/espejos de falla	Vertical	Cerrada	-	Húmedo	Rugoso	NO	-
43	25.15	Fractura	Vertical	Cerrada	-	Húmedo	Rugoso	SÍ	30 cm
44	25.56	Fractura	Vertical	0.5 cm	Material arcilloso marrón	Húmedo	Rugoso	-	-
45	26.10	Fractura	Vertical	Cerrada	-	-	-	SÍ	40 cm

SECCIÓN 3									
Nº	Distancia Pto inicio (cm)	Tipo	Orientación	Apertura	Relleno	Humedad	Rugosidad	Zona de Alteración	Ancho de Zona de Alteración
1	2.0	Diaclasa	SE	Cerrada	-	-	Liso	NO	NO
2	5.0	Diaclasa	SE	Cerrada	-	-	Liso	NO	NO
3	11.0	Fractura	Vertical	0.5 cm	-	-	Rugosa	NO	NO
4	15.0	Fractura/relleno de cristales tamaño arena	SE	1 cm	-	-	Rugosa	NO	NO
5	25.0	Diaclasa	SE	Cerrada	-	-	Lisa	NO	NO
6	26.0	Diaclasa	SE	Cerrada	-	-	Lisa	NO	NO
7	36.0	Fractura	NW	2 mm	Cristales y líticos de tamaño arena	-	Rugosa	NO	NO
8	45.0	Fractura	SE	2 mm	Cristales y líticos de tamaño arena	-	Rugosa	NO	NO
9	57.0	Fractura	Vertical	Submilimetrico		-	Rugosa	NO	NO
10	66.0	Fractura	Vertical	0.5 cm	Cristales y líticos de tamaño arena y grava	-	Rugosa	NO	NO

